



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



Yüksek Lisans Tezi

**KBRN KAPSAMINDA ACİL DURUMLAR İÇİN DRONE ile
RADYASYON TESPİT ve ÖLÇÜM SİSTEMİ**

Berk DÜZEN

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Baki AKKUŞ**

Eylül, 2021

İSTANBUL

Bu çalışma, 15.09.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Nükleer Fizik Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Baki AKKUŞ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Mustafa DEMİR
İstanbul Üniversitesi Cerrahpařa
Tıp Fakültesi

Doç. Dr. Lidya AMON SUSAM
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

--



ÖNSÖZ

Öncelikle hayatımın her alanında desteklerini hissettiğim, her zaman yanımda olan sevgili ailem, annem Leyla, ablam Dilay ve eşi Sercan'a,

Tez çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen sayın hocam Mehmet Erhan EMİRHAN'a, birçok badireye benimle göğüs geren, Kanada yolculuğumdaki yol arkadaşım, değerli dostum Batuhan Oğuz DENİZLİ'ye, lisans eğitim hayatım sürecinde tanıştığım çok samimi dostlarım ve abilerim İdris TAYŞAN ve Abdülhamit ÇELİK'e,

Kanada'da geçirdiğim süre zarfında beni oğulları yerine koyup bağırlarına basan sevgili Selvi anneme ve Nuri Babama,

Lisans eğitim hayatımda tanıştığım değerli arkadaşlarım Ercan GÜLEŞ ve Murat KALYON'a,

Tüm eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği geçen, bugüne gelmemde pay sahibi olan bütün saygıdeğer hocalarıma,

Anlayışı ve desteğiyle tez çalışmamda bana yol gösteren sayın danışman hocam Prof. Dr. Baki AKKUŞ'a,

minnet ve şükranlarımı sunarım.

Eylül 2021

Berk DÜZEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ACİL DURUMLAR	2
1.1.1. İkitelli Radyasyon Kazası.....	2
1.1.2. Fukuşima Nükleer Santral Kazası	5
1.1.3. Çernobil Nükleer Santral Kazası	6
1.2. LİTERATÜR TARAMASI	7
2. GENEL KISIMLAR.....	9
2.1. KİMYASAL, BİYOLOJİK, RADYALOGİK VE NÜKLEER (KBRN) ACİL DURUMLAR	9
2.2. RADYASYON VE RAYOAKTİVİTE	10
2.3. RADYASYON ÖLÇÜ BİRİMLERİ	10
2.3.1. Işınlanma Düzeyi.....	10
2.3.2. Soğurulan Doz	10
2.3.3. Eşdeğer Doz.....	11
2.3.4. Etkin Doz.....	11
2.4. RADYOAKTİF BOZUNMA TÜRLERİ	12
2.4.1. Alfa Bozunumu	12
2.4.2. Beta Bozunumu	13
2.4.3. Gama Bozunumu	14
2.5. GAMA RADYASYONUNUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ	15
2.5.1. Fotoelektrik Soğrulma	15
2.5.2. Compton Saçılması.....	17
2.5.3. Çift Oluşumu	19

2.6.	RADYASYON DEDEKTÖRLERİ	21
2.6.1.	Gazlı Sayaçlar	21
2.6.2.	Sintilatör Dedektörler	24
2.6.2.1.	Foto-Çoğaltıcı Tüp	25
2.6.3.	Yarı İletken Dedektörler	27
2.6.3.1.	Katkılı Yarı İletkenler	32
2.6.3.2.	PN-Ekleme (PN-Junction)	33
2.6.3.3.	Ters Bias Voltajı (Reverse Bias Voltage)	34
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	36
3.1.	DRONE	36
3.2.	KULLANILAN DEDEKTÖR	38
3.3.	KABLOSUZ VERİ AKTARIMI	39
4.	BULGULAR.....	41
4.1.	BİRİNCİ AŞAMA	41
4.2.	İKİNCİ AŞAMA	46
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	51
	KAYNAKLAR.....	55
	EKLER	57
EK 1.	GDK101 radyasyon dedektörünün çalışması için kullanılan NodeMCU verici kartı için yazılan kod.	57
EK 2.	Mesafe sensörünün çalışması için kullanılan NodeMCU verici kartı için yazılan kod.	61
EK 3.	NodeMCU alıcı kartı için yazılan kod.	65
EK 4.	TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan Drone Radyasyon Dedektörü prototipine ait testlerin yapıldığına dair TENMAK'tan verilen üst yazının bir kopyası.	68
EK 5.	TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan Drone Radyasyon Dedektörü prototipine ait TENMAK'tan verilen test raporunun bir kopyası.	69
EK 6.	TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan FTLAB GDK101 dozimetresine ait kalibrasyon sertifikasının bir kopyası.	70
ÖZGEÇMİŞ		71

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1: Co-60 için beta bozunumunu takiben gerçekleşen gama bozunumu.....	14
Şekil 2: Fotoelektrik soğurulma şematik gösterimi.	15
Şekil 3: Kurşun için fotoelektrik soğurulma katsayısı.	16
Şekil 4: Compton saçılması şematik gösterimi.	17
Şekil 5: 661 keV enerji değerinde oluşan fotopik, geri saçılma piki ve Compton kenarı verilen ^{137}Cs standart kaynağı için yüksek çözünürlük spektrumu.	18
Şekil 6: Çift oluşumu ve ardından gerçekleşen, pozitronun ortamdaki bir elektron ile etkileşimi sonucu 2 adet 0,511 MeV değerinde gama fotonu yayınlanması olaylarının şematik gösterimi.	19
Şekil 7: Gama fotonu ile madde arasında gerçekleşen üç temel etkileşim. σ_f , σ_c , σ_p sırası ile fotoelektrik soğurulma, Compton saçılması ve çift oluşumu tesir kesitleri.....	20
Şekil 8: Gazlı sayaçların çalışma bölgeleri.	21
Şekil 9: Orantılı sayaçlarda çığ oluşumu.	23
Şekil 10: Geiger-Müller tüpü içindeki çığ dağılımı.	24
Şekil 11: Foto-çoğaltıcı tüp şematik gösterimi.	26
Şekil 12: Yalıtkan, yarı iletken ve metaller için enerji band yapısı.	28
Şekil 13: 0 K ve yüksek sıcaklıklarda silikon kristalinin kovalent bağ modeli. 0 K'de bütün elektronlar kovalent bağlarda yer alırken daha yüksek sıcaklıklarda termal enerji bazı bağları kırarak valans bandda boşluk bırakır.....	30
Şekil 14: Yasak enerji aralığındaki rekombinasyon ve tuzak merkezlerinin şematik gösterimi.	31
Şekil 15: (a) n-tipi yarı iletken malzemesi oluşturmak için eklenen donör safsızlıkları. Safsızlıklar kristale fazla elektronlar ekler ve enerji aralığında donör safsızlık seviyesi oluşturur. (b) p-tipi yarı iletken malzemesi oluşturmak için eklenen alıcı (acceptor) safsızlıkları. Safsızlıklar kristale fazla boşluklar oluşturur ve enerji safsızlık seviyesi valans bandına doğru yaklaşır.	33
Şekil 16: Ters bias bağlantısı.	35
Şekil 17: DJI Mavic 2 Pro.....	37

Şekil 18: GDK101 model dedektör.....	38
Şekil 19: Üzerinde ESP8266 Wi-Fi mikro çipi barındıran, programlanabilir NodeMCU elektronik kartı.....	40
Şekil 20: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında kullanılan deney standı.....	43
Şekil 21: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında kullanılan kaynağın bulunduğu nokta.....	44
Şekil 22: Dedektör platformunun Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında hareketli stant üzerindeki konumu.....	45
Şekil 23: Elektronik kart üzerine lehimlenerek oluşturulan ölçüm platformu ve platforma güç vermek için kullanılan powerbank.....	46
Şekil 24: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında ölçüm platformu ve drone birleştirilerek oluşturulan Drone Radyasyon Dedektörü prototipi.....	47
Şekil 25: Mesafe – Ölçüm Sonucu grafiği.....	49

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Aralık 1993'te paketlenen üç adet kullanılmış kobalt-60 kaynağının aktivitesi [1].	2
Tablo 2: Çeşitli radyasyon türleri için kalite faktörleri [8].	11
Tablo 3: Doku ağırlık faktörleri. Diğer dokular (*): Adrenaller, ekstratorasik bölge, safra kesesi, kalp, böbrekler, lenf bezleri, kas, oral mukoza, pankreas, prostat, ince bağırsak, dalak, timus, rahim [9].	12
Tablo 4: GDK101 model gama radyasyonu sensör modülü için üreticiden alınmış özellik bilgileri.	39
Tablo 5: Cs-137 kaynağı kullanılarak alınan ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının referans değerlere göre hata yüzdeleri. Her bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.	41
Tablo 6: Cs-137 kaynağı önüne kurşun engel konularak alınan ölçüm sonucu, ölçüm sonucunun referans değere göre hata yüzdesi ve dedektörün ölçtüğü arka plan doz hızı değeri. Her bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.	42
Tablo 7: Ölçüm platformunun Drone ile bağlantısı kurulmuş hali ile Cs-137 kaynağı kullanılarak alınan ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının referans değerlere göre hata yüzdeleri. Her bir nokta için bir okuma alınmıştır. Bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.	48
Tablo 8: Ardışık iki mesafe ile bu mesafelerde ölçülen radyasyon doz hızlarının ters kare kanununa göre karşılaştırması ve I_1/I_2 oranının d_2^2/d_1^2 oranına göre hata yüzdesi. I_1 , d_1 mesafesinde ölçülen radyasyon doz hızını; I_2 , d_2 mesafesinde ölçülen radyasyon doz hızını ifade etmektedir.	49

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler Açıklama

α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
ν	: Nötrino
$\bar{\nu}$: Anti-nötrino
e^-	: Elektron
e^+	: Pozitron
Q	: Kalite Faktörü
W_T	: Doku Ağırlık Faktörü
Z	: Proton Sayısı
N	: Nötron Sayısı
A	: Kütle Numarası

Kısaltmalar Açıklama

eV	: Elektron Volt
keV	: Kilo Elektron Volt
MeV	: Mega Elektron Volt
GeV	: Giga Elektron Volt
NaI	: Sodyum İyodur
Si	: Silikon
Ge	: Germanyum
ps	: Piko Saniye
ns	: Nano Saniye
sa	: Saat
K	: Kelvin
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
R	: Röntgen
Gy	: Gray
Sv	: Sievert

mSv	: Mili Sievert
μSv	: Mikro Sievert
Ci	: Curie
mCi	: Mili Curie
Bq	: Becquerel
GBq	: Giga Becquerel
TBq	: Tera Becquerel
mAh	: Miliamper Saat
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi
KBRN	: Kimyasal Biyolojik Radyolojik Nükleer
TENMAK	: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
SSDL	: Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarı
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
ÇNAEM	: ekmece Nükleer Araştırma ve Eēitim Merkezi
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
İHA	: İnsansız Hava Aracı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KBRN KAPSAMINDA ACİL DURUMLAR İÇİN DRONE ile RADYASYON TESPİT ve ÖLÇÜM SİSTEMİ

Berk DÜZEN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Baki AKKUŞ

Bu tez çalışmasında KBRN Kapsamında Acil Durumlar için Drone ile Radyasyon Tespit ve Ölçüm Sistemi konusu detaylıca araştırılmış, orta boyutlu bir drone ve drone'un taşıyabileceği ağırlıklarda geometrik olarak küçük ve hafif bir yarı iletken dedektörü kullanılmıştır. Dedektörün gerekli elektronik bağlantıları yapılarak uzak veri transferi yapması sağlanmıştır. Yapılan testler sonucunda ortaya bir Drone Radyasyon Dedektörü prototipi çıkmıştır. Araştırma ve çıkan prototip sonucunda bu tarz bir sistemin olası radyasyon kazalarında çalışanların riskli bölgeye girip radyasyona maruz kalmalarının önüne geçerek hem güvenli bölge sınırlarının belirlenmesinde hem de radyoaktif maddenin yer tespitinin yapılmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Eylül 2021, 84 sayfa.

Anahtar kelimeler: KBRN, Drone, Radyasyon Dedektörü, Yarı İletken Dedektör, PIN Diyot Dedektör

SUMMARY

M.Sc. THESIS

RADIATION DETECTION and MEASUREMENT WITH DRONE for EMERGENCY SITUATIONS WITHIN CBRN

Berk DÜZEN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Baki AKKUŞ

In this thesis, the subject of Radiation Detection and Measurement System with Drone for Emergency Situations Within CBRN was investigated in detail, a medium-sized drone and a geometrically small and light semiconductor detector which can be carried by the drone were used. By making the necessary electronic connections of the detector, remote data transfer was provided. After the necessary tests were taken, a Drone Radiation Detector prototype emerged. As a result of the research and the prototype, it is shown that such a system can be used both in determining the safe zone boundaries and in locating the radioactive material, by preventing the employees from being exposed to radiation by entering the risky area in case of possible radiation accidents.

September 2021, 84 pages.

Keywords: CBRN, Drone, Radiation Detector, Semiconductor Detector, PIN Diode Detector

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, radyoaktif tehlike durumlarında saha personelinin radyoaktiviteden etkilenmesinin önüne geçilmesi ve radyoaktif maddenin olabildiğince hızlı bir şekilde tespit edilebilmesi amacıyla bir Drone Radyasyon Dedektörü tasarımı yapılmıştır. Ölçüm sisteminin bir drone tarafından taşınacağı göz önünde bulundurularak görece küçük ve hafif olan PIN diyot yapısına sahip yarı iletken bir dedektör tercih edilmiştir. Dedektörün ölçtüğü veriyi uzak sunucuya kablosuz olarak aktarabilmesi için farklı bir elektronik kullanılmış ve çalışması için gerekli olan yazılım tarafımda yazılmıştır. Ayrıca dedektöre ek olarak drone'un mesafesini belirli bir noktaya kadar ölçebilecek bir sensör de sisteme entegre edilmiştir. Ölçüm sistemi platformdan bağımsız, toplam ağırlığını taşıyabilen herhangi bir drone ile çalışabilecek bir şekilde hazırlanmıştır.

Radyasyondan korunmak için üç temel kural bulunmaktadır: mesafe, zaman ve zırhlama. Radyoaktif madde şüphesi bulunan bir bölgede ölçüm yapılması gerektiğinde kişilerin kaynak ile aralarındaki mesafenin olabildiğince uzun olması, radyasyona maruz kalma süresinin mümkün olduğu kadar az olması için bölgede olabildiğince hızlı hareket edilip az zaman geçirilmesi ve alınan radyasyonun etkilerinin en aza indirgenmesi için kurşun bir zırh giyilerek kişinin korunması sağlanmalıdır. Ancak bütün bu önlemler alınsa dahi yüksek dozlarda radyasyondan tamamen korunabilmek bir hayli zor olmakla birlikte hayati risklerle karşılaşılması mümkündür. Bu tez çalışmasında, özellikle bu gibi durumlarda radyoaktif madde tespiti yapacak görevlinin riske atılmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Uzaktan kontrol edilen Drone Radyasyon Dedektörü sayesinde radyoaktif maddeye istenildiği kadar yaklaşılabilmekte, kullanılan drone'un şarjına bağlı olarak bir insanın tehlikeli alanda durabileceğinden daha uzun sürelerde bölgede ölçümler alınabilmekte ve herhangi bir zırhlamaya ihtiyaç duyulmadan radyasyon ölçümleri yapılabilmektedir. Bu sayede radyasyondan korunmak için gereken üç temel kurala olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır.

Bu çalışmaya dair örnekler hali hazırda dünyada bulunmakla birlikte Türkiye'de, bu tez çalışmasının yayınlandığı tarih itibarıyla, herhangi benzeri bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın yapılmasına karar verildiğinde geçmişte gerçekleşmiş bazı acil durumlar dikkate alınmıştır.

1.1. ACİL DURUMLAR

1.1.1. İkitelli Radyasyon Kazası

Bu tez çalışmasında, göz önüne alınan acil durumlardan bir tanesi Türkiye’de kayıtlara geçen ilk radyoaktif kaza olan İkitelli radyasyon kazasıdır. Bu kazaya neden olan olay 1993 yılındaki büyük bir ihmalkarlığa dayanmaktadır ve bu ihmalkarlık 1999 yılında ciddi sonuçlara sebep olmuştur. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’nın (IAEA) kaza için oluşturmuş olduğu rapora göre [1] hastanelere kanser tedavisi için radyasyon kaynağı temin eden lisanslı bir şirket, hastaneler tarafından kullanıldığı gerekçesiyle toplamış olduğu 3 adet Kobalt-60 kaynağını ABD’ye geri göndermek istediğini bildirmiş ve TAEK’ten onay almak istemiştir. Kaynakların aktiviteleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu kaynaklar yazılan rapora göre metal taşıma ambalajlarının içindeki tahta sandıklara yerleştirilen değiştirme konteynerlerinde tutulmaktaydı.

Tablo 1: Aralık 1993’te paketlenen üç adet kullanılmış kobalt-60 kaynağının aktivitesi [1].

Kaynak	Yeniye Ken Gösterdiği Aktivite	Kullanılmış kaynakların aktivitesi	
		1 Aralık 1993’te	1 Ocak 1999’da
A	89,5 TBq (2418 Ci) 1 Aralık 1973’te	6,4 TBq (172 Ci)	3,3 TBq (88 Ci)
B	248 TBq (6700 Ci) 1 Mart 1981’de	46 TBq (1245 Ci)	23,5 TBq (636 Ci)
C	99,6 TBq (2691 Ci) 5 Mayıs 1987’de	41,8 TBq (1129 Ci)	21,3 TBq (557 Ci)

TAEK kısa sürede incelemelerini gerçekleştirmiş ve kaynakların yeniden ihracı için onay sertifikası çıkarmıştır. Fakat şirket TAEK’ten habersiz bir şekilde kaynaklardan iki tanesini ABD’ye göndermek yerine Ankara’dan İstanbul’da bulunan genel amaçla kullanılmış oldukları depolarına göndermiştir. Üçüncü kaynak ise Ankara’da kalmış ve kazadan sonra kaynağa TAEK tarafından el konulmuştur. İstanbul’daki depoya yüklenen kaynaklar bir süre sonra

yeterli alan bulunmaması nedeniyle herhangi bir güvenlik önlemi alınmadan İstanbul – Küçükçekmece’de bulunan sanayi bölgesindeki başka bir depoya taşınmıştır. Burada da herhangi bir denetime maruz kalmadan bir süre beklemiş ve sonra depo içindikilerle beraber satılarak el değıştirmiştir. Deponun yeni sahibi ihtiyacı olmayan malları elden çıkarmak için, içinde kaynakların bulunduğu konteynerleri hurda metal olarak iki kardeşe satmıştır. Konteynerlerin içinde ne olduğunu bilmeyen kardeşler tehlikeden habersiz bir şekilde konteynerleri kamyonu yükleyerek yaşadıkları yere götürmüşlerdir. Konteynerlerin bazı parçaları aile bireyleri tarafından sökülüştür. Kişilerden biri konteynerin içinde ne olduğunu anlamak için elini konteynerin içine sokmuştur. Konteynere müdahale etmeyen ancak olayı izleyen başka kişiler de bulunmaktadır. Rapora göre söküm işlemi durdurulmuş, konteyner yuvarlanarak başka bir yere taşınmış ve işlemlere başka bir gün devam edilmiştir. Olayı takip eden ikinci gün başka parçalar da sökülüş ve oksiasetlen metal kesici kullanılarak dış metal yüzey soyulmuş ve içerideki kurşun zırha kadar ulaşılmıştır. Bu işlemler sırasında konteynerlerden bir tanesinden kaynağın yere düşmüş olabileceği varsayılmaktadır. Çünkü daha sonra kaynaklardan yalnızca bir tanesine ulaşılmış diğeri ise hiçbir zaman bulunamamıştır. Sökme işlemi bırakıldıktan bir süre sonra işlemi gerçekleştiren kişilerde mide bulantısını takiben istifra şikayetleri görülmüştür. Daha sonra izleyenlerde de aynı şikayetler baş göstermiştir. Kurşun hariç konteynerlere ait parçalar daha sonra el ve kürek yardımıyla daha büyük bir hurda metal satıcısına götürülmüştür. Rahatsızlıklarından dolayı şikayetleri bulunan kişiler yerel sağlık kuruluşlarına gitmişler ve ilk etapta gıda zehirlenmesi tanısıyla ilaç verilip taburcu edilmişlerdir. Fakat daha sonra şikayetler çoğalmış, yakın temasa geçenlerden birinin iki parmağının ucunda kızarıklık meydana gelmiştir. İlerleyen zamanlarda kişilerdeki belirtiler artış göstermiş halsizlik, diş eti kanamaları, iştah ve kilo kaybı gibi tipik semptomlar görülmüştür. Yerel hastanelerde tanıları konulamayan ve tedavi olamayan hastalar daha büyük bir hastaneye gittikten sonra kurşun konteynerler ile yaptıkları çalışmaları doktorlarına anlatmışlardır. İlgilenen doktor, radyasyon tehlikesinden şüphelenmiş ve konuyu ÇNAEM yetkililerine bildirmiştir. Daha sonra ulusal yetkililer olayın gerçekleştiği yeri ziyaret etmiş ve yapılan ölçümler neticesinde yüksek doz hızı tespit edilmiştir. Riskli bölge boşaltılıp kuşatılmıştır. Olayın bu andan sonraki kısmı bu tez çalışmasının yapılmasını düşündüren önemli bir etkidir. Hurdalığıtaki kaynağı bulmak ve güvenli bir şekilde muhafazasını sağlamak yetkililerin tam iki gününü almıştır. İlk olarak kaynakların hurdalığıta yerde bulunan konteynerlerin sürgü tertibatlarında olduğu düşünölmüş ve kamyon arkasına kare şeklinde çelik

konteynerlerin içine kurşun kiremitler yerleştirilerek oluşturulan, tehlike durumlarında kullanılan zırhlı bir konteyner yüklenmiştir. Hazırlanan bu kamyon, üzerinde vinç bulunan başka bir kamyon ile sürgü tertibatının yakınına gitmiş ve sürgü tertibatı vinçli kamyon tarafından kaldırılıp diğer kamyonun içinde bulunan zırha koyulmuştur. Fakat bu işlemden sonra bölgede yapılan doz hızı ölçümleri sonrasında radyasyon seviyesinde herhangi bir azalma meydana gelmemiş ve yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Zırhlı konteynerden aldıkları ölçümler neticesinde sürgü tertibatında kaynak olmadığı anlaşılmıştır. Kaynağın alandaki bir hurda metal yığının altında olabileceğinden şüphelenilmiştir. Mekanik vinç yardımıyla hurda malzemeler yığından teker teker dikkatli bir şekilde kaldırılıp izlenmiş ve kaynağın kaldırılıp kaldırılmadığı kontrol edilmiştir. Ancak hurda metallerin kaldırılması aynı zamanda alandaki zırhlamanın da kaldırılması anlamına geldiğinden dolayı bu durum doz hızının artmasına yol açmıştır. Yetkililer bu durumda operasyonu durdurup bir sonraki gün devam etme kararı almışlardır. İkinci gün vincin ucuna silindir şeklinde kurşun zırhlı bir varil eklenmiştir. Uzun bir kılavuzun ucuna yüksek doz hızı algılayabilen bir radyasyon dedektör teli yerleştirilmiş ve kamyonun arkasına yüklenmiştir. Kılavuz operatörünü korumak için 50 cm kalınlığında beton blok duvarlar kullanılmıştır. İki kişilik on ekip hazırlanmış ve ekiplerde bulunan bir kişi yığın üzerinden uzun bir direk yardımıyla parça kaldırmış, diğeri de 2-3 metre uzunluğunda bir kürek yardımıyla şüpheli parçaları kamyondaki konteynerin içine koymuştur. Vinç yardımıyla konteyner kaldırılmış ve kaynak olup olmadığı incelenmiştir. Ekip sayısı on olduğundan dolayı en fazla on denemede kaynağın bulunması amaçlanmış ancak her bir ekip birer kere deneme yapmasına rağmen kaynak bulunamamıştır. Her denemede ekip üyeleri için 2 mSv, dönüşümlü çalışan vinç operatörleri için ise 1 mSv doz sınırı belirlenmiştir. Kaynak bulunamadığı için ekiplerin maruz kaldıkları dozlar incelenmiş ve ölçümler belirlenen doz sınırları içerisinde olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bir kere daha aynı işlemi tekrar etme kararı alınmıştır. İkinci tekrarın dördüncü denemesinde kaynak ekipler tarafından bulunmuş ve bölgede radyoaktif sızıntı tespit edilmemiştir. Fakat hurdalıkta ikinci kaynağa rastlanılmamıştır. Yapılan ölçümlere göre kaynağın doz hızı 3.3 TBq (88 Ci) olduğu kayıtlara geçmiştir. Operasyonda görevli tüm kişilerin üzerlerinde bulunan dozimetreler teker teker incelenmiş ve maruz kalınan dozlar hesaplanmıştır. Kaynağı bulan kişinin maruz kaldığı doz 0,6 mSv, en yüksek maruz kalınan doz 5,57 mSv ve bu seviyeden sonraki tespit edilen en yüksek doz ise 2,05 mSv olarak ölçülmüştür [1].

Bu olaydan yola çıkarak, ekiplerin radyasyon kaynağını bulmalarının ne kadar zor olduğu dönemin koşulları da hesaba katılarak görülmektedir. Ülkemizde, Mersin-Akkuyu'da yapılması planlanan nükleer güç santrali projesi olduğu da göz önünde bulundurulursa olası bir kaza ya da sızıntı durumunda bu tez çalışmasının ürünü olan Drone Radyasyon Dedektörünün kullanılması hızlı ve güvenli bir şekilde radyoaktif madde ve sızıntı tespiti yapılması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Çok daha önemlisi, İkitelli kazasında Drone Radyasyon Dedektörü kullanılmış olsaydı görevliler radyasyona maruz kalmayacaklardı.

1.1.2. Fukuşima Nükleer Santral Kazası

Dikkate alınmış bir diğer acil durum ise Japonya'nın Fukuşima Daiichi Nükleer Santrali'nde (FDNPS) 2011 yılında meydana gelen nükleer santral kazasıdır.

11 Mart 2011 tarihinde gerçekleşen 9,0 şiddetindeki Büyük Doğu Japonya Depremi büyük bir Tsunami oluşmasına neden olmuştur. Reaktörler deprem vurduğu anda otomatik olarak kapanmış ve acil durum jeneratörleri reaktörleri soğutmak için su pompalarını çalıştırmaya başlamıştır. Reaktörler 9,0 şiddetindeki depreme karşı ciddi bir hasar görmemiştir. Ancak, 5,7 metre yüksekliğe sahip bir tsunamiye dayanabilmesi için yapılmış dalgakıranların, tsunaminin boyutu 14 metreye ulaşmasından dolayı koruyucu bir etkisi olmamıştır. Elektrik şebekesi ile olan bağlantılar hasar almış ve jeneratörler de dahil tüm santral sular altında kalmış ve bunun sonucu olarak jeneratörler devre dışı kalmıştır. Soğuyamayan reaktörlerde bir süre sonra hidrojen patlamaları oluşmuş ve reaktör binalarının tepeleri havaya uçmuştur. Bazı reaktörlerde yangınlar meydana gelmiştir. Kullanılmış yakıt tanklarının su seviyelerindeki düşüş sonrasında yakıt tankları aşırı ısınmaya başlamıştır. Radyasyon sızıntısı şüphesinden dolayı 20 km çapındaki bölgede yaklaşık 200.000 kişi tahliye edilmiştir. Nükleer kazanın hemen ardından bir ölüm gerçekleşmemiştir. Patlamadan dolayı en az 16 işçi yaralanmış, onlarcası reaktörleri soğutup santrali stabil hale getirmeye çalışırken radyasyona maruz kalmıştır. Çalışan işçiler ise yüksek radyasyona maruz kalmıştır. 3 işçi ise hastaneye kaldırılmıştır. Bölgeye tsunamiden dolayı yardımlar geç ulaşmıştır. Japonya Nükleer Güvenlik Komisyonu (NSC) salınan radyoaktiviteyi 570 PBq olarak tahmin etmektedir. Japonya hükümeti kazadan bir süre sonra 20 km yarıçaplı bölgeyi girilmez alan olarak belirlemiştir [2].

Bu tarz bir kaza durumunda, sahada kullanılmak üzere geliştirilmiş bir Drone Radyasyon Dedektörü kullanılsaydı sızıntı bulan bölgenin tespit edilebileceği ve güvenli bölgelerin

oluşturulması sağlanabilecekti. Kazadan sonrası için de kaza noktası, çevresi ve bölgeye uzak, erişilmesi zor noktaların radyasyon haritaları Drone Radyasyon Dedektörü yardımıyla oluşturulup, riskli bölgeler belirlenebilecekti.

1.1.3. Çernobil Nükleer Santral Kazası

Bir diğer kaza örneği ise 26 Nisan 1986 tarihinde Ukrayna'nın Pripyat şehri yakınlarındaki Çernobil Nükleer Santrali'nin 4 numaralı reaktöründe gerçekleşen nükleer kazadır. Kaza sonucunda Çernobil 4 reaktörü yok olmuştur. Aldığı yaralar sonucunda bir kişi kaza anında, bir kişi de kaldırıldığı hastanede yaşamını yitirmiştir. Kazadan yalnızca 3 ay içerisinde 30 operatör ve itfaiyeci hayatını kaybetmiştir. Sonrasında da ölümler yaşanmaya devam etmiştir. Kazadan sonra 134 kişide akut radyasyon sendromu tespit edilmiş ve aralarından 28 kişi bu sebeple hayatını kaybetmiştir.

Kaza, bir tesiste meydana gelen rutin bir test sırasında meydana gelmiştir. Test, herhangi bir güç kaybı durumunda çekirdeğin soğutulmasının sağlanıp sağlanamayacağını belirleme amacıyla yapılmıştır. Bu test, testten sorumlu ekip ile tesisin güvenliğinden sorumlu personel arasında uygun bir bilgi alışverişi ve koordinasyon olmadan gerçekleştirilmiştir.

Reaktör test esnasında operatör tarafından kapatıldığında, kararsız durumdadır ve kontrol çubukları reaktöre girdiğinde bir güç artışı yaşanmıştır. Sıcak yakıt çubuklarının soğutucu su ile temas etmeleri aşırı buhar üretimi sonucu basıncın yükselmesine sebep olmuştur. Basıncın aşırı artması sonucunda reaktörün üst kapağı ayrılmış ve yakıt kanallarına zarar vermiştir. Aşırı buhar üretimi radyasyonun atmosfere salınmasına sebep olan buhar patlamasına neden olmuştur. Yaklaşık 2-3 saniye sonra ikinci bir patlama meydana gelmiş ve patlama yakıt kanallarının ve sıcak grafitin etrafa saçılmasına sebep olmuştur. Grafit ve yakıt parçalarının sebep olduğu yangınlar sonucu çevreye ciddi miktarda radyasyon salınmıştır. Çevreye salınan aktivite 14×10^{18} Bq olarak tahmin edilmektedir. Kaza, çevreye bir sivil operasyon için kaydedilen en büyük kontrolsüz radyoaktif salınımına neden olmuş ve yaklaşık 10 gün boyunca yüksek miktarda radyoaktif madde havaya salınmıştır. Kazada, çekirdeğinde 192 ton yakıt bulunan Çernobil 4 reaktöründen ksenon gazının tamamının, iyot ve sezyumun yaklaşık yarısının ve kalan radyoaktif maddelerin en az %5'inin salındığı tahmin edilmektedir. Bunların hafif olanları havaya karışmış ve rüzgar vasıtasıyla Ukrayna, Beyaz Rusya ve Rusya başta olmak üzere İskandinavya ve Avrupa'nın bir kısmına dağılmıştır. Tasfiye çalışmalarına

katılmış 200.000'e yakın görevli ortalama 100 mSv civarında yüksek dozda radyasyona maruz kalmıştır. Kazada alınan en yüksek dozlar ilk günde acil servis çalışanları ve saha personelleri tarafından alınmıştır. Hayatını kaybeden itfaiyecilerin aldıkları dozların 20.000 mGy'e kadar çıkmış olabileceği tahmin edilmektedir. 8.000-10.000 mGy seviyelerinin evrensel olarak kurtulma imkanının olmadığı ölümcül dozlar olarak kabul edilen seviyeler oldukları düşünüldüğünde, maruz kalınan dozun ne kadar büyük olduğu anlaşılabilir [3].

Çernobil felaketi şüphesiz dünya tarihindeki en büyük felaketlerden biridir. Bu gibi durumlarda can kaybı yaşanmama olasılığı düşük olsa da mümkün olduğu kadar aza indirmek için gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında oluşturulmuş olan Drone Radyasyon Dedektörü prototipi tam olarak bu gibi durumlar düşünülerek, kaza sonrasında insanların kaza bölgesine girmesini engellemek amacıyla hazırlanmıştır. Çernobil Nükleer Santrali Kazasına benzer bir durumda, Drone Radyasyon Dedektörü kullanılarak, saha personelinin fiziki olarak bölgeye girmesi önlenecek, sızıntıların hangi bölgelerde olduğunun ölçümü yapılabilecek, güvenli alanların hızlı bir şekilde oluşturulup radyasyonunun yayılma durumu anlık olarak güncellenebilecektir.

Yaşanmış bu üç örnekten görüldüğü üzere, Drone Radyasyon Dedektörünün insan sağlığını korumak adına ne kadar önemli olduğu ortaya konmuştur.

1.2. LİTERATÜR TARAMASI

Benzer bir çalışma 2017 yılında Yuki Sato tarafından 11 Mart 2011 tarihinde Sendai şehrinden 130 km uzaklıkta meydana gelen 9,0 büyüklüğündeki deprem ve onu takip eden tsunami sonucu Fukuşima Daiichi Nükleer Santrali'nde (FDNPS) yaşanan kaza düşünülerek hazırlanan, bölgedeki binaların içindeki radyoaktif kirliliği uzaktan ve hızlı bir şekilde ölçmek için hafif bir Compton kamera ve bir multikopter drone'dan oluşan uzaktan radyasyon görüntüleme sistemi geliştirilmiştir. Sistem, helikopterler kullanılarak yapılan geleneksel izleme metotları ile ölçülmesi zor olan dar alanlarda ayrıntılı radyasyon seviyelerinin ölçümü için tasarlanmıştır [4].

Shuangyue Zhang, İnsansız Hava Araçlarına (İHA) monte edilmiş algılama sistemleri tarafından elde edilen verilerin kontaminasyon haritalaması için bir algoritma geliştirilmesinin eksikliğinden yola çıkarak 2018 yılında üzerine radyasyon dedektörü monte edilmiş İHA

sistemine yayılma ve nokta radyasyon kontaminasyonunun haritalanması için gelişmiş bir istatistiksel yeniden yapılandırma algoritması uyguladıkları bir çalışma yayınlamıştır [5].

Mochizuki, 2017 yılında Fukushima Daiichi Nükleer Santrali'nde (FDNPS) yaşanan kaza sonrasında etrafa yayılan radyoaktif maddelerin büyük bir kısmının hala bilinmediği endişesiyle bir drone üzerine Compton kamera yerleştirerek bölgesel radyasyon haritalaması çıkarabileceği bir çalışma ortaya koymuştur [6].



2. GENEL KISIMLAR

2.1. KİMYASAL, BİYOLOJİK, RADYALOGİK VE NÜKLEER (KBRN) ACİL DURUMLAR

Kimyasal, biyolojik, radyolojik ve/veya nükleer (KBRN) acil durumlar, KBRN tehlikelerini içeren kazalar veya kasıtlı eylemlerdir. KBRN terimi yaygın olarak kullanılmaktadır, çünkü bu tehlikeler arasında belirgin benzerlikler vardır. Bu da bazı acil durumlara hazırlık ve müdahale önlemlerini hepsi için ortak veya çok benzer kılar.

Nükleer ve radyolojik tehlikeler, radyoaktif kaynaklardan gelen iyonlaştırıcı radyasyonla bağlantılıdır. Nükleer acil durumlar, nükleer zincir reaksiyonlarını içerir veya bu reaksiyonlardan ortaya çıkar. Bu tür zincirleme reaksiyonlar, nükleer santrallerde ve araştırma reaktörlerinde gerçekleşebilir. Radyolojik acil durumlar, tıbbi, endüstriyel veya araştırma uygulamalarında radyolojik cihazlarda kullanılan radyoaktif kaynakları içeren diğer tüm durumları kapsayabilir.

Tehlikeli kimyasalların çevreye salındığı durumlarda kimyasal acil durumlar meydana gelebilir. Kimyasal maddeler, doğal veya işlenmiş haldeki tüm kimyasal elementler, bileşikler ve bunların yan ürünleridir. Solunması, yutulması veya deriye maruz kalması, kimyasal maddeye, doz miktarına ve maruz kalma süresine bağlı olarak insan sağlığında hastalığa veya yaralanmaya neden olabilir. Standart terminoloji, toksik endüstriyel kimyasallar olarak tehlikeli olan endüstriyel kimyasalları ifade eder. Toksik endüstriyel maddeler ölüme, ciddi yaralanmalara, uzun dönemli sağlık sorunlarına neden olabilir, binalara, evlere ve eşyalara önemli ölçüde zarar verebilirler. Bu nedenle KBRN çatısı altında incelenir.

Biyolojik maddeler, bakterileri, virüsleri, mantarları ve parazitleri veya bunların parçalarını ya da ürettikleri ürünleri içerir. Yeterli miktarlarda ve belirli bir süre boyunca bu maddelerden herhangi birine maruz kalmak, hastalığa ya da insan sağlığında ciddi zararlara sebep olabilir.

KBRN acil durumlarının büyük çoğunluğu güvenlikle ilgili durumlar ile bağlantılıdır. KBRN acil durumları genellikle teknolojik acil durumlar kapsamına girer. Bu terim aynı zamanda, yukarıda bahsedilen kapsamların yanı sıra, baraj yırtılmaları, nakliye kazaları ve fabrika patlamaları gibi teknolojik ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan diğer acil durumları da içermektedir.

2.2. RADYASYON VE RAYOAKTİVİTE

Radyasyon enerjinin bir formudur. Bu enerji kısmen veya tamamen uygun bir ortamda biriktirilebilir ve böylece bir etki yaratabilir. Radyasyonun tespiti ve ölçümü, bir ortamdaki etkilerinin tespitine ve ölçümüne dayanır. Kararsız elementler herhangi bir dış etkiye maruz kalmadan kendiliğinden tanecikler veya elektromanyetik ışınlar yayarak kararlı hale geçmeye çalışırlar. Bu tür elementlere radyoaktif elementler denir.

Radyoaktivite; ilk defa 1896 yılında Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. 1898'de ise Pierre ve Marie Curie tarafından yapılan deneyler ile varlığı kanıtlanmıştır. Radyoaktif bir elementin saniyedeki bozunma sayısı aktivite olarak ifade edilir. Uluslararası Birim Sisteminde (SI) birimi, tam olarak saniyedeki bozunma sayısına eşit olan becquerel'dir (Bq). 1 Bq oldukça düşük bir radyoaktivite miktarıdır. Klasik sisteme göre aktivite birimi Curie (Ci) ile ifade edilir. 1 Ci $3,7 \times 10^{10}$ Bq değerine karşılık gelir.

Yayılan radyasyonun türü ve enerjisi, radyoaktif madde türü için karakteristiktir. İyonlaştırıcı radyasyon nötr atomların veya moleküllerin pozitif veya negatif elektrik yükü kazanmasına neden olur. En yaygın olarak bilinen iyonlaştırıcı radyasyon türleri alfa, beta, gama, x-ışını ve nötronlardır. Alfa veya beta gibi yüklü parçacık radyasyonlarının doğrudan iyonlaştırıcı etkileri vardır; oysa x-ışını, gama veya nötron gibi yüksüz radyasyonlar dolaylı bir iyonlaştırıcı etkiye sahiplerdir, yani bu radyasyonlar iyonlaştırıcı etkiye sahip yüklü parçacıklar üretirler [7].

2.3. RADYASYON ÖLÇÜ BİRİMLERİ

2.3.1. Işınlanma Düzeyi

Hava moleküllerinin gama ve X-ışınları tarafından iyonlaştırılmasının ölçüsü olarak tanımlanır. Klasik birimde Röntgen (R), SI sisteminde Coulomb/kg (C/kg) olarak gösterilir. 1 C/kg, 3876 R değerine karşılık gelir.

2.3.2. Soğurulan Doz

Bir nesne veya kişi tarafından emilen radyasyon miktarını tanımlar. SI birimi gray (Gy) klasik sistemdeki birimi rad'dır (Radiation Absorbed Dose). Bir gray 100 rad'a eşittir. Gray oldukça büyük birimdir bundan dolayı normal dozlar nanogray (nGy), microgray (μ Gy) ve miligray (mGy) ifadeleri ile tanımlanır.

2.3.3. Eşdeğer Doz

İnsan dokusundaki soğurulan dozun biyolojik etkilerini tanımlamak için eşdeğer doz kullanılır. SI birimi Sievert (Sv), klasik sistemdeki birimi rem'dir (Röntgen Equivalent Man). Gray gibi sievert de oldukça büyük bir birimdir ve normal dozları tanımlamak için nanosievert (nSv), microsievert (μ Sv) ve milisievert (mSv) birimleri kullanılır.

Farklı radyasyon türlerinden soğurulan enerjiler eşit olsa da biyolojik etkileri farklı olabilir. Bundan dolayı, farklı radyasyon türlerinin insan dokusu üzerindeki etkilerinin hesaplanabilmesi için kalite faktörü (Q) adında bir değer tanımlanmıştır. Eşdeğer doz hesaplanırken soğurulan doz kalite faktörü ile çarpılır.

Tablo 2: Çeşitli radyasyon türleri için kalite faktörleri [8].

Radyasyon Türü	Kalite Faktörü (Q)
X-ışını	1
Gama ışınları	1
Beta (β) ışınları	1
α ışınları	20
Elektronlar	1
Protonlar	2
Nötronlar	5-20

2.3.4. Etkin Doz

Bir insanın radyasyona maruz kaldığı durumlarda, zararlı etkiler radyasyonun vücudun hangi bölümler ile temas ettiğine göre değişiklik gösterir. Her organın radyasyona karşı duyarlılığı birbirinden farklıdır. Bunu hesaba katmak için Tablo 3'te görülen doku ağırlık faktörleri (W_T) belirlenmiştir. Etkin doz, bir dokuya eden eşdeğer doz ile o dokuya ait ağırlık faktörünün çarpılması sonu elde edilen sonuca denir. Birimi sieverttir (Sv). Birden fazla organ radyasyona

maruz kalırsa etkin doz radyasyona maruz kalan tüm organların etkin dozlarının toplamına eşittir.

Tablo 3: Doku ağırlık faktörleri. Diğer dokular (*): Adrenaller, ekstratorasik bölge, safra kesesi, kalp, böbrekler, lenf bezleri, kas, oral mukoza, pankreas, prostat, ince bağırsak, dalak, timus, rahim [9].

Doku	Doku Ağırlık Faktörü (W _T)	Doku Ağırlık Faktörleri Toplamı
Kemik iliği (kırmızı), kolon, akciğer, mide, meme, diğer dokular (*)	0,12	0,72
Gonadlar	0,08	0,08
Mesane, yemek borusu, karaciğer, tiroid	0,04	0,16
Kemik yüzeyi, beyin, tükürük bezleri, deri	0,01	0,04
	Toplam	1,00

2.4.RADYOAKTİF BOZUNMA TÜRLERİ

2.4.1. Alfa Bozunumu

Alfa bozunumu, bir çekirdeğin alfa parçacığı yayınlanması ile gerçekleşen bir nükleer bozunum sürecidir. Yapısal olarak helyum çekirdeği ile eşdeğer olan alfa parçacığı 2 proton ve 2 nötrondan oluşur. Alfa parçacıkları ağırlıklı olarak atom numarası 83'ten büyük olan radyonüklidlerin bozunum ürünü olarak yayınlanır [10]. Bozunum temel olarak denklem 1 ile gösterilebilir. Burada X ve X' ilk ve son çekirdeklerin kimyasal sembollerinin temsilidir. A, Z ve N sembolleri ise sırası ile kütle numarası, proton ve nötron sayılarını ifade eder.



Alfa bozunumu sonucu oluşan çekirdek eğer uyarılmış durumda ise yeni oluşan bu çekirdek kararlı seviyeye gitme isteği doğrultusunda 10-14 saniye sonra gama bozunumu ya da iç

dönüşüm (internal conversion) süreçlerini izler. İç dönüşüm, uyarılmış haldeki çekirdeğin uyarılma enerjisini atomun iç yörüngelerinde bulunan bir elektrona aktarması sonucu elektronun yörüngeden ayrılması ve X-ışını oluşması olayıdır. İç dönüşüm olayı bir sonraki başlıkta anlatılacak olan beta bozunumu ile birbirlerinden farklı süreçlerdir. Beta bozunumunda da elektron yayınlanmasına rağmen bu elektron kararsız halde bulunan çekirdeğin kendisinden kaynaklanır.

2.4.2. Beta Bozunumu

Beta (β) bozunumu, kararsız yapıdaki bir çekirdeğin kararlı seviyeye geçme isteği doğrultusunda, içindeki proton ve nötron zenginliğine bağlı olarak, bir nötronunu protona ya da bir protonunu nötrona direkt olarak dönüştürmesi sonucu birer adet elektron ve anti-nötrino ya da pozitron (anti-elektron) ve nötrino yayınlaması ile gerçekleşen olaydır. β bozunumu sonucunda anne ve ürün çekirdeklerinin kütle numaraları korunur. β^- , β^+ ve elektron yakalama olmak üzere üç çeşit beta bozunumu vardır. Denklem 2 ile gösterilen β^- bozunumunda kararlı seviyeye geçmek isteyen çekirdek içindeki bir nötron bir protona dönüşür ve bir adet elektron ile anti-nötrino ($\bar{\nu}$) yayınlanır.



Denklem 3 ile gösterilen β^+ bozunumunda ise çekirdek fazlalık olan bir protonunu kararlı seviyeye geçebilmek için bir nötrona dönüştürür ve bir pozitron ile nötrino yayınlanır.



Elektron yakalama olayında ise çekirdeğe yakın olan iç kabuklardan bir elektron çekirdek tarafından yutulur ve çekirdek içindeki bir proton bir nötrona dönüşür. Bu süreç sonucunda denklem 3'te de gösterildiği gibi bir nötrino meydana gelir.

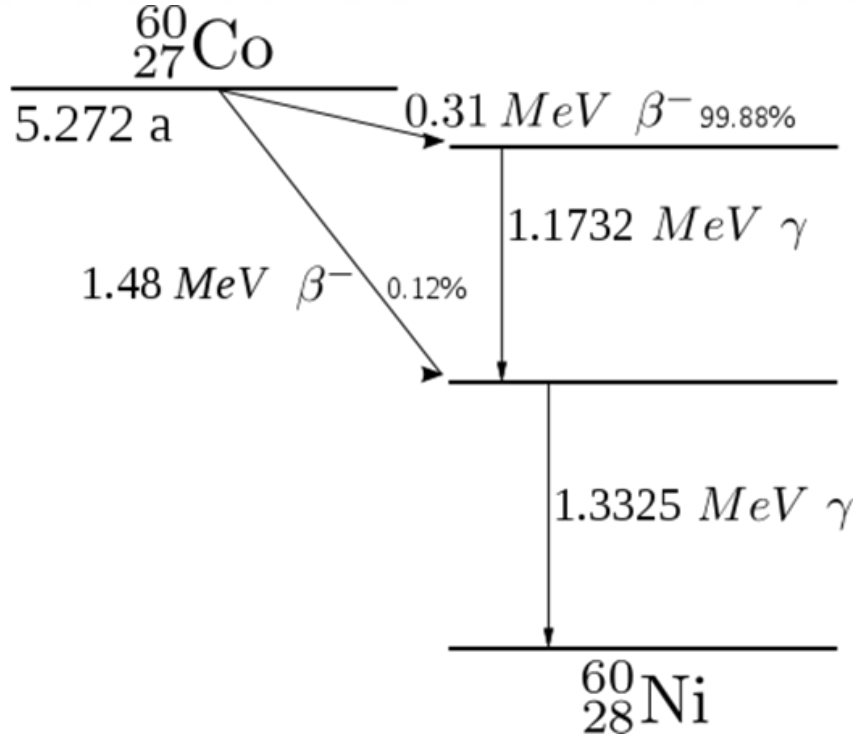


β bozunumları süreci sonrasında oluşan ürün çekirdeğin direkt olarak kararlı seviyeye geçişi söz konusu olabileceği gibi ürün çekirdeğin kararsız durumda da bulunabilme olasılığı vardır. Bu durumda β bozunumu sonrasında çekirdek γ bozunumu yaparak kararlı duruma geçiş sürecini devam ettirir.

2.4.3. Gama Bozunumu

Kararlı seviyeye geçmek için alfa veya beta bozunumu yapan çekirdekler genellikle temel seviyeye geçemeyip uyarılmış bir seviyede bulunurlar. Bu uyarılmış halde bulunan çekirdekler temel seviyelerine geçiş yapabilmek için uyarılma enerjilerini 10^{-9} saniye kadar kısa bir sürede foton formunda yayınlarlar. Yayınlanan bu fotonlar gama ışınları olarak adlandırılır ve γ sembolü ile ifade edilirler. Ancak bazı durumlarda, nükleer bir reaksiyon sonucu uyarılmış halde kalan bazı çekirdekler gama bozunumuna uğramadan önce uzun bir süre uyarılmış seviyede kalmaya devam ederler. Bu uzun ömürlü uyarılmış çekirdekler, izomer ya da yarı kararlı çekirdekler olarak adlandırılır.

Gama ışınları, beta parçacıklarından daha yüksek enerjilere sahiptirler ve 0,1-10 MeV enerji aralığında yayınlanırlar. Sahip oldukları enerjiler, çekirdeklerin enerji seviyeleri arasındaki fark kadar olduğundan dolayı, çekirdek için karakteristiklerdir. Alfa ve beta parçacıklarına göre daha girici olduklarından ötürü madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla olmakla birlikte iyonlaştırma etkileri ise çok daha azdır. Yüksüz olduklarından dolayı elektrik ve manyetik alandan etkilenmezler.



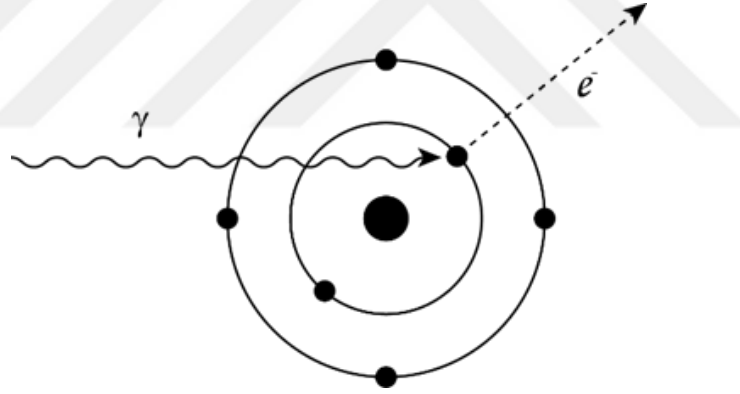
Şekil 1: Co-60 için beta bozunumunu takiben gerçekleşen gama bozunumu.

2.5. GAMA RADYASYONUNUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

Gama fotonları madde ile üç temel mekanizma çerçevesinde etkileşirler; fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu. Bütün bu süreçler gama fotonunun enerjisinin tamamını ya da bir kısmını elektrona aktarması ile gerçekleşir. Enerjisi aktarılan foton ya tamamen yok olur ya da belirli bir açıyla saçılır. Gama radyasyonu ölçümünde bu üç süreç önemli role sahiptirler [11].

2.5.1. Fotoelektrik Soğrulma

Fotoelektrik soğrulmada bir gama fotonu atomik bir elektron ile etkileşerek enerjisinin tamamını kaybeder ve yok olur. Gama fotonunun enerjisinin bir kısmı elektronu yörüngesinden koparır, enerjinin geri kalan kısmı ise elektrona, ortamda yol almasını sağlayacak kinetik enerji olarak aktarılır. Böylece, fotonun enerjisinin tamamı elektriksel sinyale dönüşmüş olur. Bundan dolayı, fotoelektrik soğurulma gama ışını ölçümü için büyük bir öneme sahiptir.



Şekil 2: Fotoelektrik soğurulma şematik gösterimi.

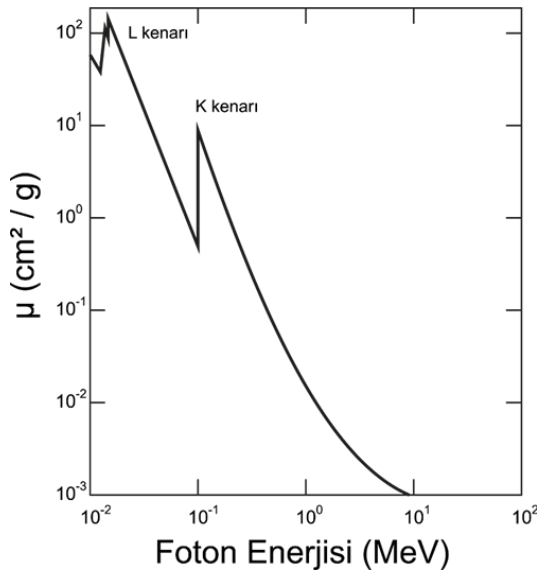
Fotoelektrik soğurulmanın olasılığı gama ışınının enerjisine, elektronun bağlanma enerjisine ve elektronun bağlı olduğu atomun atom numarasına bağlıdır. Olasılık, elektronun daha sıkı bağlı olduğu kabuklarda daha yüksektir. Eğer gama ışını enerjisi K-kabuğu elektronunun bağlanma enerjisi eşliğinden yüksek bir değere sahip olması durumunda K-kabuğu elektronlarının fotoelektrik soğurulmaya uğrama olasılıkları diğer elektronlara göre daha yüksektir (etkileşmelerin %80'den fazlası K-elektronlarını içerir). Denklem 4'te gösterildiği gibi, kaba bir yaklaşıklıkla, etkileşme kurşun ve uranyum gibi ağır atomlar ve düşük gamma enerjilerinde daha olasıdır.

$$\text{Fotoelektrik soğrulma katsayısı} \propto \frac{Z^4}{E^3} \quad (4)$$

Bu orantı, Z'nin üssü 4,0 ila 4,8 arasında değiştiğinden ötürü sadece bir yaklaşıktır. Gama ışını enerjisi azaldıkça, fotoelektrik soğurma olasılığı hızla artacaktır. Etkileşim tarafından serbest bırakılan fotoelektron E_e 'nin enerjisi, gama ışını enerjisi E_γ ile elektron bağlama enerjisi E_b arasındaki fark kadardır.

$$E_e = E_\gamma + E_b \quad (5)$$

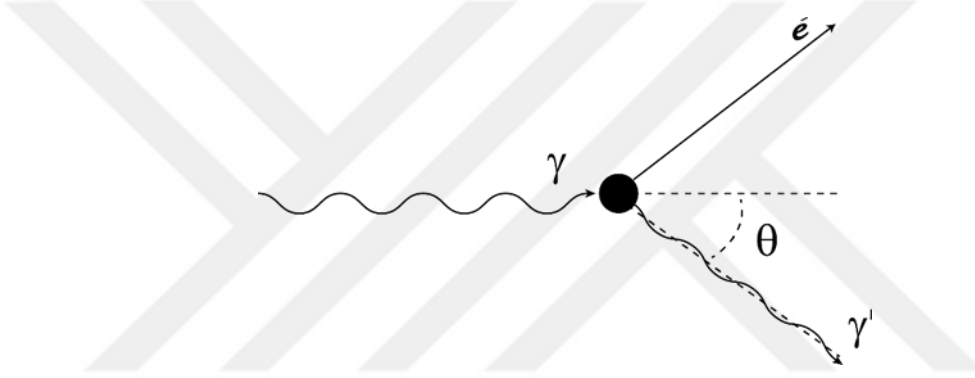
Şekil 3'teki süreksizlik noktaları, soğurulma kenarları (absorption edge) olarak adlandırılır. Bu noktalarda, gelen gama fotonunun enerjisi elektronun bağlı bulunduğu kabuktaki bağlanma enerjisine eşittir. Bu nedenle K kenarı, diğer kenarlara göre daha yüksek enerjili fotonlar tarafından oluşturulur. Etkileşim olasılığı, enerji düştükçe artan bir eğime sahiptir. Fakat enerji düşmeye devam ettikçe, gama ışını giderek K-kabuğu elektronu bağlanma enerjinden daha düşük bir enerji seviyesine gelir. Bu süreksiz nokta K-kenarı olarak adlandırılır. Bu noktanın altında gama ışını K-kabuğu elektronlarını koparmak için gereken enerjiye sahip olmayacaktır. K-kenarı altında etkileşim olasılığı L-kabuğu elektronları için artmaya devam eder. Bir süre sonra gama ışını L-kabuğu elektronlarını koparmak için gerekli olan enerjinin de altına düşer. Bu süreksizlik noktaları L_I , L_{II} , L_{III} kenarı olarak adlandırılır. Bu soğurulma kenarlarının varlığı X-ışını flüoresans analizleri için önemlidir [12].



Şekil 3: Kurşun için fotoelektrik soğurulma katsayısı.

2.5.2. Compton Saçılması

Compton saçılması, gama fotonunun, enerjisinin yalnızca bir kısmını serbest ya da zayıf bağlı bir elektrona aktarması sonucu bir açı ile saçılması olayıdır. Bu olayda gama fotonunun etkileşime girdiği elektron, atomun en dış kabuğunda bulunur ve bağlanma enerjisi çok düşüktür. Elektron, saçılma sonrası sahip olduğu kinetik enerjisi, gama ışını tarafından kaybedilen enerjinin ve elektron bağlama enerjisinin farkına eşit olan, serbest bir elektron haline gelir. Elektron, bağlanma enerjisi gama fotonu enerjisine kıyasla çok küçük olduğundan dolayı, saçılmaya uğradıktan sonra sahip olduğu kinetik enerji neredeyse gelen gama fotonu ile saçılan gama fotonu enerjilerinin farkına eşit olur.



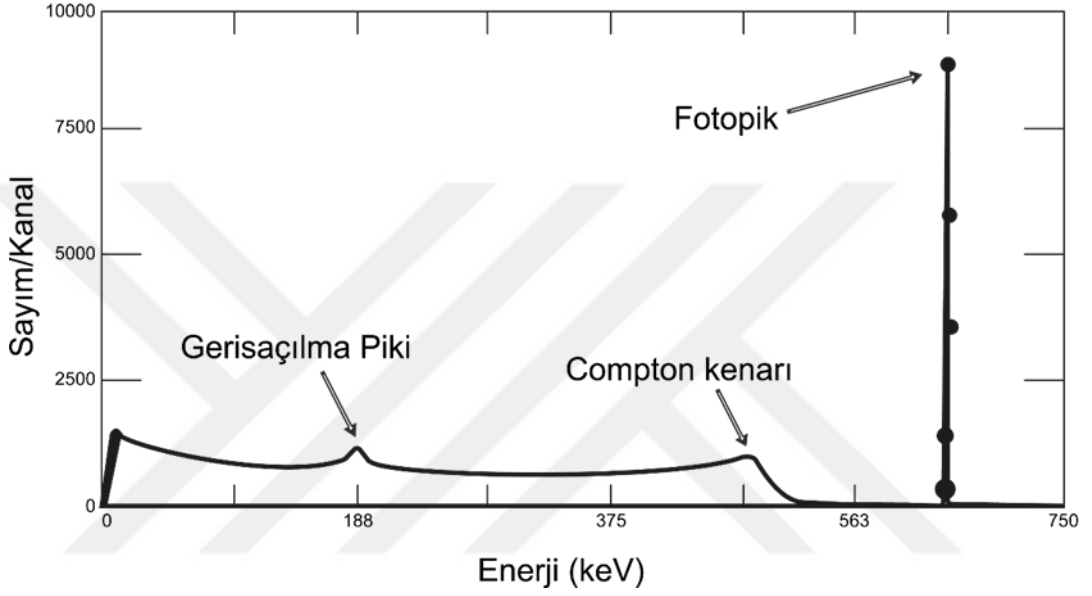
Şekil 4: Compton saçılması şematik gösterimi.

Saçılma açısı θ , gelen gama fotonu enerjisi $h\nu$, elektronun durgun kütle enerjisi m_0c^2 (0,511 MeV) olmak üzere, saçılan gama fotonunun enerjisi $h\nu'$, Compton saçılma formülü ile denklem 6 ile ifade edildiği gibi yazılır.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (6)$$

Elektronun ve gama fotonunun yönleri, saçılma esnasında gama fotonunun elektrona ne kadar enerji aktardığına bağlıdır. Denklem 6 ifadesinde saçılmaya uğrayan gama fotonu 180° ile gerçekleşen kafa-kafaya çarpışma için alabileceği en az değeri alır. Bir diğer ifade ile 180° ile yapılan saçılmada gama fotonu elektrona verebileceği maksimum enerjii aktarır. Tam tersi olarak, 0° 'ye çok yakın oluşan saçılmalarda ise gama fotonu elektrona çok az enerji aktardığından dolayı, saçılma öncesi ve sonrası gama fotonu enerjileri arasında çok belirsiz bir fark oluşur. Saçılan elektron ise gama fotonundan az miktarda enerji aldığı için, etkileşim ortamından kısa bir mesafe alarak uzaklaşır. Dedektör içerisinde bir Compton saçılması

gerçekleştğinde, saçılan elektron genellikle dedektör içerisinde durdurulur ve dedektör bir çıkış sinyali üretir. Bu çıkış sinyali, gelen gama fotonunun saçılmaya uğradıktan sonra kaybettiği enerji ile orantılıdır. Şekil 5'te ^{137}Cs için görülen 661 keV enerji değerinde sahip karakteristik pik, gama fotonunun enerjisinin tamamını fotoelektronlara aktarması ile gerçekleşir. Bu pik yalnızca fotoelektrik soğrulma ile oluşabileceği gibi Compton saçılmasını takiben gerçekleşen bir fotoelektrik soğrulma ile de oluşabilir.



Şekil 5: 661 keV enerji değerinde oluşan fotopik, geri saçılma piki ve Compton kenarı verilen ^{137}Cs standart kaynağı için yüksek çözünürlük spektrumu.

Foto pik (photo peak) enerjisinden daha düşük enerji seviyelerinde görülen spektrum, Compton saçılmasında gama fotonunun enerjisinin tamamının aksine yalnızca belli miktarını aktarması sonucu oluşur. Compton kenarı (Compton edge) olarak adlandırılan 470 keV enerji yakınından bulunan alan, 661 keV enerjili bir gama fotonunun tek bir Compton saçılması sonucu bir elektrona aktarabileceği maksimum enerjiye karşılık gelir. 188 keV enerjisindeki küçük pik ise geri saçılma piki (backscatter peak) olarak adlandırılır. 180° veya 180° 'ye yakın geniş açılarda gerçekleşen saçılmalar sonucu oluşur. Compton kenarı ve geri saçılma piki toplamı gelen fotonun enerjisine eşittir. Her iki durum da geniş açılı saçılmalar sonucu gerçekleşir.

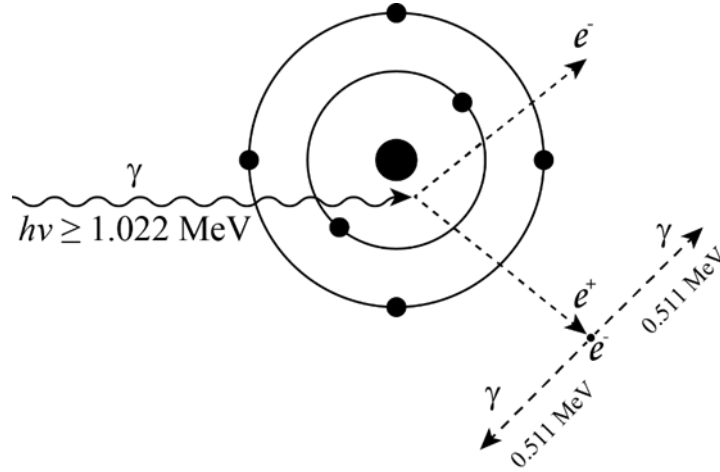
Compton saçılması, en düşük bağlanma enerjisine sahip elektronlar ile gerçekleştiğinden dolayı, etkileşme olasılığı, bir atomun bağlanma enerjisi düşük olan elektron sayısı, diğer bir

değişle hedef sayılabilecek elektron sayısı ile orantılı olarak azalır ve artar. Bundan dolayı atomun proton sayısına bağlıdır [11], [12].

2.5.3. Çift Oluşumu

En az 1,022 MeV enerjiye sahip bir gama ışını, bir çekirdeğin çevresindeki güçlü elektromanyetik alanın etkisi altında olduğunda bir elektron-pozitron çifti oluşturabilir. Gama ışını bu olay sonucunda yok olur. Elektron ve pozitronun durgun kütle enerjileri 0,511 MeV olduğundan dolayı, bu parçacıkların yaratılabilmesi için en az 2×0.511 MeV değerinde bir enerji gerekir. Etkileşimin gerçekleşebilmesi için gereken eşik enerjisinin 1,022 MeV değerinde olması bu nedendir. Gama ışını enerjisi bu eşik değerinin üzerinde ise enerji fazlalığı kinetik enerji olarak elektron ve pozitron arasında paylaşılır.

Çift oluşum ürünü olan elektron-pozitron çifti dedektör içinde hızla yavaşlatılır. Pozitron, kinetik enerjisini kaybettikten sonra ortamdaki bir elektronla etkileşmeye girer ve sonrasında enerjileri 0,511 MeV değerinde iki adet gama fotonu yayınlanır (annihilation process). Yayınlanan gama ışınlarına yok olma gama ışınları denir. Düşük enerjiye sahip bu gama ışınları dedektör tarafından yakalanabilir veya dedektör materyali ile etkileşime girmeden kaçabilirler.

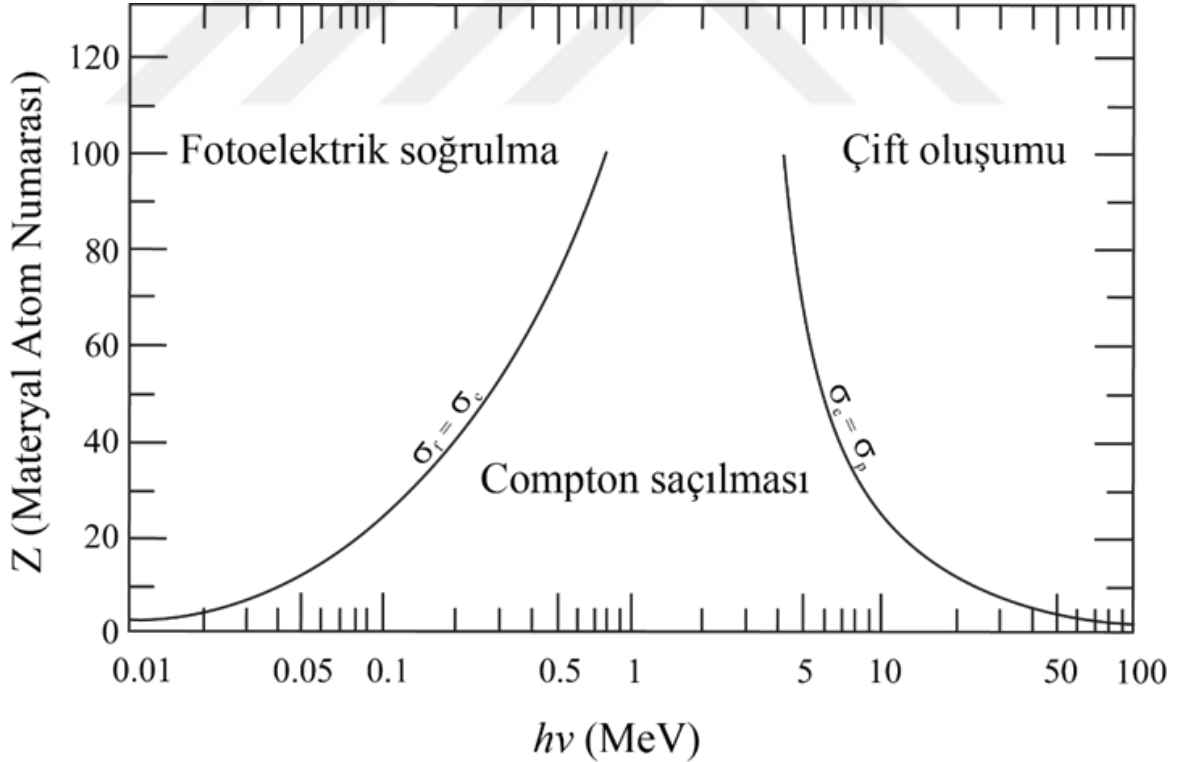


Şekil 6: Çift oluşumu ve ardından gerçekleşen, pozitronun ortamdaki bir elektron ile etkileşimi sonucu 2 adet 0,511 MeV değerinde gama fotonu yayınlanması olaylarının şematik gösterimi.

Etkileşim genellikle spektrumda birbirinden farklı üç enerji piki oluşturur. Yok olma fotonlarının her biri dedektör tarafından soğrulabileceği gibi, içlerinden biri dedektörden kaçabilir. Eğer yok olma fotonlarının ikisi de dedektör tarafından soğrulursa, etkileşme, tam

enerji pikine (full-energy peak) katkıda bulunur. Eğer yok olma fotonlarından biri dedektörden kaçmış biri soğurulmuş ise, etkileşim, tam enerji pikinin 0,511 MeV altında bulunan tek-kaçış pikine (single-escape peak) katkıda bulunur. Yok olma fotonlarının her birinin dedektörden kaçtığı durumda ise, etkileşim, tam enerji pikinin 1,022 MeV altında bulunan çift-kaçış pikine (double-escape peak) katkıda bulunur [12].

1,022 MeV enerji değerinin altındaki gama fotonları için çift oluşumu olasılığı bulunmaz. Bu eşik enerjinin üzerinde bir enerjiye sahip gama fotonları için, etkileşme olasılığı enerji seviyesi ile orantılı olarak artar. Şekil 7’de farklı malzemeler ve gama ışını enerjileri için verilen grafikte, fotoelektrik soğrulma, Compton saçılması ve çift oluşumun her birinin baskın olduğu üç enerji bölgesi vardır. Soldaki çizgi, fotoelektrik soğrulma ve Compton saçılması olaylarının gerçekleşme olasılıklarının eşit olduğu enerjileri; sağdaki çizgi ise Compton saçılması ve çift oluşumu olaylarının gerçekleşme olasılıklarının eşit olduğu enerjileri temsil eder [11].

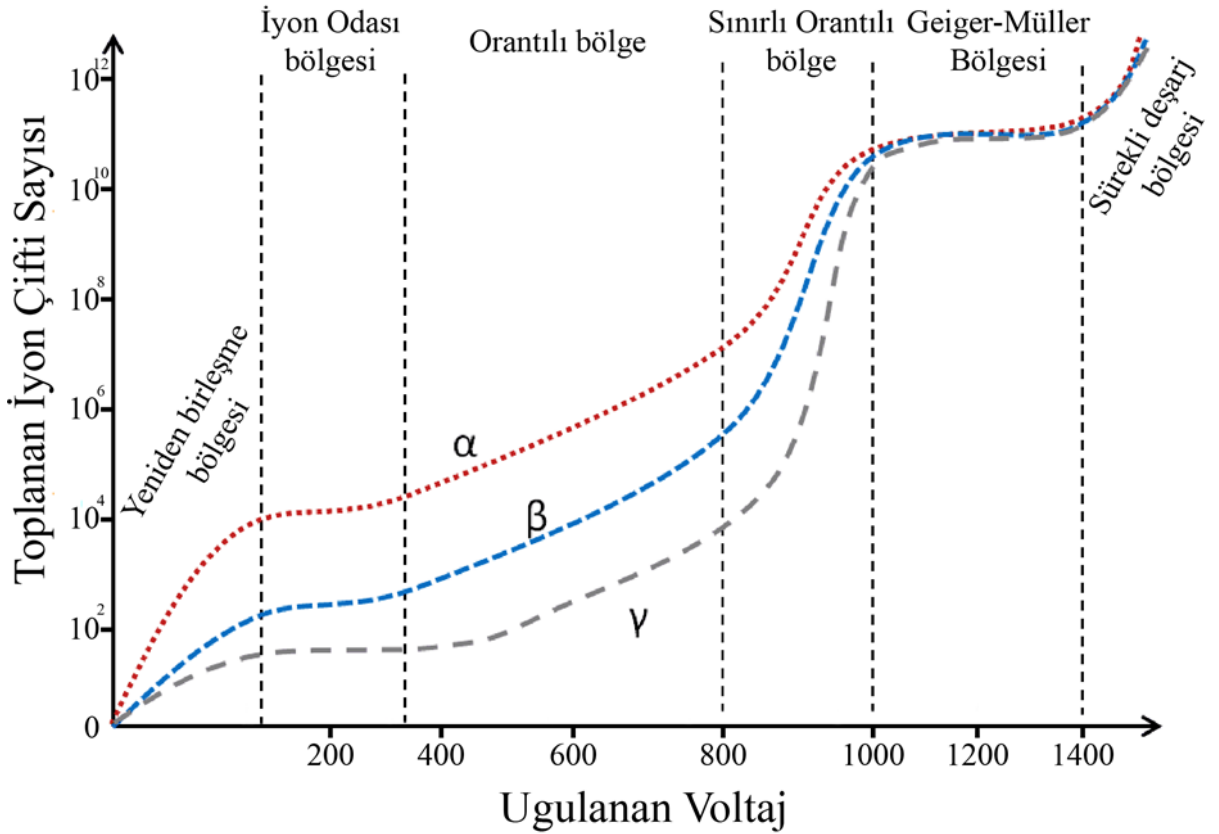


Şekil 7: Gama fotonu ile madde arasında gerçekleşen üç temel etkileşim. σ_f , σ_c , σ_p sırası ile fotoelektrik soğrulma, Compton saçılması ve çift oluşumu tesir kesitleri.

2.6. RADYASYON DEDEKTÖRLERİ

2.6.1. Gazlı Sayaçlar

Gazlı sayaçlar radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon akımını ölçerler. Silindirik bir kap içerisinde bulunan yüksek basınçtaki gaz (genellikle hava, helyum, argon) anot ve katot olarak bilinen iki elektrot arasına sıkıştırılır ve elektrotlar arasında bir elektrik alan oluşur. İyonize radyasyon dedektör içerisindeki gaz molekülleri ile etkileşerek gazı iyonlarına ayırır ve iyon çiftleri oluşur. Pozitif iyonlar katoda, negatif iyonlar anoda geçiş yapar. Böylelikle iki zıt kutup arasında bir iyonizasyon akımı meydana gelir. Oluşan bu akımın şiddeti gelen radyasyonun şiddeti ile orantılıdır. Gazlı sayaçlar, uygulanan gerilim farkına göre, iyon odaları, orantılı sayaçlar ve Geiger-Müller sayaçları olarak üçe ayrılırlar. Şekil 8, gazlı sayaçların farklı voltajlarda çalışma bölgelerini göstermektedir.



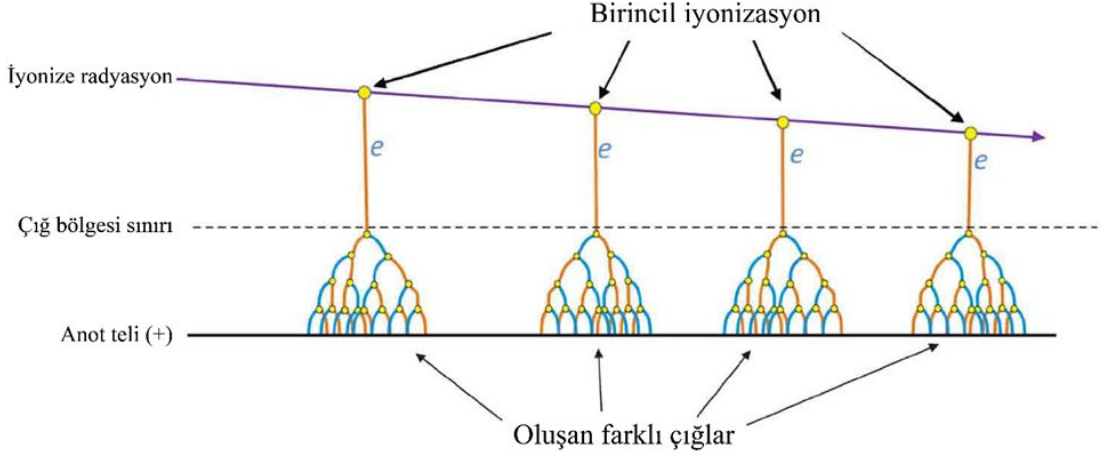
Şekil 8: Gazlı sayaçların çalışma bölgeleri.

Yeniden birleşme (recombination) bölgesi, anot ve katot arasındaki potansiyel farkın tüm iyon çiftlerini toplamak için yeterli olmadığı kısımdır. Düşük voltaj nedeniyle, elektrik alan elektronları ve iyonları hızlandıracak kadar büyük değildir. Elektronların ve iyonların büyük bir kısmı üretildikten kısa bir süre sonra yeniden birleşebilir ve sadece küçük bir kısmı ilgili elektrotlara ulaşır. Bununla birlikte, dedektör voltajı arttıkça, üretilen iyonların giderek artan bir kısmı elektrotlara ulaşacaktır. Bu artış “doygunluk” voltajına ulaşılan kadar devam eder. Dedektörler bu bölgede çalıştırılmamaktadır, çünkü ne yeniden birleşmelerin sayısı ne de başlangıçta üretilen iyon çiftlerinin sayısı doğru bir şekilde belirlenememektedir.

İyonizasyon bölgesinde, voltajdaki bir artış, toplanan iyon çiftlerinin sayısında önemli bir artışa neden olmaz. Elektrotlar tarafından toplanan iyon çiftlerinin sayısı, radyasyon tarafından üretilen iyon çiftlerinin sayısına eşittir ve radyasyonun türüne ve enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, bu bölgede eğri düzdür. Voltaj, ayrılmış iyon çiftlerinin yeniden birleşebileceği noktadan daha yüksek olmalıdır. Öte yandan, voltaj gaz amplifikasyonu (ikincil iyonizasyon) üretmek için yeterince yüksek değildir. İyonizasyon bölgesindeki dedektörler, gaz çoğalmasının olmayacak şekilde seçilen düşük bir elektrik alan gücünde çalışır. Akımları uygulanan voltajdan bağımsızdır ve yüksek enerjilerde Geiger-Müller tüpünün doğruluğunu etkileyen bir faktör olan “ölü zaman” olmadığı için yüksek enerjili radyasyonların ölçümü için tercih edilirler.

Orantılı bölgede, toplanan yük, dedektör voltajında daha fazla bir artışla artarken, birincil iyon çiftlerinin sayısı değişmeden kalır. Gerilimi artırmak, birincil elektronlara ortamın ek atomlarını iyonize edebilmeleri için yeterli hızlanma ve enerji sağlar. Oluşan bu ikincil iyonlar hızlandırılarak, tek bir büyük elektrik pulsu oluşturan Townsend çığları olarak bilinen bir etkiye neden olur. Her bir birincil olay için çok sayıda ikincil iyon (yaklaşık 103-105) olmasına rağmen, her zaman ikincil iyonların sayısı birincil olayların sayısı ile orantılı olacak şekilde çalıştırılır. Bu orantılılık, birincil iyonizasyon, yakalanan radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olduğu için, çok önemlidir. Toplanan iyon çiftlerinin sayısı, birincil iyonizasyon tarafından üretilen iyon çiftlerinin sayısına bölünerek gaz amplifikasyon faktörü elde edilir. Bu bölgede meydana gelen gaz amplifikasyonu, toplam iyonizasyon miktarını ölçülebilir bir değere yükseltebilir. Sinyal amplifikasyonu işlemi, dedektörün sinyal-gürültü oranını büyük ölçüde geliştirir ve daha sonraki elektronik amplifikasyonu azaltır. Dedektör orantılı bölgede çalıştırıldığında, voltaj sabit tutulmalıdır. Voltaj sabit kalırsa, gaz amplifikasyon faktörü de

değişmez. Orantılı sayaçlar düşük radyasyon seviyelerine karşı çok duyarlıdır. Ayrıca, radyasyon türü tanımlama ve enerji ayırımı yapma (spektroskopi) özelliklerine sahiptirler. Birincil iyonizasyonda önemli ölçüde farklılık gösterdiğinden, farklı radyasyon enerjileri ve türleri, puls yüksekliğinin analiz edilmesiyle ayırt edilebilirler.

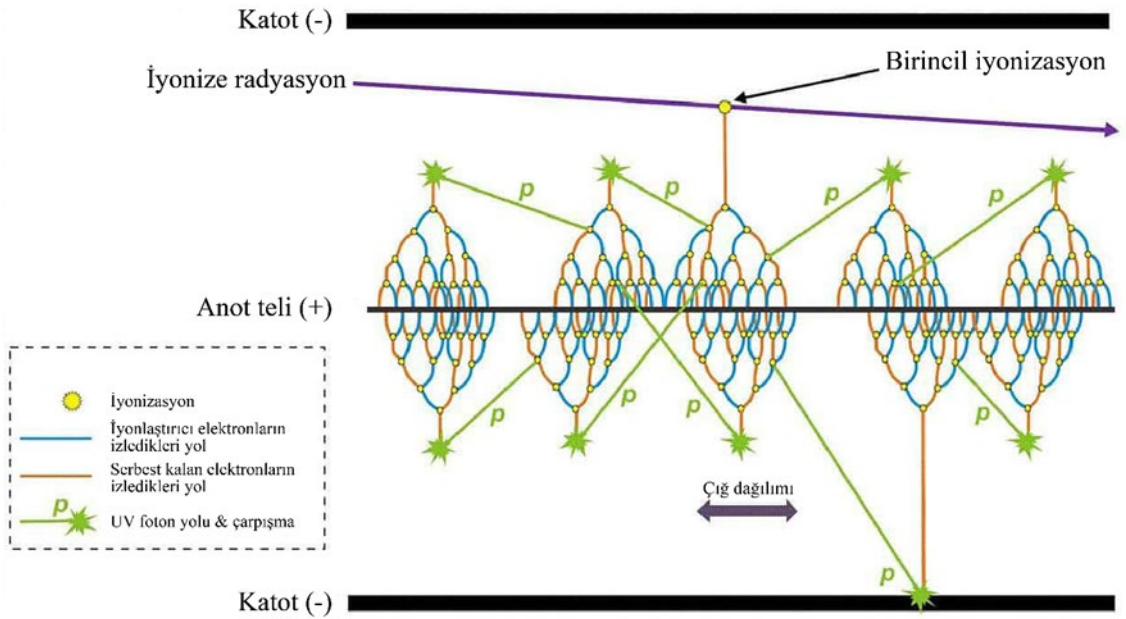


Şekil 9: Orantılı sayaçlarda çığ oluşumu.

Sınırlı orantılı bölgede, gaz amplifikasyon faktörü voltajla orantılı olarak artmaya devam etmez. Ek iyonizasyonlar ve doğrusal olmayan etkiler, uygulanan voltajda çıkış sinyalinin biriken enerjiyle orantılı olmamasına neden olur. Bölmedeki elektrik alan, yüksek pozitif iyon konsantrasyonu nedeniyle bozulmuştur. Serbest elektronlar, pozitif iyonlardan çok daha hafif olduklarından pozitif iyonların katoda çekilmesinden çok daha hızlı anoda çekilirler. Sonuç olarak elektrot yakınındaki pozitif iyon bulutu gaz çoğalmasında bozulmalara yol açar. Bu bölgeden genellikle bir ölçüm bölgesi olarak kaçınılır.

Geiger-Müller bölgesinde, voltaj ve dolayısıyla elektrik alan yüksek değerlere sahip olduğu için ikincil çığlar meydana gelebilir. Bu çığlar, orijinal çığda uyarılan atomlar tarafından yayılan fotonlar tarafından tetiklenebilir ve yayılabilir. Bu fotonlar elektrik alandan etkilenmediğinden, birincil çığdan daha fazla etkileşime girebilirler, tüm Geiger tüpü sürece katılır. Birincil iyonizasyondan ve tespit edilen fotonun enerjisinden bağımsız olarak şekil ve yüksekliğe sahip bu çığlar tarafından güçlü bir sinyal (amplifikasyon faktörü yaklaşık 10^{10} 'a ulaşabilir) üretilir. Geiger-Müller bölgesinde çalıştırılan dedektörler, gama ışınlarını ve ayrıca dedektöre girebilen her türlü yüklü parçacığı tespit edebilirler. Bu cihazların ana avantajı, genellikle herhangi bir sinyal amplifikatörüne ihtiyaç olmamasıdır. Herhangi bir iyonizasyonun neden olduğu büyük

çığ nedeniyle, bir Geiger sayacının ardışık pulslar arasında iyileşmesi uzun zaman alır (yaklaşık 1 ms). Bu nedenle Geiger sayaçları, tütün “ölü zamanı” nedeniyle yüksek radyasyon oranlarını ölçemez. Ölü zaman, sistemin başka bir olayı kaydedemediği her olaydan sonraki süredir. Pozitif iyonlar çığ bölgesinden uzağa hareket etmediğinden, pozitif yüklü bir iyon bulutu elektrik alanı bozar ve çığ sürecini sonlandırır. Uygulamada çığın sona ermesi “söndürme” teknikleri kullanılarak geliştirilmektedir. Orantılı sayaçların aksine, radyasyonun türü ve enerjisi Geiger sayaçları tarafından ayırt edilemez, çünkü çıkış sinyali orijinal iyonizasyon miktarından ve türünden bağımsızdır.



Şekil 10: Geiger-Müller tüpü içindeki çığ dağılımı.

Daha yüksek voltajlarda (Geiger-Müller bölgesinin üzerinde), elektrik alanı ortamın sürekli bir deşarjını meydana getirir. Oda artık herhangi bir iyon iyonizasyonuna karşı duyarlı değildir. Bu bölge iyonlaştırıcı radyasyonun tespiti veya ölçümü için kullanılmaz. Geiger tüp voltajı platonun bittiği noktanın üzerine çıkarılırsa, sayım hızı, tütün radyasyon tespit edemediği sürekli deşarjın başlangıcına kadar hızlı bir şekilde artmaya başlar ve hasar görebilir [13].

2.6.2. Sintilatör Dedektörler

Gazlı sayaçların dezavantajlarından biri, birçok radyasyon türü için düşük verimli olmalarıdır. Bu nedenle 1950’lerde yüksek verimlilikte, makul çözünürlük ve boyutlarda nükleer spektroskopi cihazlarına duyulan ihtiyaçtan dolayı sintilasyon dedektörleri geliştirilmiştir [14].

Sintilatörler, yüklü bir parçacığın veya bir fotonun geçişini takiben, elektromanyetik dalga spektrumunun görünür bölgesinde, saptanabilir fotonlar üretebilen malzemelerdir. Şeffaf bir kristalden (genellikle fosfor, plastik veya organik sıvı) oluşurlar. İyonize radyasyon ile etkileşime girdiklerinde floresans yani sintilasyon olayı gerçekleşir [13].

Floresans işlemi, bir maddenin uyarılması sonrasında maddeden görünür dalga boyunda foton yayınlanmasıdır. Fosforesans ise floresanstan daha uzun dalga boyuna sahip bir ışığın yayınlanması olayıdır. Floresansa göre genellikle çok daha yavaş gerçekleşir. Gecikmeli floresans, hızlı floresans ile aynı emisyon spektrumuyla sonuçlanır, ancak uyarılma sonrasında çok daha uzun bir yayınım süresine sahiptir. İyi bir sintilatör, fosforesans ve gecikmiş floresanstan kaynaklı istenmeyen katkıları en aza indirirken, radyasyon enerjisinin mümkün olduğunca büyük bir kısmını floresansa dönüştürebilmelidir [11].

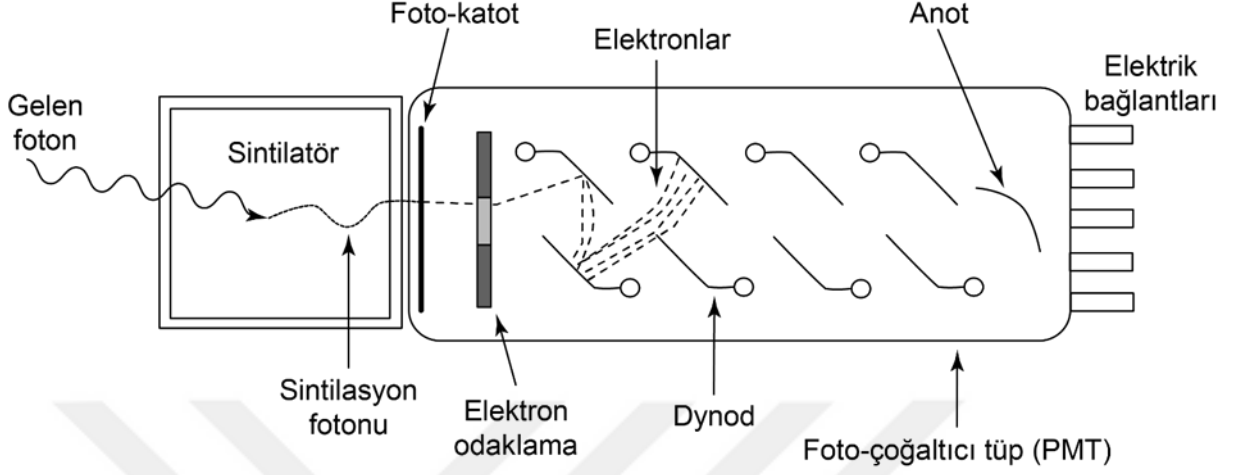
Amaçlanan uygulamaya göre sintilatör seçimi önemlidir. Farklı sintilatör malzemelerinin farklı özelliklere sahip olmaları, belirli bir sintilatörün seçimini her zaman bir uzlaşma yolu ile sağlanmasını gerektirmiştir. En yaygın olarak kullanılan sintilatörler arasında inorganik alkali halojenür kristalleri ve organik bazlı sıvılar ve plastikler bulunur. En yaygın kullanılanı sodyum iyodür (NaI) olan inorganik sintilatörler en iyi ışık çıkışına ve doğrusalığa sahip olmalarına karşın, birkaç istisna dışında tepki sürelerinde nispeten yavaşlardır. Organik sintilatörler genellikle daha hızlı ancak daha az ışık verirler. Yüksek yoğunluğa ve yüksek Z değerli bileşenlere sahip inorganik kristaller gama ışını spektroskopisi için tercih edilirlerken, organik kristaller genellikle beta spektroskopisi ve içerdikleri hidrojen nedeniyle hızlı nötron tespiti için tercih edilirler [11].

2.6.2.1. Foto-Çoğaltıcı Tüp

Foto-çoğaltıcı tüpler (photomultiplier tube - PMT) birkaç yüz fotondan oluşan çok zayıf ışık sinyallerini kullanılabilir akımlara çevirirler. Sintilasyon dedektörlerinin yaygın olarak kullanılmasındaki en büyük etkenlerden biri bu özelliğinden dolayı foto-çoğaltıcı tüplerdir.

Şekil 11’de foto-çoğaltıcı tüpün şematik olarak gösterimi verilmiştir. Foto-çoğaltıcı tüpler dışı genellikle cam olan bir katmana sahiptirler ve bu katman tüp içerisinde gerekli olan vakum durumunu korumak için basınç sınırı olarak işlev görür. Bu sayede düşük enerjili elektronlar elektrik alanı ile verimli şekilde hızlandırılabilirler. Tüpün içerisi, fotona duyarlı bir katman olan foto-katot (photocathode), aynı şekilde fotona duyarlı bir yapıya sahip elektron çoğaltma

(daha yaygın adıyla dynod dizisi) ve son olarak elektronların toplandığı anot bölümlerinden oluşur.



Şekil 11: Foto-çoğaltıcı tüp şematik gösterimi.

Çalışma sırasında katot-dynod-anot yapısının uzunluğu boyunca bu yapıya potansiyel bir “merdiven” şeklinde yüksek voltaj uygulanır. Gelen foton (örneğin bir sintilatörden) foto-katot üzerine düştüğünde fotoelektrik olay yoluyla bir elektron yayınlanır. Uygulanan voltaj sayesinde bu elektron birinci dynoda doğru yönelir ve hızlanır. Elektron birinci dynoda çarptığında enerjisinin bir kısmını aktarır ve ikincil bir elektron yayınlanır. Bu işlem sırayla daha fazla elektronun yayınlanmasını ve hızlandırılmasını sağlayacak şekilde bir sonraki dynodu takiben gerçekleşir. Bu şekilde dynod dizisinin sonuna doğru bir elektron şalesi oluşturulmuş olur. Bu elektron şalesi yükseltilebilir ve analiz edilebilir bir akım elde edebilmek için anotta toplanır.

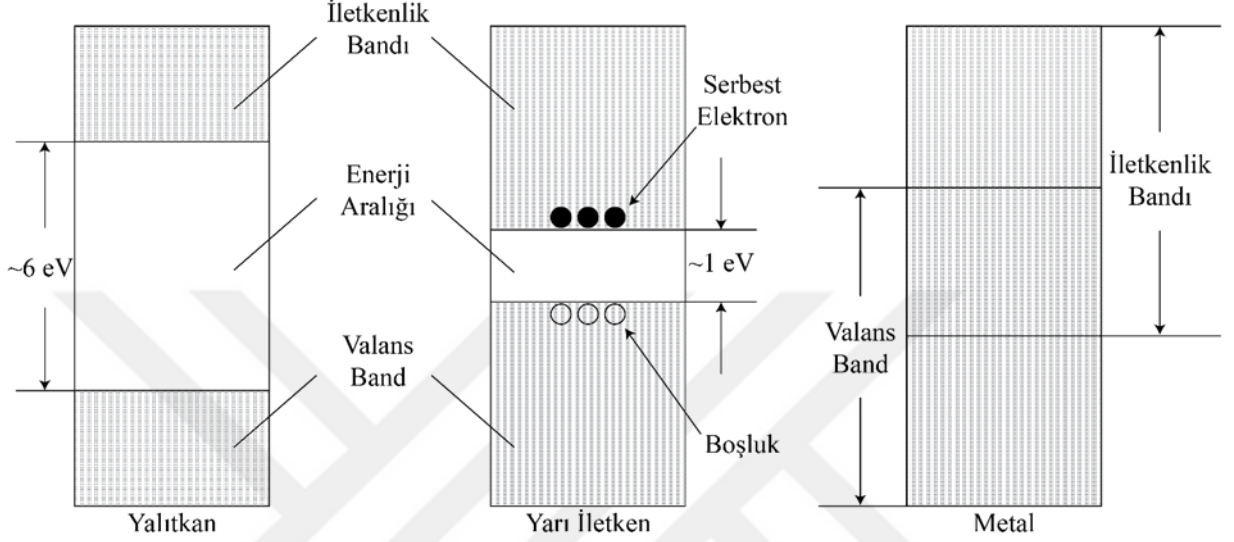
Foto-çoğaltıcılar sabit bir aydınlatma altında sürekli modda ya da sintilasyon sayımı durumundaki gibi puls modunda çalıştırılabilirler. İki durumda da katot ve dynod sistemlerinin lineer oldukları varsayılırsa, foto-çoğaltıcının çıkışından alınan sinyal gelen foton sayısı ile direkt olarak orantılı olacaktır. Bu sayede foto-çoğaltıcı tüpe sintilatör bağlanmış bir sistemde parçacığın varlığına dair bilginin dışında sintilatör içinde bıraktığı enerji bilgisi de elde edilebilir [15].

2.6.3. Yarı İletken Dedektörler

Yarı iletkenler genel olarak, kimyasal yapıya, sıcaklığa, aydınlığa ve katkı maddelerinin varlıklarına bağlı olarak iletkenliklerini kontrol edebilme kabiliyetine sahip inorganik veya organik malzemelerdir. Adından da anlaşılacağı üzere yarı iletken kristal temelli dedektörlerdir. Elektrik iletkenlikleri bakır, altın vb. gibi metaller ile cam gibi yalıtkanlar arasındadır. Bazı kaynaklarda katı hal dedektörü ismi de kullanılmaktadır. 4 eV'tan daha düşük bir bant aralığına sahiplerdir (~1 eV). En yaygın kullanımı olan kristalleri silikon ve germanyumdur. Bu cihazlar enerji ölçümünde yüksek çözünürlük özellikli ilk dedektörlerdir. Gama spektroskopisi ve yüklü parçacık dedeksiyonu yapmak için nükleer fizik alanına kolayca uyum sağlamışlardır. Son yıllarda, yüksek çözünürlükte parçacık iz dedeksiyonu yapabilmek için yüksek enerji fiziğinde de kullanımı yaygınlaşmıştır.

Çalışma prensipleri gazlı sayaçlar ile temel olarak benzerlik gösterir. Gazlı sayaçlardakinin aksine ortam gaz değil, yarı iletken katı bir materyaldir. İyonize radyasyon dedektörün hassas hacmi içerisine girer ve yarı iletken malzeme ile etkileşir. Detektörden geçen parçacık, yarı iletken atomlarını iyonize eder ve bu etkileşimin sonucu olarak elektron-boşluk çiftleri oluşur. Elektron-boşluk çiftlerinin sayısı, yarı iletken gelen radyasyonun enerjisiyle orantılıdır. Sonuç olarak, valans bandından iletkenlik bandına bir dizi elektron akışı gerçekleşir ve valans bandında eşit sayıda boşluklar oluşur. Elektrik alanın etkisi altında, elektronlar ve boşluklar elektrotlara doğru ilerlerler ve oluşan akım yarı iletkeneye bağlı olan elektronik devrede ölçülebilir bir puls oluşturur. Bu puls, gelen radyasyonun enerjisi hakkında bilgi sağlar. Birim zamandaki bu pulsların sayısı, radyasyonun yoğunluğu hakkında da bilgi verir. Yarı iletken dedektörlerin avantajı elektron-boşluk çiftleri oluşturmak için ihtiyaç duyulan ortalama enerjinin, gazlı sayaçlarda elektron-iyon çifti oluşturmak için gereken ortalama enerjiden yaklaşık 10 kat daha düşük olmasıdır. Böylelikle belirli bir enerji için üretilen iyonizasyon miktarı yüksek enerji çözünürlüğündeki dedektörde daha büyük mertebeli sonuçlar verir. Dahası, yüksek yoğunluklarından dolayı, gazlı sayaçlara kıyasla daha büyük durdurma gücüne sahiplerdir. Yanıt süreleri çok hızlıdır ve kompakt boyutlara sahiplerdir. Fakat silikon dışındaki yarı iletken dedektörlerin çalıştırılabilmesi için düşük sıcaklıklı bir ortam gerektiğinden dolayı çalıştırılmadan önce sıcaklığı düşürmek için soğutma işlemine tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu da dedektörün tepesine eklenecek kriyojenik bir sisteme ihtiyaç duyulması anlamına gelir.

Yarı iletkenler, dış kabuk atomik seviyeleri enerji-bant yapısına sahip kristalin malzemelerdir. Şekil 12’de valans band, iletkenlik bandı ve yasak enerji aralığından oluşan temel yapı şematik olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda, karşılaştırılabilmesi açısından, iletken ve yalıtkanların bant yapıları da verilmiştir.



Şekil 12: Yalıtkan, yarı iletken ve metaller için enerji band yapısı.

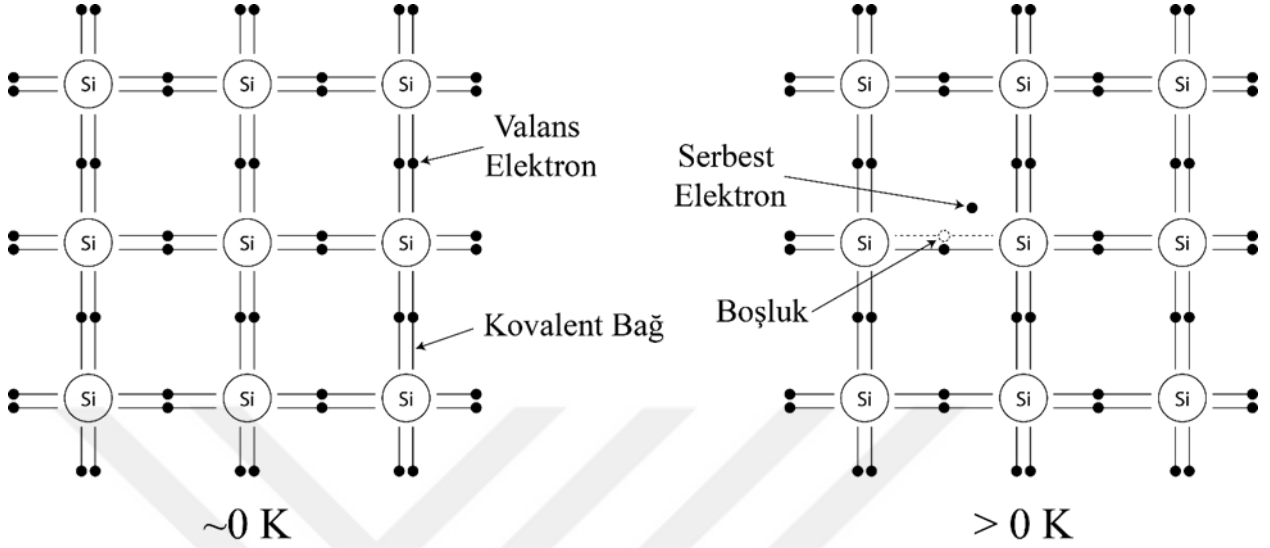
Enerji bantları, aralarında çok kısa aralıklar bulunduğu için sürekli olarak düşünülebilecek birçok ayrı seviyeden oluşan bölgelerdir. Yasak enerji aralığı ise herhangi bir uygun enerji seviyesinin bulunmadığı bölgedir. Bu bant yapıları kristal içindeki, elektron dalga fonksiyonlarının çakışmasına neden olan, yakın ve periyodik olarak dizili atomlar dolayısıyla oluşur. Pauli ilkesi birden fazla elektronun aynı durumda bulunmasını yasakladığından, dış atomik kabuğu enerji seviyelerindeki dejenerasyon, birbirinden hafifçe ayrılmış farklı seviyeler oluşturmak üzere kırılır. Zıt spinlere sahip iki elektron aynı seviyede bulunabildiğinden, seviyelerin sayısı kristal içindeki elektron çifti sayısı kadardır. Dejenerasyondaki bu kırılma, bağları daha sıkı olan iç atomik seviyeleri etkilemez. Katı hal fiziğinde enerji ya da bant aralığı olarak adlandırılan bu yapılar valans band ve iletkenlik bandı arasında bulunan, elektron durumlarının yasak olduğu bir enerji aralığıdır. İletkenlerin aksine bir yarı iletkendeki elektronların, bant aralığını geçmeleri ve iletkenlik bandına ulaşmaları için belirli bir enerjiye ihtiyaçları vardır. Örneğin bu enerjiyi iyonize radyasyondan karşılayabilirler. Yarı iletkenlerin özellikleri valans ve iletkenlik bantları arasında bulunan enerji aralıkları ile belirlenir.

Valans bandı adı verilen alt bant, kristal içindeki belirli kafes bölgelerine bağlı olan dış kabuk elektronlarına karşılık gelir. Bu durum silikon veya germanyum için kristal içindeki atomlar arası kuvvetleri oluşturan kovalent bağın parçalarıdır. İletkenlik bandı en yüksek enerji bandıdır. Bölgedeki elektronlar ana atomlarından bağımsızlardır ve kristalin tamamını serbestçe dolaşabilirler. Bu banttaki elektronlar, malzemenin elektriksel iletkenliğine katkıda bulunurlar. Valans band seviyesindeki elektronlar ise daha sıkı bağlılardır ve kendi kafes atomlarına bağlı kalırlar.

Bantların ve aralığın genişliği, atomlar arasındaki kafes aralığı ile belirlenir. Bundan dolayı bu parametreler basınca ve sıcaklığa bağlıdır. İletkenlerde enerji aralığı yok iken yalıtkanlarda bu aralık oldukça büyüktür. Normal sıcaklıklarda yalıtkan içindeki elektronların tümü valans bandındadır. Termal enerji elektronları uyararak bu büyük aralığın karşısına geçmelerini sağlamak için yetersizdir. Bundan dolayı, dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında kristalde herhangi bir elektron hareketi gözlenmez ve dolayısıyla akım oluşmaz. Diğer taraftan, bir iletken için enerji aralığının yokluğu, elektronların kristalde serbestçe hareket edebildikleri iletkenlik bandına sıçramalarını oldukça kolaylaştırır. Bu takdirde uygulanacak bir elektrik alan akım oluşmasına sebebiyet verecektir. Bir yarı iletkende enerji aralığı orta büyüklüktedir. Bu büyüklük termal enerjinin yalnızca birkaç elektronu iletkenlik bandına uyarabilmesine yetecek kadardır. Bu nedenle bir elektrik alan uygulandığında küçük bir akım gözlenir. Eğer yarı iletken soğutulursa neredeyse bütün elektronlar valans bandına düşer ve yarı iletkenin iletkenliği azalır.

0 K'de, yani yarı iletkenin en düşük enerji durumunda valans bandındaki bütün elektronlar kovalent bağ ile kafes atomlara bağlanırlar. Bu durum şekil 13'te gösterilmiştir. Silikon ve germanyumun ikisi de dört tane valans elektrona sahiplerdir, dolayısıyla dört tane kovalent bağ oluşmuştur. Normal sıcaklıklarda ise termal enerjinin etkisi ile bir valans elektronun iletkenlik bandına uyarılması sonucu elektronun orijinal pozisyonunda bir boşluk oluşabilir. Bu durumda, komşu valans elektronun, boşluğu doldurmak için kendi bağından buraya sıçraması kolaydır. Bu halde sıçrayan komşu eski yerinde bir boşluk bırakacaktır. Diğer komşu elektronlar da bu hareketi sırasıyla tekrar ederlerse, kristal boyunca hareket eden bir boşluk görünür. Boşluk, valans bandındaki elektron denizine göre pozitif olacağından, pozitif yük taşıyıcı gibi davranır ve boşluğun kristal içindeki hareketi de akım oluşmasına neden olur. Bir yarı iletkende elektrik akımı iletkenlik bandındaki serbest elektronların ve valans bandındaki boşlukların hareketi

olmak üzere iki şekilde oluşur. Bu durum akımın yalnızca elektronlar ile taşındığı bir metal ile tezatlık göstermektedir.



Şekil 13: 0 K ve yüksek sıcaklıklarda silikon kristalinin kovalent bağ modeli. 0 K’de bütün elektronlar kovalent bağlarda yer alırken daha yüksek sıcaklıklarda termal enerji bazı bağları kırarak valans bandda boşluk bırakır.

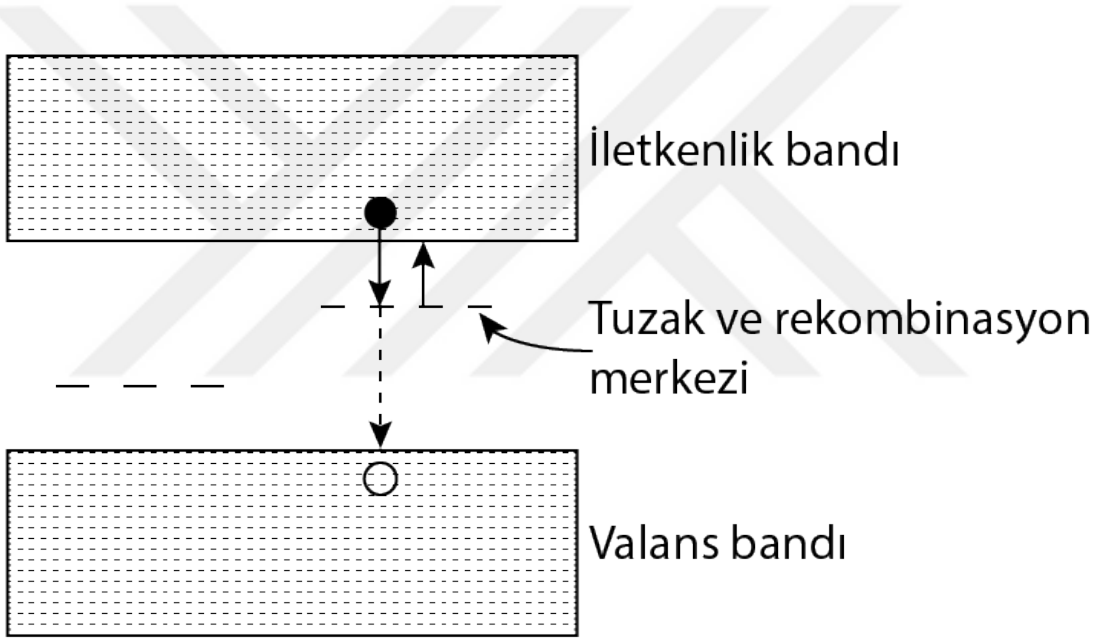
İletkenlik bandındaki bir elektron valans bandındaki açık bir seviyeye düşerek buradaki bir boşlukla yeniden birleşebilir. Bu olay elektron-boşluk çifti oluşumunun tam tersidir ve doğrudan rekombinasyon (direct recombination) olarak bilinir.

En önemli mekanizma kristal içindeki kirliliklerden kaynaklanan rekombinasyon merkezleridir (recombination centers). Bu öğeler şekil 14’te gösterildiği gibi yasaklı enerji aralığının ortasına ek seviyeler ilave ederek enerji band yapısını bozar. Eklenen bu seviyeler iletkenlik bandından elektron yakalayabilir ve sonrasında iki olaydan biri gerçekleşir: ya belli bir süre bekledikten sonra elektron iletkenlik bandına geri bırakılır ya da beklenen sürede aynı zamanda bir de boşluk yakalanır ve tuzaktaki elektron boşluğu doldurarak yok olur. Bu tür merkezler safsızlık orijinal durumunda bırakıldığı için özellikle etkilidir. Böylelikle her merkez birçok rekombinasyon gerçekleştirebilir.

Rekombinasyon kirliliklerinin varlığı, yük taşıyıcıların serbest kaldıkları ortalama süreyi azaltacağından, radyasyon tespiti için zararlı bir rol oynar. Elbette bu süre yükleri toplamak için gereken süreden daha uzun olmalıdır, aksi takdirde hemen ardından çözünürlükte oluşacak

azalma ile yük kaybı meydana gelecektir. Bu nedenle yarı iletken dedektörler nispeten saf kristaller gerektirmektedir. Özellikle büyük hacimli dedektörler için safsızlık konsantrasyonu cm^3 başına 10^{10} safsızlıktan fazla olamaz.

Safsızlıktan doğan ikinci bir etki ise tuzaktır (trapping). Bazı safsızlıklar aslında yalnızca bir tür yük taşıyıcısı yakalayabilirler. Bu ya bir elektron ya da bir boşluktur, ikisini aynı anda yakalayamazlar. Bazı merkezler basitçe bir elektronu ya da boşluğu yakalar ve karakteristik bir süre sonra serbest bırakır. Eğer tuzak süresi yük toplanma sırasına göre ise oldukça açık bir şekilde yükler kaybedilecek ve tamamlanmamış yük toplaması sonuçlanacaktır.



Şekil 14: Yasak enerji aralığındaki rekombinasyon ve tuzak merkezlerinin şematik gösterimi.

Safsızlıkların zararlı etkileri olduğu gibi saf yarı iletkenlere belirli elementlerin eklenmesi ile malzemelerin özellikleri iyileştirebilir. Bu tarz safsızlık ilave edilmiş yarı iletkenlere katkılı ya da doping yarı iletkenler denir. Bu safsızlıklar ile rekombinasyon ve tuzak safsızlıkları arasındaki fark, yasak bant aralığında oluşan enerji seviyelerinin derinliğinden anlaşılır. Doping safsızlıkları iletkenlik veya valans bantlarına çok yakın sığ seviyeler yaratırlarken, rekombinasyon ve tuzak safsızlıkları merkeze yakın derin seviyeler üretirler. Elektronlar ve sığ

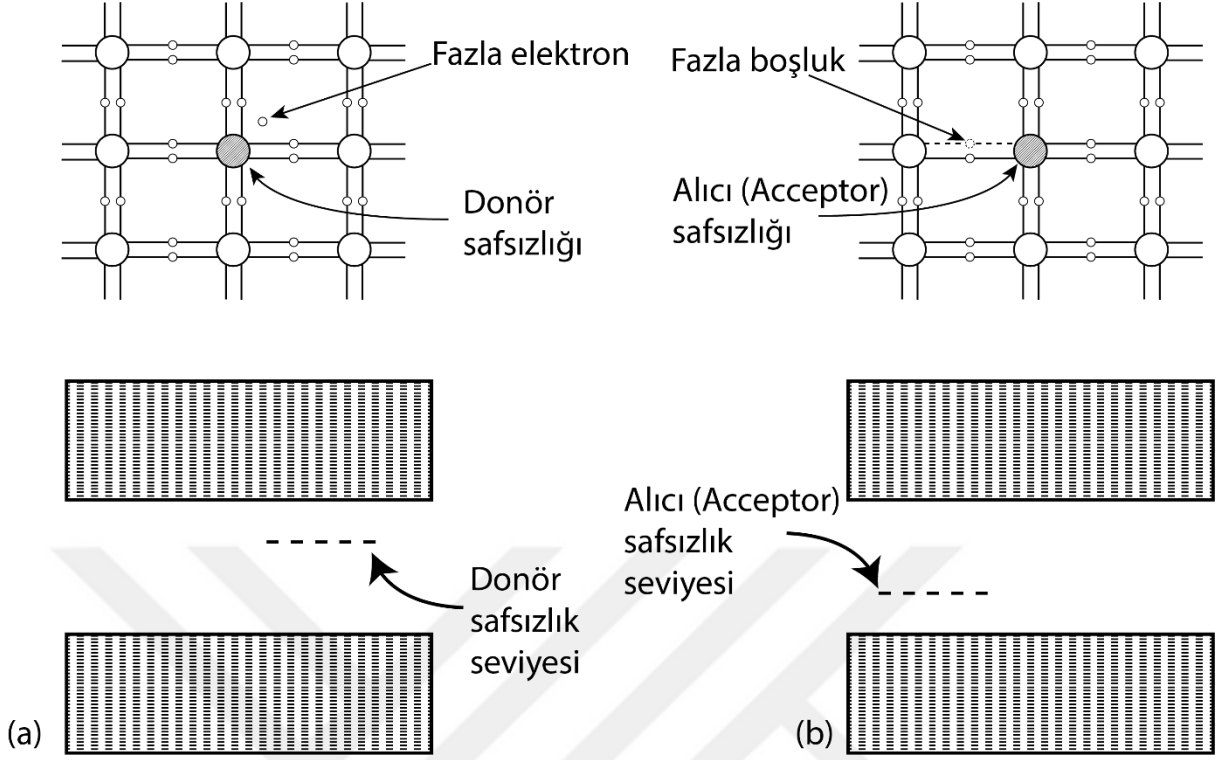
seviyelerdeki boşluklar, iletkenlik ve valans bantlarına kolayca uyarılır ve bu nedenle çok uzun süreler boyunca tuzaklara yakalanmazlar [11], [15].

2.6.3.1. *Katkılı Yarı İletkenler*

Saf bir yarı iletken kristalde, iletkenlik bandındaki elektronların sayısı ile boşlukların sayısı birbirine eşittir. Bu denge, dış atom kabuğunda bir adet fazla veya bir adet az valans elektrona sahip az miktarda safsızlık atomu eklenmesiyle değiştirilebilir. Yani bu, dört değerlikli silikon ve germanyum için, beş (bir fazla) veya üç (bir az) değerlikli atomlar ile yapılabilir. Bu safsızlıklar, kendilerini kristal kafese entegre ederek katkılı veya dışsal yarı iletkenleri oluştururlar.

Katkı atomu beş değerliyse, Şekil 15 a'daki durum ortaya çıkar. Temel durumda, elektronlar, atom başına dört valans elektronu için yeterli alan içeren valans bandını doldururlar. Safsızlık atomunun beş valans elektronu olduğundan, bu banda uymayan fazladan bir elektron kalır. Bu elektron, safsızlık atomlarının mevcudiyeti ile enerji boşluğunda oluşturulan ayrı bir enerji seviyesinde bulunur. Rekombinasyon ve tuzak durumlarından farklı olarak, bu seviye, germanyumda yalnızca 0,01 eV ve silikonda 0,05 eV ile ayrılan iletkenlik bandına son derece yakındır. Bu nedenle, ekstra elektron, artıracığı iletkenlik bandına kolayca uyarılır ve normal sıcaklıklar altında yarı iletkenin iletkenliğini artırır. Ek olarak, ekstra elektronlar normal olarak oluşan boşlukları dolduracak ve böylece normal boşluk konsantrasyonunu azaltacaktır. Bu tür malzemelerde, akım esas olarak elektronların hareketinden kaynaklanmaktadır. Elbette, boşluklar mevcut duruma katkıda bulunurlar, ancak yalnızca azınlık olarak. Elektronların çoğunluk yük taşıyıcıları olduğu katkılı yarı iletkenlere n-tipi yarı iletkenler denir.

Safsızlık eğer bir adet daha az değerlik elektronuna sahip yani üç değerlikli ise valans bandını doldurmak için yeterli elektron olmayacağından dolayı kristaldeki boşluk sayısı daha fazla olacaktır (Şekil 15 b). Üç değerlikli safsızlıklar ayrıca bant aralığında ek bir durum yaratarak bant yapısını bozarlar, ancak bu sefer Şekil 15 b'de görüldüğü gibi valans bandına yakın olurlar. Valans bandındaki elektronlar daha sonra bu ekstra seviyeye kolayca uyarılır ve geride ekstra boşluklar kalır. Bu fazla boşluk aynı zamanda doğal serbest elektron konsantrasyonunu da azaltır, böylece boşluklar çoğunluk yük taşıyıcıları ve elektronlar ise azınlık haline gelirler. Bu tür malzemelere p-tipi yarı iletkenler denir.



Şekil 15: (a) n-tipi yarı iletken malzemesi oluşturmak için eklenen donör safsızlıkları. Safsızlıklar kristale fazla elektronlar ekler ve enerji aralığında donör safsızlık seviyesi oluşturur. (b) p-tipi yarı iletken malzemesi oluşturmak için eklenen alıcı (acceptor) safsızlıkları. Safsızlıklar kristale fazla boşluklar oluşturur ve enerji safsızlık seviyesi valans bandına doğru yaklaşır.

Aşırı derecede yüksek bir safsızlık konsantrasyonuna sahip olan yarı iletken malzeme katmanlarının özel bir gösterimi vardır. Çok yüksek iletkenliğe sahip yoğun katkılı n ve p-tipi katmanları n^+ ve p^+ olarak gösterilirler [11], [15].

2.6.3.2. PN-Eklemi (PN-Junction)

Günümüzde yarı iletken dedektörlerinin işleyişi, yarı iletken eklemi (junction) oluşumuna bağlıdır. Bu tür bağlantılar, elektronikte doğrultucu diyotlar olarak daha iyi bilinse de dedektör olarak kullanım şekilleri bu değildir. Yarı iletken diyotlar çeşitli şekillerde oluşturulabilirler. Basit bir şekilde, p-tipi bir yarı iletkenin n-tipi bir malzeme ile yan yana getirilmesi ile oluşturulan pn bağlantısı örnek olarak gösterilebilir. Elbette bu bağlantılar, n ve p-tipi malzemeler bir araya getirilerek basitçe elde edilemezler. Bunun yerine bazı özel teknikler kullanılmaktadır. Yeterli miktarda p-tipi safsızlığı homojen bir n-tipi malzeme çubuğunun bir

ucuna dağıtarak bu ucu p-tipi bir yarı iletkene dönüştürmek, bu yöntemlere örnek olarak verilebilir.

Bir pn-ekleminin oluşumu, iki malzeme arasında özel bir bölge oluşturur. Bu, Şekil 10.5'te gösterilmektedir. İki malzeme arasındaki elektronların ve boşlukların konsantrasyonlarındaki farklılıktan dolayı, p-bölgesi valans bandındaki boşluklar n-bölgesi valans bandına doğru, aynı şekilde n-bölgesi iletkenlik bandındaki elektronlar da p-bölgesi iletkenlik bandına doğru geçiş sağlar. Bu olay difüzyon olarak bilinir. Her iki bölgede de serbest haldeki elektron ve boşlukların bir araya gelmesi ile rekombinasyon meydana gelir. Rekombinasyondan dolayı bağlantı bölgesi etrafındaki çoğunluk yük taşıyıcıları (elektronlar ve boşluklar) tükenmiş olur ve bu nedenle bu bölge tükenme bölgesi (depletion region) olarak adlandırılır. Yük taşıyıcılarının bir bölgeden diğerine doğru hareketinden dolayı tükenme bölgesinde yük oluşur. Bu yükler elektronların ve boşlukların arkalarında bıraktıkları safsızlık atomlarıdır. Tükenme bölgesinin p-bölgesi negatif, n-bölgesi pozitif yüklenir. Bu durum, yük taşıyıcılarının difüzyonuna karşı kuvvet uygulayacak bir elektrik alanı oluşmasına neden olur. Oluşan bu elektrik alanı yeni difüzyonların oluşmasını durduracak yeterliliğe ulaştığı zaman tükenme bölgesi denge durumuna gelir. Elektrik alanı nedeniyle, bağlantı boyunca potansiyel fark oluşur ve bu potansiyel fark kontak potansiyeli (contact potential) olarak bilinir. Tükenme bölgesinin genişliği genellikle küçük olmakla birlikte n ve p safsızlıklarının konsantrasyonuna bağlıdır.

pn-ekleminin ortasına katkı eklenmemiş saf veya içsel (intrinsic) yarı iletken malzeme eklenmesi ile p-i-n yapısı oluşturulduğu durumlar da vardır. Bu durumda genellikle kaçak akımı engellemek için n ve p-bölgeleri yoğun katkılı olurlar. Burada i-bölgesi sayesinde tükenme bölgesi pn-eklemine göre daha büyük olur.

Oluşan tükenme bölgesi yarı iletken dedektörler için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Çünkü bu bölge radyasyonun algılanacağı bölgedir [11], [15].

2.6.3.3. Ters Bias Voltajı (Reverse Bias Voltage)

Yukarıda açıklanan pn-eklemi bir dedektör olarak çalışacak yeterlilikte olsa da en iyi çalışma formuna sahip değildir. Oluşan elektrik alanı yük toplama verimliliği açısından yeterince yoğun olmayacak ve tükenme bölgesinin kalınlığı sadece en düşük enerji parçacıklarını durdurmaya yetecektir. Ayrıca, tükenme bölgesinin kalınlığının küçük olmasından dolayı bölge içinde elektron veya boşluk geçişinden kaynaklı oluşacak kaçak akım, sinyal çıkışındaki gürültünün

artmasına sebep olacaktır. Şekil 16'da gösterildiği gibi, bağlantıya dışarıdan uygulanacak bir ters voltaj, yani eklem p tarafına negatif ve n tarafına pozitif voltaj uygulanması ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Dışarıdan uygulanacak olan bu ters voltaj, p-bölgesindeki boşlukları bağlantı bölgesinden uzağa ve p-kontaaına doğru çekme etkisine sahip olacaktır. Benzer şekilde n-bölgesindeki elektronlar da bağlantı noktasından uzaklaşacak ve n-kontaaına doğru yönelecektir. Bunun sonucunda, tükenme bölgesinin kalınlığı daha da büyüyecek ve dolayısıyla radyasyon tespiti için gerekli hassas bölge genişlemiştir olacaktır. Harici voltaj ne kadar yüksek olursa, tükenme bölgesi de o kadar geniş olur. Ayrıca, uygulanacak daha yüksek bir harici voltaj da daha verimli bir yük toplama sağlayacaktır. Bununla birlikte, uygulanabilecek maksimum voltaj, yarı iletkenin direnci ile sınırlıdır. Bu sınırları aşacak derecede uygulanacak yüksek voltaj yarı iletken malzemeye zarar verecek ve aniden ters akım oluşmasına neden olacaktır. Bu durumun yarı iletken malzeme üzerinde ciddi yıkıcı etkileri olur [11], [15].



Şekil 16: Ters bias bağlantısı.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, kullanılan dedektörün yüksek aktiviteli kaynak ve mesafe testleri ilk olarak drone ile bağlantısı yapılmadan Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu'nun (TENMAK) İstanbul yerleşkesi olan Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında (SSDL) yapılmıştır. Dedektörün ve kablosuz veri transferi ağının doğru bir biçimde çalıştığından emin olduktan sonra tüm parçalar elektronik kart üzerine lehimlenerek bir platform haline getirilmiş ve oluşturulan bu platform drone üzerine monte edilerek Drone Radyasyon Dedektörü prototipi ortaya çıkmıştır. Daha sonra Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında Drone Radyasyon Dedektörü prototipinin test uçuşları gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ortaya çıkan prototipin hazırlanması için **bir adet DJI marka Mavic 2 Pro model drone, bir adet FTLAB marka GDK101 model PIN yapısına sahip silikon yarı iletken dedektör, bir adet mesafe sensörü**, dedektörün ve mesafe sensörünün çalışması için gerekli kodlamaların yapılması ile elde edilen verilerin kablosuz sinyaller aracılığıyla aktarılması için **3 adet NodeMCU LoLin ESP8266 geliştirme kartı kullanılmıştır**. Drone, mesafe sensörü ve NodeMCU geliştirme kartları Türkiye'den, GDK101 model dedektör ise Almanya'dan tedarik edilmiştir. NodeMCU kartlarının çalışmaları için gereken kodlamalar tarafımda yazılmıştır. Kodlamalar EK 1, EK 2 ve EK 3'te verilmiştir.

3.1. DRONE

Drone seçimi yapılırken belirli birtakım kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Öncelikle üzerinde belirli bir ağırlık olacağından dolayı drone'un kendi ağırlığından daha fazlasını taşıyabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle küçük boyutlu ve motoru kuvvetli olmayan drone'lar kullanılmamıştır. Göz önünde bulundurulan özelliklerde; drone'un stabil bir uçuş performansına, platformun ağırlığını taşıyabilecek kapasite ve motor gücüne, en az 15-20 dk. uçuş süresi sağlayabilecek güçlü bir bataryaya sahip olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda ise DJI marka Mavic 2 Pro model drone'da karar kılınmıştır. Ayrıca drone üzerinde bulunan kamera sayesinde istenildiği takdirde fotoğraf ve video kaydı da yapılabilmektedir.

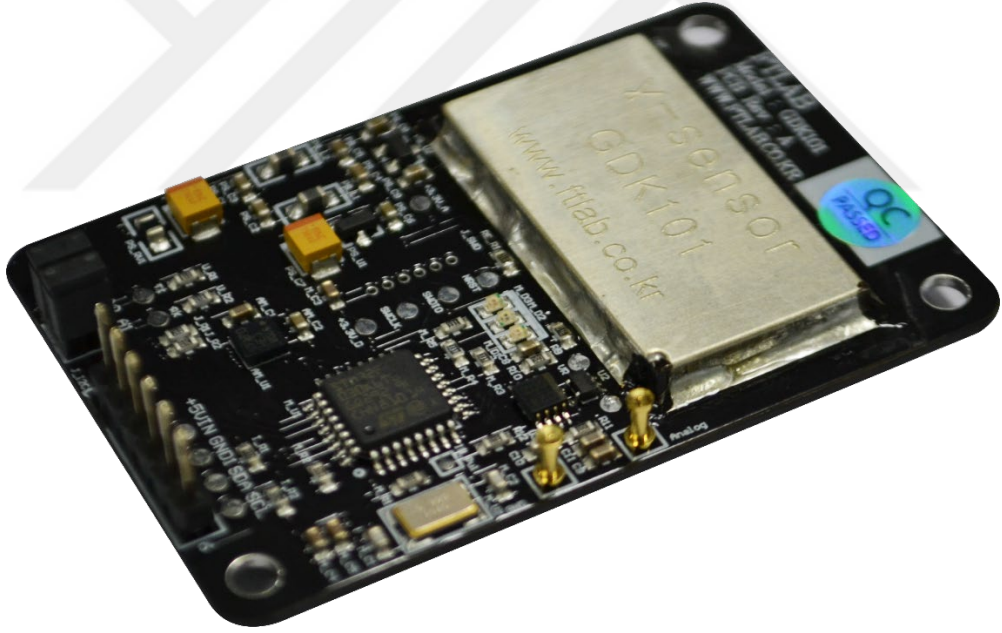
DJI marka Mavic 2 Pro, 342x24284 mm boyutlarında, rüzgarsız bir alanda maksimum uçuş süresi 31 dakika aralığında, deniz seviyesi üzerinde maksimum çalışma yüksekliği 6.000 metredir. Drone bataryası 3.850 mAh değerinde olup 90 dakikada tam doluma ulaşmaktadır. Drone 650 gram ağırlığında olup kalkış ağırlığı ise 907 gramdır. Böylelikle üzerinde yaklaşık olarak 250 gram kadar bir ağırlık taşıyabilmektedir. Hassas terazi ile alınan ölçümler neticesinde drone üzerine yerleştirilecek olan platformun toplam ağırlığı 176 gramdır. Buradan drone'un platformu taşıyabilecek bir kapasiteye sahip olduğu sonucu çıkmaktadır. Drone, sahip olduğu bu özelliklerden dolayı bu çalışma için uygun görülmüştür.



Şekil 17: DJI Mavic 2 Pro.

3.2. KULLANILAN DEDEKTÖR

Bu tez çalışmasının en önemli parçası olan radyasyon dedektörünün seçimi için öncelikle dedektörün cinsinin belirlenmesi gerekmektedir. Sintilatör dedektörler, yüzey alanları görece büyük olduklarından ve ihtiyaç duyulan dedektörün boyutunun bu çalışma özelinde küçük olması gerektiğinden dolayı tercih edilmemiştir. Gazlı sayaçlar ve yarı iletken dedektörler arasında seçim yapılırken özellikle bu çalışmanın amacına uygun olarak daha hassas sonuçlar verdiği için yarı iletken dedektör tercih edilmiştir. Ayrıca kullanılacak bu yarı iletken dedektörün soğutma işlemine ihtiyaç duymaması ve oda sıcaklıklarında çalışmaya uygun olması da seçimi etkileyen önemli bir kriterdir. Yapılan araştırmaların sonucunda FTLAB marka GDK101 model p-i-n eklemi yapısına sahip yarı iletken dedektör seçimi yapılmıştır. Ayrıca seçilen bu dedektörün Arduino ve NodeMCU gibi elektronik kartlar ile çalışabiliyor olması da seçimi etkileyen kriterlerden biri olmuştur.



Şekil 18: GDK101 model dedektör.

GDK101, mikro işlemci tarafından kontrol edilen, hassas 10 PIN fotodiyot ve transempedans amplifikatör devresine sahip yarı iletken gama radyasyon sensör modülüdür. Çevresel koşulların ölçümü için 99,99 $\mu\text{Sv/sa}$ 'e kadar olan düşük seviyeli gama ışınlarını algılayabilmektedir. Hata payı, üretici tarafından uluslararası standart kalibrasyon prosedürü kullanılarak yapılan hassas ölçümler ile $\pm\%10$ 'un altında hesaplanmıştır. Üreticinin vermiş olduğu özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

PIN diyot dedektörler PN-eklem yapısına sahip dedektörlerin farklı bir varyasyonudur. p^+ tipi ve n^+ tipi yarı iletkenlerin ortasına yüksek dirence sahip saf (içsel) yarı iletken malzeme eklenmesi ile oluşturulurlar. Bu bölgeye i-bölgesi denir. Saf bölge n^+ ve p^+ bölgelerine oranla oldukça geniştir. PIN diyotun avantajı, tükenme bölgesinin neredeyse tamamen sabit bir genişliğe sahip olan i-bölgesi içinde bulunmasıdır. Gelen radyasyon, i-bölgesi boyunca elektron-boşluk çiftleri üretir. Ters bias voltajı ile açığa çıkan elektronlar p^+ katmanına doğru taşınırken, oluşan boşluklar ise n^+ katmanına doğru hareket eder. Elektron-boşluk çiftlerinin yaptıkları bu hareket akım olarak ölçülür. PIN yapısı, standart bir PN-ekleminden daha verimlidir çünkü yüksek dirençli PIN yapısı, dedektör hassasiyetini ve akım doğruluğunu artırır.

Tablo 4: GDK101 model gama radyasyonu sensör modülü için üreticiden alınmış özellik bilgileri.

GDK101	
Yarı iletken	10 parça hassas fotodiyot
Hassasiyet	12 cpm/ μ Sv/sa
Ölçüm aralığı	0,01 ~ 99,99 μ Sv/sa
Çalışma voltajı ve akım	DC 4,0 ~ 6,0 V, 10 mA
Doğrusal hata	% \pm 5 - 99.99 μ Sv/sa'te kadar
Çalışma sıcaklığı	Minimum: -10 °C, Maksimum: 65 °C

3.3. KABLOSUZ VERİ AKTARIMI

Drone üzerine monte dedektörün ölçtüğü verilerin bilgisayar ortamında okunabilmesi için kablosuz veri aktarma protokollerine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee gibi birçok alternatif bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında Wi-Fi protokolü kullanımı tercih edilmiştir. Bu protokolü kullanmak için üç adet, üzerinde ESP8266 Wi-Fi mikro çipi

barındıran, programlanabilir NodeMCU elektronik kartları kullanılmıştır. NodeMCU elektronik kartı birden fazla nesneyi birbirine bağlayabilmekte ve bu nesnelere veri transferi sağlayabilmektedir. Oldukça küçük bir boyuta sahiptir. Hem Lua programlama dili hem de Arduino IDE üzerinden programlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında NodeMCU kartlarının kodlanmasında Arduino IDE tercih edilmiştir.

Projede kullanılan üç adet karttan ikisi verici biri ise alıcı olarak kullanılmıştır. Basitçe verici kart veriyi alıcı karta gönderen, alıcı kart ise veriyi alan ve bu veriyi bilgisayara aktaran karttır. Verici kartına, alıcı karta veri gönderebilmesi için alıcı kartın mac adresi kodlanır. Mac adresi her kart için özel bir numara olup bir kimlik numarası gibi düşünülebilir. Bir adet verici kart dedektöre bir adet verici kart ise mesafe sensörüne bağlanmıştır. NodeMCU kartlar çift yönlü iletişim için kodlanabilecek yapıya sahip olsalar da dedektör ve mesafe sensörü çalışmaya başladıkları anda otomatik olarak veri göndermek üzere kodlandıkları için NodeMCU kartlar arasında tek yönlü bir iletişim yapısı kurulmuştur. Verici kartlar dedektörden ve mesafe sensöründen işledikleri verileri bilgisayara bağlı olan alıcı kartına aktarmaktadır. Var olan bir ağdan bağımsız yalnızca kendi aralarında oluşturulan bir ağ ile çalıştılarından dolayı herhangi bir ağ trafiğinden etkilenmezler. Bu sayede veri transfer hızı yavaşlamaz ve bağlantıdan kaynaklı bir aktarım problemi yaşanmaz.



Şekil 19: Üzerinde ESP8266 Wi-Fi mikro çipi barındıran, programlanabilir NodeMCU elektronik kartı.

4. BULGULAR

4.1. BİRİNCİ AŞAMA

Bu tez çalışmasında dedektör ön prototipi oluşturulduktan sonra ilk olarak drone'dan bağımsız bir şekilde Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında 1,65 GBq (44,59 mCi) aktiviteli Cs-137 kaynağı kullanılarak ölçümler alınmıştır. Karşılaştırma için, laboratuvar teknik ekibinin kaynaktan belirli mesafe uzaklıklardan alınmış ölçümler ile oluşturduğu referans değerler kullanılmıştır. Bu referans değerler, laboratuvar bünyesinde bulunan PTW TM 32002 – 299 model iyon odası dedektörü kullanılarak, PTW Unidos Weblin T10021 – 122 referans standardında belirlenmiştir.

Ölçümler kaynağa yatay mesafelerden yaklaşılarak, 10 farklı noktadan alınmıştır. Laboratuvarda en düşük referans değeri olan 1,5 $\mu\text{Sv/sa}$ doz hızının altına inebilmek adına kaynak çıkışına kurşun engel konulmuş ve 1,5 $\mu\text{Sv/sa}$ doz hızının altında da ölçüm alınmıştır. Bu kurşun engel tez çalışmasındaki testler yapılmadan önce laboratuvar teknisyenleri tarafından denenmiş ve buna bağlı olarak bir referans değeri oluşturulmuştur.

Tablo 5: Cs-137 kaynağı kullanılarak alınan ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının referans değerlere göre hata yüzdeleri. Her bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.

Kaynak	Referans Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Okunan Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Okuma Sayısı	Mesafe (mm)	Hata Yüzdesi (%)
1,65 GBq (44,59 mCi) aktiviteli Cs-137	100	98,965	6	248,8	1,035
	70	75,11833	6	398,1	7,3119
	50	57,16	6	565,6	14,32

	20	23,832	5	1194,1	19,16
	10	11,7	6	1902,5	17
	5	5,952	10	2904,3	19,04
	4	4,872	10	3308	21,8
	3	3,576	10	3899,6	19,2
	2	2,52	7	4891,9	26
	1,5	1,94	12	5728,5	29,3333

Daha sonra kaynak olmadan ortamın doğal radyasyon doz hızı ölçülmüştür.

Tablo 6: Cs-137 kaynağı önüne kurşun engel konularak alınan ölçüm sonucu, ölçüm sonucunun referans değere göre hata yüzdesi ve dedektörün ölçtüğü arka plan doz hızı değeri. Her bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.

	Referans Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Okunan Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Okuma sayısı	Mesafe (mm)	Hata Yüzdesi (%)
1,65 GBq (44,59 mCi) aktiviteli önüne kurşun engel konulmuş Cs-137 kaynağı	0,3	0,42	2	5728,5	%40
GDK101 dedektörünün ölçtüğü arka plan radyasyon doz hızı seviyesi ($\mu\text{Sv/sa}$)	-	0,12	10	-	-



Şekil 20: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında kullanılan deney standı.



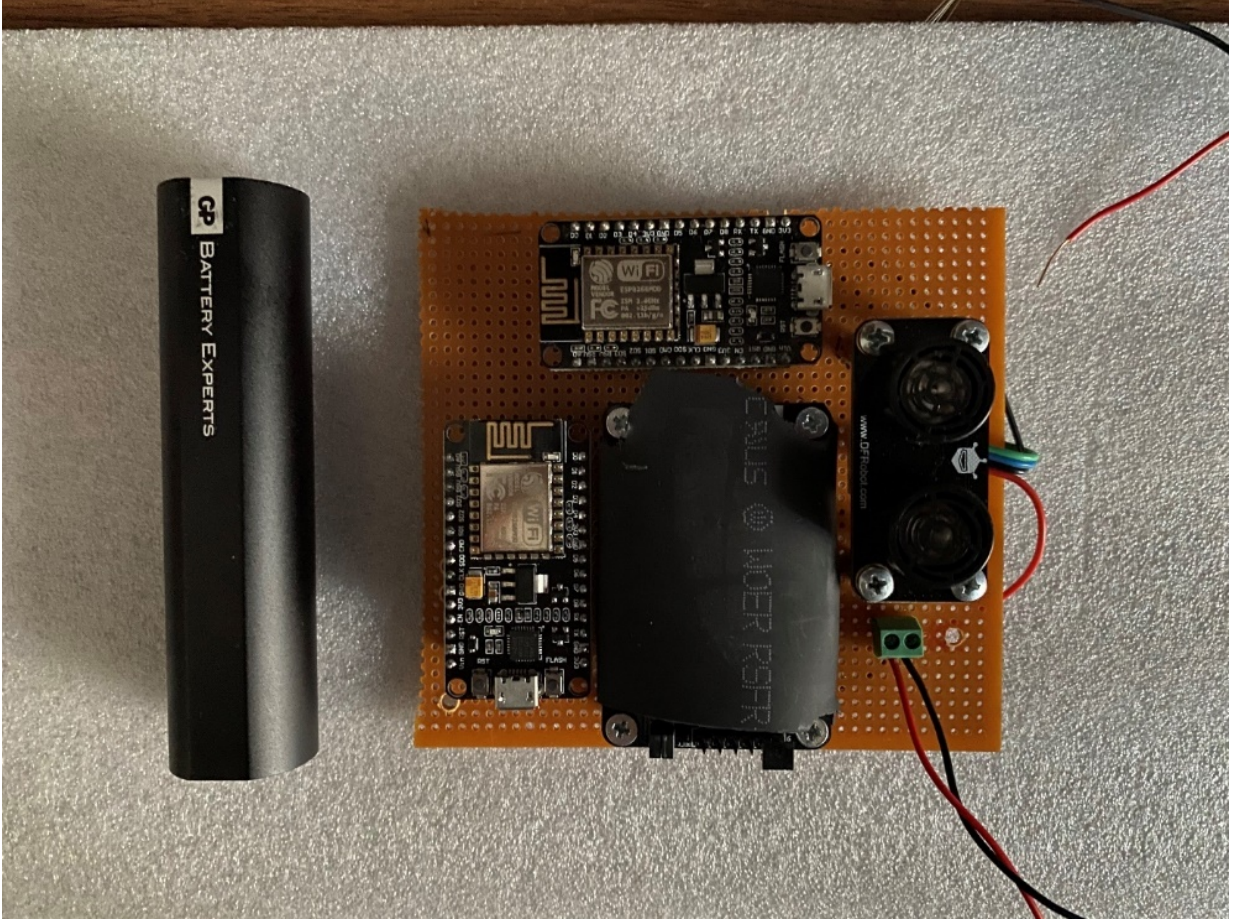
Şekil 21: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında kullanılan kaynağın bulunduğu nokta.



Şekil 22: Dedektör platformunun Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında hareketli stant üzerindeki konumu.

4.2. İKİNCİ AŞAMA

Testler yapıldıktan sonra, dedektör, mesafe sensörü, iki adet NodeMCU verici kartı bir araya getirilerek elektronik kart üzerine lehimlenmiştir. Platformun çalışması için gereken güç 5 V değerindedir. Bu voltajın platforma verilebilmesi için iki adet yöntem kullanılabilmektedir. Birinci yöntem, platform üzerinde dahili bulunan güç girişi ile bir güç kaynağını kablo yardımı ile bağlamak, ikinci yöntem ise platformda bulunan iki adet NodeMCU karttan birine powerbank bağlamaktır. Bazı drone'ların üzerinde 5 V güç çıkışı bulunmaktadır. Platform üzerindeki güç girişi, voltajın drone üzerinden sağlanabileceği durumlar için eklenmiştir. Platforma verilecek gücün drone üzerinden sağlanmadığı durumlarda ise NodeMCU karta bağlanacak bir powerbank ile gereken güç sisteme verilebilmektedir. Bu tez çalışmasında platformun çalışması için gereken güç bir powerbank ile karşılanmıştır.



Şekil 23: Elektronik kart üzerine lehimlenerek oluşturulan ölçüm platformu ve platforma güç vermek için kullanılan powerbank.

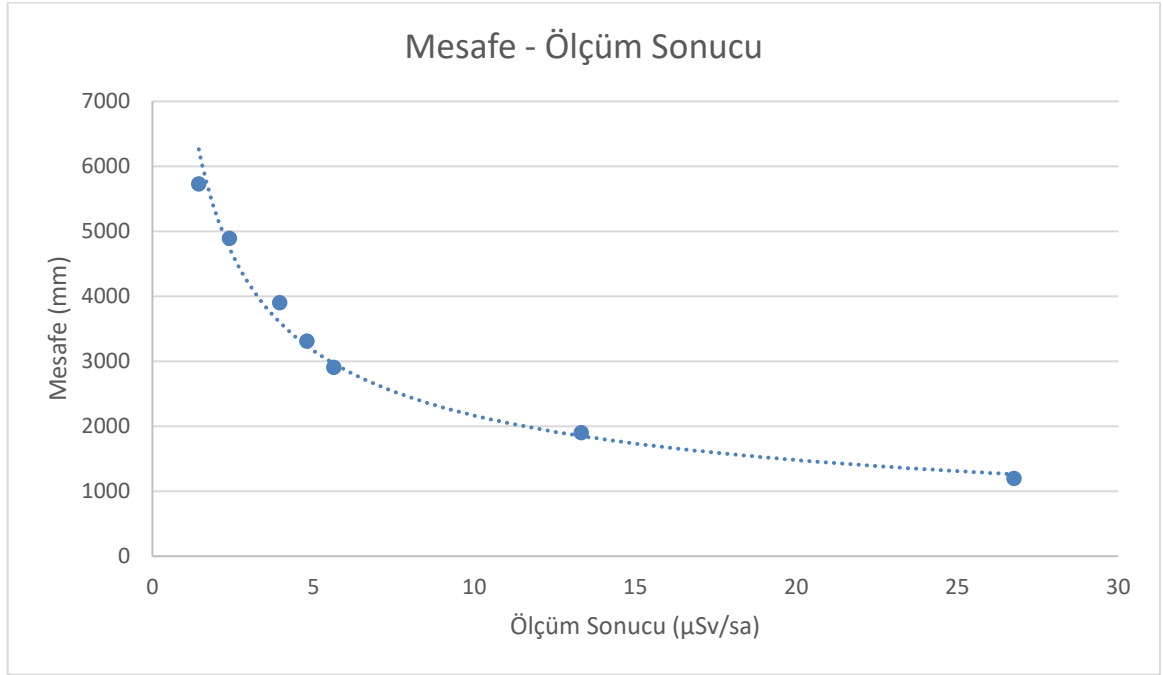


Şekil 24: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında ölçüm platformu ve drone birleştirilerek oluşturulan Drone Radyasyon Dedektörü prototipi.

Platform son halini aldıktan sonra drone ile birleştirilmiştir. Drone ile birleştirilen ölçüm platformu son prototip halini almış ve Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında uçuş testleri yapılmıştır. Ölçümler kaynağa yatay mesafelerden yaklaşılarak, 7 farklı noktadan alınmıştır. Ölçümlerin sonuçları tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7: Ölçüm platformunun Drone ile bağlantısı kurulmuş hali ile Cs-137 kaynağı kullanılarak alınan ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının referans değerlere göre hata yüzdeleri. Her bir nokta için bir okuma alınmıştır. Bir okuma dedektörden gelen bir dakikalık ölçüm sonucunu ifade etmektedir.

Kaynak	Referans Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Okunan Değer ($\mu\text{Sv/sa}$)	Mesafe (mm)	Hata Yüzdesi (%)
1,65 GBq (44,59 mCi) aktiviteli Cs-137	20	26,76	1194,1	33,8
	10	13,32	1902,5	33,2
	5	5,64	2904,3	12,8
	4	4,8	3308	20
	3	3,96	3899,6	32
	2	2,4	4891,9	20
	1,5	1,44	5728,5	4



Şekil 25: Mesafe – Ölçüm Sonucu grafiği.

Tablo 8: Ardışık iki mesafe ile bu mesafelerde ölçülen radyasyon doz hızlarının ters kare kanununa göre karşılaştırması ve I_1/I_2 oranının d_2^2/d_1^2 oranına göre hata yüzdesi. I_1 , d_1 mesafesinde ölçülen radyasyon doz hızını; I_2 , d_2 mesafesinde ölçülen radyasyon doz hızını ifade etmektedir.

d_2	d_1	d_2^2/d_1^2	I_1	I_2	I_1/I_2	Hata Yüzdesi (%)
1902,5	1194,1	2,54	26,76	13,32	2,01	20,86614173
2904,3	1902,5	2,33	13,32	5,64	2,36	1,287553648
3308	2904,3	1,3	5,64	4,8	1,18	9,230769231
3899,6	3308	1,39	4,8	3,96	1,21	12,94964029
4891,9	3899,6	1,57	3,96	2,4	1,65	5,095541401
5728,5	4891,9	1,37	2,4	1,44	1,67	21,89781022

Bir radyasyon kaynağından yayılan enerjinin şiddeti mesafe arttıkça, mesafenin karesi ile ters orantılı bir şekilde azalmaktadır. Bu durum ters kare kanunu olarak bilinmektedir ve I radyasyon şiddeti, d mesafe olmak üzere aşağıdaki denklem ile gösterilmektedir.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (7)$$

Mesafe – Ölçüm Sonucu grafiğinden görüldüğü gibi radyasyon doz hızı, ters kare kanununa göre mesafe azaldıkça, mesafenin karesine ters orantılı bir şekilde artmaktadır. Tablo 8’de, tablo 7’deki veriler kullanılarak, ardışık iki mesafe ile bu mesafelerde ölçülen radyasyon doz hızları, ters kare kanununa göre karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakılarak oranların birbirine yakın oldukları görülmektedir. Buradan yola çıkarak dedektörün ölçmüş olduğu verilerin ters kare kanununa göre tutarlı olduğu çıkarımı yapılmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasına başlarken amaç, Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) acil durumlar çatısı altında olası radyoaktif kaza durumlarında, görevli personelin radyasyon ölçümü ve radyoaktif madde yer tespiti esnasında sağlığını tehlikeye atmadan bu işlemleri gerçekleştirecek, uzaktan kontrol edilebilen bir sistem tasarlamaktır. Burada bahsedilen olası radyoaktif kaza durumları, KBRN tehlikeleri içinden nükleer ve radyolojik tehlikeler kapsamındadır. Nükleer acil durumlar, nükleer santrallerde ve araştırma reaktörlerinde gerçekleşen nükleer zincir reaksiyonlarından meydana gelebilmektedir. Radyolojik acil durumlar, tıbbi, endüstriyel ya da araştırma uygulamalarında kullanılan radyoaktif kaynakları içeren tüm durumları kapsamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacının ortaya çıkmasındaki sebepler geçmişte yaşanmış radyasyon kazalarına dayanmaktadır. Bu kazalar giriş kısmında detaylı olarak incelenen İkitelli Radyasyon Kazası, Fukuşima Nükleer Santral Kazası ve Çernobil Nükleer Santral Kazasıdır. Bu kazaların her birinde hem sivil insanlar hem de personeller yüksek dozlarda radyasyona maruz kalmışlardır. İkitelli kazasında büyük bir ihmalkarlık sonucunda hurdacıların, ellerine geçen kaynağı parçalamaya çalışmaları ve neler olduğunun farkına varıldıktan sonra saha personelinin radyoaktif maddenin nerede olduğunu tespit etme çabalarındaki olağanüstü tehlike ve zorluk; Fukuşima Nükleer Santralinde tsunami sonrası sular altında kalan jeneratörlerin soğutma sistemini çalıştıramamasının ardından santraldeki kaza sonrasında etrafa yayılan radyasyon ve bu radyasyonun ne kadar yayıldığına tespitinin yapılmasındaki güçlük; Çernobil Nükleer Santralinde gerçekleşen kazada saha personellerinin maruz kaldıkları binler mertebesine varan yüksek radyasyon seviyeleri, bu çalışmanın fikrinin doğmasında büyük önem taşımaktadır. Bu üç olay üzerinde yapılan incelemeler sonucunda kaza ya da şüpheli madde olduğu düşünülen bölgeye, saha personelinin fiziki olarak gitmeden ölçümleri uzaktan alabildiği ve bu verilerin anlık olarak kablosuz aktarımını yapabilen bir dedektör sistemi prototipi tasarlanmasına karar verilmiştir. Daha sonra bu sistemin insansız hava araçları vasıtasıyla uzaktan veri okuyabileceği fikri ortaya çıkmış ve sonuç olarak Drone Radyasyon Dedektörü fikri bir taslak olarak şekillenmiştir. Yapılan araştırmalar ve literatür taraması sonucunda ise bu fikrin gerçeğe dönüşmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

Fikir oluştuktan sonra bu fikri gerçekleştirmek için gerekli olan parçaların ne olacağı kararlaştırılmıştır. İlk olarak sistemin en önemli parçası olan radyasyon dedektörünün ne olacağına karar verilmiştir. Uzun süren araştırmalar sonucunda FTLAB marka GDK101 model PIN diyot yapısına sahip olan yarı iletken radyasyon dedektörü seçilmiştir. Dedektörün boyutunun küçük olması ve Arduino programlama dili programlanabilmesi tercih yapılırken dedektörü öne çıkaran önemli özelliklerdir. Dedektör tedarik edildikten sonra ilk olarak bir adet Arduino Nano kartı kullanılarak dedektör programlanmış ve çalışıp çalışmadığı test edilmiştir. Birkaç denemeden sonra yazılım son halini almış ve dedektör istenildiği şekilde çalışmıştır.

Dedektör tercihindan sonra ortaya çıkacak sistemin yerden yüksekliğini ölçebilecek bir mesafe sensörü alınmıştır. Bu sensör, Arduino programlama dili ile çalışabilecek yapıya sahip ultrasonik bir sensör tercih edilmiştir. Sensör satın alındıktan sonra dedektörde olduğu gibi ilk olarak Arduino Nano kartı kullanılarak programlanmış ve testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında sensör, istenildiği gibi çalışmıştır.

Daha sonra elde edilen radyasyon ve mesafe verilerinin nasıl uzak sunucuya aktarılacağı araştırılmış ve kablosuz veri aktarma protokolleri arasından Wi-Fi protokolü kullanılması tercih edilmiştir. Arduino üzerine takılan Wi-Fi kartlarından ziyade tek başına hem dedektörü ve sensörü programlayabilecek hem de veriyi transfer edebilecek kompakt bir kart kullanılmak istenmiş, yapılan araştırmalar sonunda üzerinde ESP8266 Wi-Fi modülü bulunan ve Arduino programlama dili ile programlanabilen NodeMCU elektronik kartı bulunmuştur. Bu karttan üç adet sipariş edilmiştir. Birinci kart dedektör ile ikinci kart sensör ile üçüncü kart da bilgisayara bağlı çalışacak şekilde planlanmıştır. Yapılan planlamadan sonra birinci ve ikinci kartlar sırasıyla dedektöre ve mesafe sensörüne bağlanmış, önceden testleri yapılmış olan yazılımlar ile programlanmışlardır. Üçüncü kart da bilgisayara bağlanmış ve diğer iki karttan veri alması için programlanmıştır. Yapılan denemeler sonunda dedektöre ve mesafe sensörüne bağlı olan iki kartın ölçtükleri verileri üçüncü karta göndereceği ve üçüncü kartın da gelen verileri bilgisayar ortamına aktaracağı kablosuz bir ağ yapısı geliştirilmiştir.

Çalışmada kullanılacak drone, bu işlemler ile eş zamanlı şekilde araştırılmıştır. Boyut, batarya gücü, dengeli uçuş performansı, kaldırabileceği yük gibi özelliklere bakılarak DJI marka Mavic 2 Pro model drone kullanılmasına karar verilmiştir. 500 gramdan daha ağır bir drone olduğundan dolayı uçuş lisansına sahip olmak gerektiğinden dolayı bu tez çalışmasında kullanılan drone kiralanmış ve pilot yardımıyla testler gerçekleştirilmiştir.

Dedektör sistemi ilk olarak drone'dan bağımsız şekilde hazırlanmış ve Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında radyasyon ölçümü ve veri transferi testleri yapılmıştır. Bu testlerde elde edilen veriler, dedektörün drone ile teste uygun olduğu sonucunu göstermiştir. Elde edilen veriler, bulgular bölümünde tablo 5 ve tablo 6'da verilmiştir. Daha sonra tüm parçalar elektronik kart üzerine lehimlenerek bir platform haline getirilmiş ve drone üzerine sabitlenerek Drone Radyasyon Dedektörünün ilk prototipi oluşturulmuştur. Drone Radyasyon Dedektörü prototipinin testleri Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, İstanbul Yerleşkesi, Nükleer Enerji ve Maden Araştırma Enstitüsü, Radyasyon Metrolojisi, Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler bulgular bölümünde tablo 7'de verilmiştir.

SSDL'de kullanılan referans iyon odası 1 litre hacme sahiptir. Bu iyon odası Cs-137 kaynağında kalibrasyonu yapılmış referans dozimetredir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında referans değer olarak kullanılmıştır. Bunun yanında ortam dozunu ölçmede birçok dozimetre kullanılmakta olup enerji bağımlılıkları oldukça değişkendir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında kullanılmış olan dozimetrenin de enerji bağımlılığından dolayı referans dozu $\pm\%20$ belirsizliklerle ölçüm yapan dozimetreler sınıfındadır. SSDL'de yapılan kalibrasyonlarda personel dozimetrelerin kalibrasyonları $\pm\%20$ doğruluklarla yapılmaktadır. Düşük dozlarda ise ölçüm dağılımında bu değerler bir miktar daha artmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan dozimetrenin kalibrasyon sertifikası EK 6'da bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasının sonunda çıkmış olan Drone Radyasyon Dedektörü prototipinden elde edilen bulgulara bakılarak, bu prototipe benzer, geliştirilmiş bir sistemin sahada kullanılabileceği ve insan sağlığı tehlikeye girmeden her türlü radyasyon ölçümünün başarılı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir.

Ortaya çıkan ürün prototip olduğu için eksikleri olmakla birlikte geliştirilmeye açık yönleri bulunmaktadır. Drone Radyasyon Dedektörünün olası radyoaktif kazalarda kullanılmak üzere radyasyon seviyesinin ölçülerek güvenli bölgelerin oluşturulması için kullanılabileceği düşünülmektedir. Dedektörün 0,01 ~ 99,99 $\mu\text{Sv/sa}$ aralığındaki düşük seviyeli gama ışınlarını ölçmesinden dolayı radyoaktif madde yer tespiti yapılması için daha hassas bir dedektör kullanılarak oluşturulacak bir sistem ile bu durumun mümkün hale gelebileceği ve çözüm yolu sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu tez çalışmasındaki ana hedef bu senaryonun mümkün

olup olmayacağıının sonucuna varmaktır ve bu sonuca başarılı bir şekilde ulaşılmıştır. Hem İkitelli, Fukuşima ve Çernobil’de yaşanan kazalar hem de ülkemizde Mersin-Akkuyu’da yapılması planlanan nükleer santral projesi düşünüldüğünde, olası bir kaza ya da sızıntı durumunda Drone Radyasyon Dedektörünün insan sağlığını korumak için ne kadar gerekli ve önemli olduğu ortaya konmuştur.

Bu tez çalışmasında, kullanılan dedektörün çok daha hassas bir dedektör ile değiştirilerek daha hızlı ve hassas ölçümler alınabileceği, daha büyük ve daha güçlü bir drone’un kullanılması ile daha uzun bir uçuş performansı sağlanabileceği ve bir mobil uygulama hazırlanarak ölçüm sonuçlarının telefondan okunabileceği, bu tez çalışmasının geliştirmeye açık yönleri olarak düşünülmektedir.

Drone Radyasyon Dedektörünün, radyoaktif kazalardan bağımsız olarak kullanılması için eğer kullanılacak drone üzerinde bir GPS modülü bulunmuyorsa bu modül sisteme eklenerek, istenen herhangi bir bölgenin radyasyon haritasının çıkarılması bu tez çalışmasının devamının getirilebilmesi için düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmasının en başında, saha personelinin herhangi bir kaza ya da şüpheli durumda sağlığını tehlikeye atmadan, güvenli bir şekilde, uzaktan radyoaktif maddenin tespitini ve ölçümünü yapabilecek Drone Radyasyon Dedektörü taslak bir fikir iken, bu çalışmasının sonunda bir prototip halini almıştır. Bu prototipin yapı olarak benzer, geliştirilmiş bir halinin personel sağlığını tehlikeye atmadan gerekli ölçümleri yapabileceği başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] International Atomic Energy Agency, *THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN ISTANBUL*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
- [2] “Fukushima Daiichi Accident - World Nuclear Association”. <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx> (erişim Ağu. 03, 2021).
- [3] “Chernobyl | Chernobyl Accident | Chernobyl Disaster - World Nuclear Association”. <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx> (erişim Ağu. 05, 2021).
- [4] Y. Sato *vd.*, “Radiation Imaging System using a Compact Gamma-ray Imager mounted on a Remotely Operated Machine”, *IFAC-PapersOnLine*, c. 50, sayı 1. ss. 1062–1066, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.218.
- [5] S. Zhang, R. Liu, ve T. Zhao, “Mapping radiation distribution on ground based on the measurement using an unmanned aerial vehicle”, *Journal of Environmental Radioactivity*, c. 193–194. ss. 44–56, 2018, doi: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.016.
- [6] S. Mochizuki *vd.*, “First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima”, *J. Instrum.*, c. 12, sayı 11, 2017, doi: 10.1088/1748-0221/12/11/P11014.
- [7] F. N. Flakus, “Radiation detection Detecting and measuring ionizing radiation - a short history”, *IEAE Bull.*, c. 23, sayı 4, ss. 31–36, 1981.
- [8] “Radyasyon Ölçüm Birimleri Ve Dönüşümleri”. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-olcum-birimleri-ve-donusumleri#> (erişim Tem. 04, 2021).
- [9] “Units of ionising radiation measurement | ARPANSA”. <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/radiation/measurement> (erişim Tem. 05, 2021).
- [10] B. Burnett, “Handbook of Radioactivity Analysis”, *Health Phys.*, c. 86, sayı 5, ss. 540–541, 2004, doi: 10.1097/00004032-200405000-00013.
- [11] G. F. Knoll ve H. W. Kraner, *Radiation Detection and Measurement*, c. 69, sayı 4. 1981.
- [12] G. Nelson ve D. Reilly, “Gamma-ray interactions with matter”, *Passiv. Nondestruct. Anal. Nucl. Mater.*, sayı I, ss. 27–42, 1991, Erişim: Mar. 31, 2020. [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326397.pdf>.
- [13] “Operating Regions of Ionizing Detectors - Detector Voltage”. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/radiation-detection/gaseous-ionization-detector/operating-regions-of-ionizing-detectors-detector-voltage/> (erişim Nis. 24, 2020).

- [14] K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, 1988.
- [15] W. R. Leo ve D. G. Haase, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, c. 58, sayı 12. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990.



EKLER

EK 1. GDK101 radyasyon dedektörünün çalışması için kullanılan NodeMCU verici kartı için yazılan kod.

```
#include <SoftwareSerial.h>

#include <Timer.h> // https://github.com/JChristensen/Timer

#include <mthread.h> // https://github.com/jlamothe/mthread

#include <ESP8266WiFi.h>

#include <espnow.h>

uint8_t broadcastAddress[] = {0xE8, 0xDB, 0x84, 0x98, 0xDA, 0xCE};

typedef struct struct_message {

    String a;

    int b;

    float c;

} struct_message;

struct_message data;

void OnDataSent(uint8_t *mac_addr, uint8_t sendStatus) {

}

class FooThread : public Thread

{

public: FooThread(int id);

protected: bool loop();
```

```
private: int id;

};

FooThread::FooThread(int id){

this->id = id;

}

enum {

cmd_GAMMA_RESULT_QUERY = 0x44,

cmd_GAMMA_RESULT_QUERY_1MIN = 0x4D,

cmd_GAMMA_PROC_TIME_QUERY = 0x54,

cmd_GAMMA_MEAS_QUERY = 0x53,

cmd_GAMMA_FW_VERSION_QUERY = 0x46,

cmd_GAMMA_VIB_STATUS_QUERY = 0x56// V, Response vibration status

cmd_GAMMA_RESET = 0x52,

cmd_GAMMA_AUTO_SEND = 0x55,

cmd_GAMMA_ALL_QUERY = 0x41,

};

SoftwareSerial mySerial;

Timer ts1;

char rec_data[50];

bool request_flag = true;

void setup() {
```

```
Serial.begin(9600);

Serial.setTimeout(10);

mySerial.begin(9600, SWSERIAL_8N1, D7, D8, false, 95, 11);

mySerial.setTimeout(10);

WiFi.mode(WIFI_STA);

if (esp_now_init() != 0) {

    Serial.println("Error initializing ESP-NOW");

    return;

}

esp_now_set_self_role(ESP_NOW_ROLE_CONTROLLER);

esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

esp_now_add_peer(broadcastAddress, ESP_NOW_ROLE_SLAVE, 1, NULL, 0);

ts1.every(1000, RequestData);

Gamma_INIT();

}

bool FooThread::loop(){

if(id == 1) RecUartData();

else ts1.update();

return true;

}

void Gamma_INIT() {
```

```
main_thread_list->add_thread(new FooThread(1));

Read_FW();

Reset();

if(request_flag) main_thread_list->add_thread(new FooThread(2));

}

void Reset(){

byte send_data[6] = {0x02, cmd_GAMMA_RESET, ':', '1', 0x0D, 0x0A};

mySerial.write(send_data, 6);

delay(100);

}

void Read_FW(){

byte send_data[6] = {0x02, cmd_GAMMA_FW_VERSION_QUERY, ':', '?', 0x0D, 0x0A};

mySerial.write(send_data, 6);

delay(100);

}

void RequestData(){

byte send_data[6] = {0x02, cmd_GAMMA_ALL_QUERY, 0x3A, 0x3F, 0x0D, 0x0A};

mySerial.write(send_data, 6);

}

void RecUartData(){

int rec_size = mySerial.available();
```

```

if (rec_size > 0) {

for (int i = 0; i < rec_size; i++)

{

rec_data[i] = mySerial.read();

data.a = String(rec_data[i]);

}

Serial.print(data.a);

esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &data, sizeof(data));

}

}

```

EK 2. Mesafe sensörünün çalışması için kullanılan NodeMCU verici kartı için yazılan kod.

```

#include <Wire.h>

#include <ESP8266WiFi.h>

#include <espnow.h>

unsigned char txbuf[10] = {0};

unsigned char rxbuf[10] = {0};

uint8_t broadcastAddress[] = {0xE8, 0xDB, 0x84, 0x98, 0xDA, 0xCE};

typedef struct struct_message {

String a;

int b;

float c;

```

```
} struct _message;

struct _message data;

void OnDataSent(uint8_t *mac_addr, uint8_t sendStatus) {

}

typedef enum {

    SLAVEADDR_INDEX = 0,

    PID_INDEX,

    VERSION_INDEX ,

    DIST_H_INDEX,

    DIST_L_INDEX,

    TEMP_H_INDEX,

    TEMP_L_INDEX,

    CFG_INDEX,

    CMD_INDEX,

    REG_NUM

} regindexTypedef;

#define MEASURE_MODE_PASSIVE (0x00)

#define MEASURE_RANG_500 (0x20)

#define CMD_DISTANCE_MEASURE (0x01)

unsigned char addr0 = 0x11;

void setup() {
```

```

Wire.begin();

Serial.begin(9600);

WiFi.mode(WIFI_STA);

if (esp_now_init() != 0) {

  Serial.println("Error initializing ESP-NOW");

  return;

}

esp_now_set_self_role(ESP_NOW_ROLE_CONTROLLER);

esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

esp_now_add_peer(broadcastAddress, ESP_NOW_ROLE_SLAVE, 1, NULL, 0);

txbuf[0] = (MEASURE_MODE_PASSIVE | MEASURE_RANG_500); //the measurement
mode is set to passive mode, measurement range is set to 500CM.

i2cWriteBytes(addr0, CFG_INDEX , &txbuf[0], 1 );

delay(100);

}

void i2cWriteBytes(unsigned char addr_t, unsigned char Reg , unsigned char *pdata, unsigned
char datalen )

{

Wire.beginTransmission(addr_t);

Wire.write(Reg);

for (uint8_t i = 0; i < datalen; i++) {

```

```
Wire.write(*pdata);

pdata++;

}

Wire.endTransmission();

}

void i2cReadBytes(unsigned char addr_t, unsigned char Reg , unsigned char Num )

{

unsigned char i = 0;

Wire.beginTransmission(addr_t);

Wire.write(Reg);

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(addr_t, Num);

while (Wire.available())

{

rxbuf[i] = Wire.read();

i++;

}

}

unsigned char i = 0, x = 0;

void loop() {

int16_t dist, temp;
```

```

txbuf[0] = CMD_DISTANCE_MEASURE;

i2cWriteBytes(addr0, CMD_INDEX , &txbuf[0], 1 );

delay(100);

i2cReadBytes(addr0, DIST_H_INDEX , 2 );

dist = ((uint16_t)rxbuf[0] << 8) + rxbuf[1];

data.b = int(dist);

Serial.println(data.b);

i2cReadBytes(addr0, TEMP_H_INDEX , 2 );

temp = ((uint16_t)rxbuf[0] << 8) + rxbuf[1];

data.c = float(temp) / 10;

Serial.println(data.c ,1);

delay(900);

    esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &data, sizeof(data));

}

```

EK 3. NodeMCU alıcı kartı için yazılan kod.

```

#include <ESP8266WiFi.h>

#include <espnow.h>

typedef struct struct_message {

    String a;

    int b;

    float c;

```

```
} struct _message;

struct _message data;

void data_recv(uint8_t *mac, uint8_t *incomingData, uint8_t len) {

    memcpy(&data, incomingData, sizeof(data));

    Serial.print(data.a);

    if (data.b > 0){

        Serial.print(data.b);

        Serial.println("cm");

        Serial.print(data.c, 1);

        Serial.println("°C");

    }

}

void setup() {

    Serial.begin(9600);

    WiFi.mode(WIFI_STA);

    if (esp_now_init() != 0) {

        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");

        return;

    }

    esp_now_set_self_role(ESP_NOW_ROLE_SLAVE);

    esp_now_register_recv_cb(data_recv);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
}
```



EK 4. TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan Drone Radyasyon Dedektörü prototipine ait testlerin yapıldığına dair TENMAK'tan verilen üst yazının bir kopyası.



T.C.
TÜRKİYE ENERJİ, NÜKLEER VE MADEN ARAŞTIRMA KURUMU
Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü

Sayı : E-54132093-330.99[330.99]-25053

18.08.2021

Konu : Cs-137 Lab. Deneysel Çalışma için
Kullanımı

Sayın Berk DÜZEN

İlgi : 10.08.2021 tarihli yazınız.

İlgi yazı ile Enstitümüze gönderilen cihazınızın laboratuvarımızda test ölçümleri yapılmış olup Test raporu Ek'te sunulmaktadır.

Bilgilerinize rica ederim.

Doç. Dr. Gürsel KARAHAN
Astronom
Enstitü Başkanı a.

Ek: Test Raporu (1 Sayfa)

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Doğrulama Kodu: A28B0165-58B6-4239-AF25-4B3FFAA2400A Doğrulama Adresi: <https://www.turkiye.gov.tr/enerji-ebys>
TENMAK Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü (İstanbul Yerleşkesi) Yarımburgaz
Mah. 2441. Sk. Nükleer Araştırma Merkezi Yolu NO:10 P.K.:34303 Küçükçekmece
İstanbul
Tel: 02124732600
Belgegeçer: 02124732634 (Faks)

Bilgi için: Gökhan
KARABİBER
Teknisyen
Telefon No: (212) 473 26 00-
5307



EK 5. TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan Drone Radyasyon Dedektörü prototipine ait TENMAK'tan verilen test raporunun bir kopyası.

11.08.2021 tarihinde TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında teknik özellikleri aşağıda belirtilen ışınlama sistemi kullanılarak FTLAB marka GDK101 model radyasyon ölçüm dedektörünün farklı radyasyon doz hızı değerlerinde ışınlanması esnasında cihazda ölçümlenen doz değerleri alt kısımda verilmiştir.


Kalibrasyon Işınlama Sistemi / Irradiation System used for Calibration						
Işınlama Ünitesi / Irradiator			Radyonüklit / Radionuclide			
Marka <i>Manufacturer</i>	Üretim Yılı <i>Produc. Date</i>	UAEA Kodu <i>IAEA Code</i>	Enerji Kalitesi <i>Energy Quality</i>	Marka <i>Manufacturer</i>	Aktivite <i>Activity</i>	Referans Tarih <i>Reference Date</i>
Yerli Üretim Made at Institution	2017	591-10	Cs-137	AEA Tech.	1.65 GBq	13.11.1975
			Cs-137	CEA	65 GBq	8.12.2016
			Cs-137	BEBIG	364 GBq	25.01.2001

ÖLÇÜM SONUÇLARI		
Referans Değeri <i>(μSv/sa)</i>	Okunan Değer <i>(μSv/sa)</i>	Hata Yüzdesi <i>(%)</i>
20	26,76	33,8
10	13,32	33,2
5	5,64	12,8
4	4,8	20
3	3,96	32
2	2,4	20
1,5	1,44	4

Testi Gerçekleştiren
Dr. Enis KAPDAN

12 AGUSTOS 2021

EK 6. TENMAK İstanbul yerleşkesi Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Radyasyon Metrolojisi Sekonder Standart Dozimetri Laboratuvarında yapılan FTLAB GDK101 dozimetresine ait kalibrasyon sertifikasının bir kopyası.



Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü Başkanlığı
İstanbul Yerleşkesi
 Yarımburgaz Mah., Nükleer Araştırma Merkezi Yolu, No: 10, 34303, Kuşukçekmece/İSTANBUL

SEKONDER STANDART DOZİMETRİ LABORATUVARI

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Sertifika Numarası : 1803
Certificate Number

Kalibrasyon Tarihi : 5.08.2021
Date of Calibration

Cihazın Sahibi : Berk DÜZEN
Customer

Adres : Kağıthane / İstanbul
Address

Başvuru Numarası : 2021.03.001500
Order No

Cihaz Tipi : Elektronik Personel Dozimetre
Device Type

Marka : FT LAB **Prob Marka** : -
Trademark *Probe Trademark*

Model : GDK 101 **Prob Model** : -
Model *Prob Model*

Seri Numarası : 90301000 **Prob SN** : -
Serial Number *Probe Serial Number*

Referans Standart : PTW Unidos **İyon Odası** : PTW
Reference Standard *Webline T10021 - 122* *Ionization Chamber* TM 32002 - 299

Kademe İsmi	Referans Değeri		Okunan Değer (*)		Hata Yüzdesi (**)
Otomatik	100	µSv	98,9	µSv	-1,1
Otomatik	50	µSv	57,2	µSv	14,4
Otomatik	20	µSv	23,8	µSv	19,0
Otomatik	10	µSv	11,7	µSv	17,0
Otomatik	5	µSv	5,9	µSv	18,0

(*) Dedektör radyasyon demeti alan merkezine yerleştirilerek kalibrasyon/test gerçekleştirilmiştir.
 (**) Kabul sınırı doz hızı ölçer cihazlar için %15 elektronik personel dozimetrelere için %20 dir.
 Tavsiye edilen kalibrasyon aralığı 2 yıldır.

05 Ağustos 2021

Tarih : 05 Ağustos 2021
Date

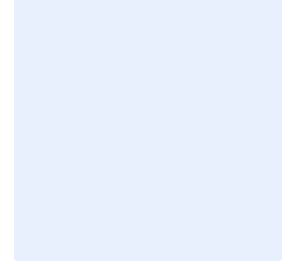
Gökhan KARABİBER
Kalibrasyon Yapan
Calibrated by

Dr. Enis KAPDAN
Kontrol Eden
Controlled by

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız sertifikalar geçersizdir.
 This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Berk Düzen
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	07.07.2017

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Nükleer Fizik Programı

Makale ve Bildiriler	