

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

İYONİZE RADYASYON KAYNAĞININ YÖN TAYİNİ

Burak ÇUHADAROĞLU

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

İYONİZE RADYASYON KAYNAĞININ YÖN TAYİNİ

Burak ÇUHADAROĞLU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakkı Gökhan İLK

Bu çalışma iyonize edici kaynakların tespitini ve cihazın pozisyonuna göre iyonize edici kaynağın yönünü bulan bir dedektör sisteminin ortaya konulması, tasarlanması, yazılımının hazırlanması, cihazın üretilmesi, test ve karakterizasyon aşamalarını içermektedir. Radyasyon yönü bulma sisteminde algılayıcı olarak dörderli diziler şeklinde paralel bağlanmış BPW34 model PIN diyotlar kullanılmıştır. Bu diziler silindirik yapıda tasarlanmış ve döküm tekniği ile imal edilmiş kurşun bir bloğun sekiz farklı yöndeki sensör yuvalarına yerleştirilerek, iyonize ışımaları yönlü şekilde algılamaları sağlanmıştır. Dedektör sistemi, prob mekanizması ve metal şase, Geiger-Müller prensibi ile çalışan sekiz adet gama sayıcı devresi ve bunların LNA kartları, gama sayıcı, algoritmalar ve sinyal işleme blokları ile test yazılımının çalıştığı, tek çipte çalışmaya imkan veren paralel işlem özelliğine sahip FPGA yongası, VHDL yazılımı, yüksek voltaj kartı, invertör kartı ve 12V batarya bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistem ayarlanabilir dedektör bias voltajına ve her kanal için ayarlanabilir taban çizgisi düzeltici ve diskriminatör seviyelerine sahiptir. Ölçüm sonuçları cihazın ön kapağında bulunan HMI dokunmatik ekranda tasarlanan ara yüz sayesinde, her kanalın *cpm* veya *cps* değeri ve kaynağın pozisyonunun açısı değeri verilmektedir. Açısı değeri 360 derecelik bir skalada ibre ile de gösterilmektedir. Gama kaynağı ile yapılan testlerde, kaynak yönü $\pm 22.5^\circ$ aralığında, %99.22 başarımla ölçülmüştür. Dedektör, düşük ve yüksek enerjili doğal gama radyasyon kaynaklarıyla (9.761 μCi aktiviteli ve 59.54 keV enerjili ^{241}Am kaynağı, 3.7 MBq aktiviteli ve 661.6 keV enerjili ^{137}Cs kaynağı ve 1 μCi aktiviteli 1173 ve 1332 keV enerjiye sahip ^{60}Co kaynağı) test edilmiştir. Bu tasarım düşük maliyetli, güç sarfiyatlı ve hacimli, el çantası büyüklüğünde, sahada kullanıma uygun hafiflikte, düşük gürültülü bir cihazdır.

Nisan 2022, 139 sayfa

Anahtar Kelimeler: iyonize edici radyasyon, radyasyon dedektörü, iyonize edici radyasyon yön tayini, gama sayacı, Geiger-Müller, düşük gürültülü yükselteç (LNA), FPGA, PIN diyot

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

IONIZING RADIATION SOURCE DIRECTION FINDING

Burak ÇUHADAROĞLU

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hakkı Gökhan İLK

This work includes introduction, design, software, device production, testing and characterization stages of a detector system determining the ionizing radiation sources and direction with respect to the device position. In radiation direction finding system, BPW34 model PIN diodes connected parallel in the form of quadrilateral arrays placed in the sensor slots in eight different directions of a lead block designed in a cylindrical structure and manufactured with the casting technique, allowing them a directional radiation sensing. Detector system consists of a probe mechanism, metal chassis, a high voltage board, an inverter board, 12V battery, eight gamma counter circuits working with the Geiger-Müller principle and their LNA cards, FPGA chip with parallel processing feature, that allows VHDL software of gamma counters, algorithms, the test software, signal processing blocks to work in a single chip. The system has adjustable baseline restorer and discriminator levels for each channel and adjustable detector bias voltage. The *cpm* or *cps* value of each channel, source position angle is given on an HMI screen. The angle value is also indicated by a pointer on a 360-degree scale. In the tests performed with gamma sources, the source direction was measured in the range of $\pm 22.5^\circ$, with a 99.22 % success. The detector system was tested with low and high energy natural gamma radiation sources (9.761 μCi 59.54 keV ^{241}Am , 3.7 MBq 661.6 keV ^{137}Cs , and 1 μCi 1173 and 1332 keV ^{60}Co). This design is a low-cost, power and volume, handbag-sized, lightweight, low-noise device suitable for field use.

April 2022, 139 pages

Key Words: ionizing radiation, radiation detector, ionizing radiation direction finding, gamma counter, Geiger-Müller, radiation detection, low noise amplifier (LNA), FPGA, PIN diode

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bana yol gösteren ve destekleyen, başta sevgili danışmanım Prof. Dr. Hakkı Gökhan İLK olmak üzere tez izleme komitesi üyeleri, değerli öğretim üyeleri Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR ve Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ'a, tez savunmam sırasında değerli katkılarda bulunan saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR ve Doç. Dr. Hakkı Alparслан ILGIN'a, tez çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Akil Birkan SELÇUK, Prof. Dr. Soner ÖZGEN, Prof. Dr. Sema Bilge OCAK, Prof. Dr. Niyazi MERİÇ, Prof. Dr. Haluk YÜCEL, Doç. Dr. Eren ŞAHİNER, Dr. Öğretim Üyesi Özlem ÇİÇEK ve Dr. Engin AŞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, annem Sevim ÇUHADAROĞLU ve babam Selahattin ÇUHADAROĞLU'na, ablalarım Sevgi ÇUHADAROĞLU ERDOĞAN, Seher ÇUHADAROĞLU, Hülya ÇUHADAROĞLU YAVUZYAŞAR, Hatice ÇUHADAROĞLU GÜNER'e sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma süresince beni her konuda destekleyen kardeşim Mustafa KOÇ'a, kıymetli arkadaşlarım ve dostlarım Ümit ALKUŞ, Dr. Mustafa Suphi GÜLSU, Rıza ONAYLI, Çiğdem Güliz SEVGÜL ÇETİN ve Mustafa BUDAK'a, sevgili abilerim Hüseyin TERCAN ve Ümit GÖĞÜSGEREN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında bana yer ve radyasyon kaynağı sağlayan Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'ne değerli çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması amansız bir hastalık sonucu genç yaşta kaybettiğimiz sevgili

EBRU YALÇIN'ın değerli anısına ithaf edilmiştir.

Burak ÇUHADAROĞLU
Ankara, Nisan 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
2.1 Mevcut İyonize Edici Radyasyon Yön Tayini Yöntemleri	6
2.1.1 GSD ve gama kameralar	6
2.1.2 Kolimatör ve kodlu diyafram sistemleri.....	10
2.1.3 Sayıma dayalı çok algılayıcı sistemler	12
2.1.4 Algoritma ve hesaplama temelli sistemler	17
2.2 Temel Radyasyon Terminolojisi.....	20
2.2.1 Efektif eşdeğer doz birimleri	20
2.2.2 Eşdeğer doz birimleri	21
2.2.3 Radyoaktif bozunma	21
2.2.4 Radyasyon çeşitleri	21
2.2.5 Radyasyonun madde ile etkileşimleri.....	23
2.2.6 Fotonların madde ile etkileşmesi.....	25
2.3 İyonize Edici Radyasyon Dedektörleri.....	26
2.3.1 Gazlı dedektör sistemleri	27
2.3.2 Sintilasyon dedektör sistemleri.....	28
2.3.3 Yarıiletken dedektör sistemleri	29
2.4 Fotodiyotların Yapısı, Türleri ve Çalışma Prensipleri	30
2.4.1 Çıg tipi fotodiyotlar	30
2.4.2 Si-PIN fotodiyot yapısı	33
2.4.3 Tepki hızı.....	35
2.4.4 Minimum dedekte edilebilir güç.....	36
2.4.5 Silikonda DC akım modunda doğrudan dedeksiyon.....	38

2.4.6 PIN diyotların dezavantajları.....	39
2.4.7 Fotodiyot dedektörler	41
2.5 Ön Yüz Elektronik.....	43
2.5.1 Sensörden sinyalin alınması.....	45
2.5.2 Sinyalin entegre edilmesi.....	46
2.5.3 Küçük akımların yükseltilmesi.....	47
2.5.4 Radyasyon dedeksiyonunda kullanılan ön yükselteçler.....	49
2.5.5 Gerçekçi yüke duyarlı yükselteçler	55
2.5.6 Rezistif geri besleme	58
2.5.7 Fotodiyot devrelerinde fotovoltaj ve fotoiletken modlar	59
2.5.8 Geri besleme direnci	62
2.5.9 Op-Amp'ın bias akımı	63
2.5.10 Darbe şekillendirme	64
2.5.11 Dedektör bileşenleri seçimi.....	73
2.6 Zırhlama	74
3. MATERYAL VE YÖNTEM	76
3.1 Dedektör Probu	76
3.1.1 BPW 34 PIN diyot.....	76
3.1.2 First Sensor X100-7 PIN diyot.....	77
3.1.3 Dedektör kapasitansı ve fotovoltaj mod	81
3.1.4 Prob mekanik yapısı.....	82
3.2 Elektronik Kartlar	90
3.2.1 LNA dedektör kartları	90
3.2.2 Dedektör güç sistemi kartları	103
3.2.3 Sinyal inverter kartı	104
3.3 FPGA birimi	106
3.3.1 Signal conditioning bloğu.....	109
3.3.2 FPGA test bloğu.....	114
3.4 HMI Birimi	115
3.5 Metal Şase	117
3.6 Kalibrasyon İşlemi	119
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	120
4.1 Dedektör Testleri	120

4.2 Çeşitli Radyoaktif Kaynaklar İçin Cpm-Mesafe Ölçümleri.....	123
4.3 Kaynak Konum Açısı Ölçümleri	127
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	130
KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ.....	138



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	Azalma katsayısı
3D	3 Boyutlu (3 Dimensional)
A	Ampere
A	Yükselteç kazancı
Am	Amerikyum
A_Q	Yük kazancı
atm	Atmosfer basıncı
B	Çarpma düzeltme faktörü
B	Sistemin bant genişliği
Ba	Baryum
Bq	Becquerel
c	Işık hızı
C	Coulomb
C	Kapasitans
CdZnTe	Kadmiyum çinko tellür
Ci	Curie
Co	Kobalt
Coef	Kalibrasyon katsayısı
cpm	Dakika başına sayım
cps	Saniye başına sayım
Cs	Sezyum
CsI(Tl)	Talyum katkılı sezyum iyodür
d	Aralık mesafesi
D	Soğrulma dozu
Di	Yön ağırlığı
e	Elektron yükü (1.6×10^{-19} Coulomb)
E_b	Elektron uyarma enerjisi
eV	Elektron Volt
E_γ	Gama foton enerjisi
E_γ'	Saçılan foton enerjisi
ϵ_0	Havanın dielektrik sabiti
ϵ_i	Uyarma enerjisi
F	Fano faktör
F	Farad
FOV	Görüş alanı
f_s	Örnekleme frekansı
f_u	Üst sınır frekansı
Ge	Germanyum
Ge(Li)	Lityum katkılı germanyum
g_m	Transkondüktans parametresi
Gy	Gray
h	Planck sabiti
I	İyot
I_{foto}	Foton şiddeti
$I_{ışık}$	Işık şiddeti

I_J	Johnson gürültü akımı (A. RMS)
I_N	Gürültü akımı
I_S	Saçma gürültü akımı
i_D	Karanlık sızma akımı (A)
k	Coulomb sabiti
k	Boltzmann sabiti (1.33×10^{-23} J/K)
Li	Lityum
m	Kütle (mass)
N	Ortalamsa sinyal kuantası
NaI (Tl)	Talyum Katkılı Sodyum İyodür
NEP	Gürültü eşdeğeri güç (Noise Equivalent Power)
p	proton
Q	Yük
R	Direnç
R_{abs}	Soğurma Bölgesi
R_i	Panel i dedektörünün sayım hızı
R_{mult}	Çarpma bölgesi
R_λ	Fotodiyot duyarlılığı
S	Switch
Si	Silisyum
Si(Li)	Lityum katkı silisyum
Sv	Sievert
T	Sıcaklık (K)
t_d	Geçiş ya da sürüklenme süresi
T_e	Elektronun kinetik enerjisi
T_p	Tepe süresi
U	Entegre
V	Volt
W	Watt
X	Işınlama dozu
X	X ışını
Z	Atom sayısı
Z_L	Yük (Load) empedansı
α	Alfa ışını
β	Beta ışını
β^-	Negatron
β^+	Pozitron
γ	Gama ışını
η	Yükselteç yük transfer verimi
λ	Dalga boyu (m)
ν	Foton frekansı
ν	Nötrino
σ	Standart sapma
τ	Zaman sabiti (s)
ω	Açısal frekans
ω_0	Birim kazanç frekansı
Φ	Akı

ADC	Analogdan dijitale dönüştürücü (Analog to Digital Conversion)
AGATA	Gelişmiş GAMMA İzleme Dizisi (Advanced GAMMA Tracking Array)
ASIC	Application Specified Integrated Circuit
BGO	Bismuth Germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
BLR	Taban Çizgisi Düzeltici (Baseline Restorer)
CCD	Yük Bağlı Ayrıştırıcı (Charged-Coupled Device)
CERN	The European Organization for Nuclear Research
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
CMMR	Ortak Mod Reddetme Oranı (Common-Mode Rejection Ratio)
CNC	Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)
COCAE	Compton saçılması temelli radyasyon cihazı (Cooperation across Europe for Cd(Zn)Te based security instruments)
CSA	Yüke duyarlı Yükselteç (Charge-Sensing Amplifier)
CSP	Yüke Duyarlı Önyükselteç (Charge Sensitive Preamplifier)
DFF	D-flip-flop'ları (D-type Flip Flop Counter)
DOS	Kaynak Yönü (Direction of Source)
DRC	Dedektör yanıt eğrileri (Detector response function compensation.)
DSSD	Çift taraflı silikon şerit dedektörü (Double sided silicon strip dedector)
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar (First-In First-Out)
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)
FWHM	Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik (Full Width Half Maximum)
GEANT	Geometri ve İz sürme (GEometry AND Tracking)
GLRT	Genelleştirilmiş benzerlik oran testi (Generalized Likelihood Ratio Test)
GM	Geiger-Müller
GRB	Gama ışını patlamaları (Gamma-ray bursts)
GRETA	Gama Işını Enerji İzleme Dizisi (Gamma-Ray Energy Tracking Array)
GSD	Germanyum Şerit Dedektörleri (Germanium Strip Detectors)
GVC	Gama vektör kamera (Gamma vector camera)
HMI	İnsan-Makine Arayüzü (Human-Machine Interface)
HPGe	Yüksek saflıkta germanyum (High Purity Germanium)

HV	Yüksek Voltaj (High Voltage)
HVL	Yarı-Değer Kalınlığı (Half-value layer)
IAEA	International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria)
IR	Kızılötesi (Infra Red)
JFET	Junction Field Effect Transistor
LM-ML-EM	Liste Modu Maksimum Olabilirlik Beklentisi Maksimizasyonu (List-mode maximum likelihood expectation maximization)
LNA	Düşük gürültülü yükselteç (Low Noise Amplifier)
MCA	Çok kanallı analizör (Multichannel Analyzer)
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
NaI	Sodyum İyodür
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NeXT	Japon gelecek yüksek enerjili astrofizik görevi
NRL	Naval Research Laboratory
OP-AMP	İşlevsel Yükselteç (Operational Amplifier)
PCB	Baskılı devre kartı (Printed Circuit Board)
PIN	Pozitif İçsel Negatif (Positive Intrinsic Negative)
PLD	Programlanabilir Mantık Aygıtları (Programmable Logic Device)
PM	Foto Çoğaltıcı (Photo Multiplier)
PSPMT	Sintilatör ve Pozisyona duyarlı foto çoğaltıcı tüp (Position-sensitive photomultiplier tubes)
QE	Kuantum verimi (Quantum Efficiency)
RDF	Radyasyon Yönü Bulma (Radiation direction finding)
RF	Radyo Frekansı
RMS	Karekök Ortalama (Root Mean Square)
RS232	Önerilen Haberleşme Standardı 232 (Recommended Standard 232)
RSM	Döner saçılım maskesi (Rotating Scatter Mask)
SGD	Yumuşak Gama Işını Dedektörü (Soft Gamma-ray Detector)
SGS	Bölümlenmiş gama tarayıcısı (Segmented Gamma Scanner)
SiPM	Silikon Foto-Çoğaltıcı (Silicon Photo Multiplier)
SIT	Kaynak-yoğunluk testi (Source Intensity Test)

SNR	Sinyal-gürültü oranı (Signal to Noise ratio)
TDC	Zamanı Dijitale Çevirme-(Time to digital converter)
TIA	Transempedans yükselteç
TLD	Termolüminesans Dozimetre
TP	Test Point
TVL	Toplam-Değer Kalınlığı (Total Value Layer)
UAS	İnsansız hava sistemleri (Unmanned Aerial Systems)
UV	Ultraviyole (mor ötesi)
VHDL	Yüksek Hızlı Entegre Devre Donanım Tasvir Dili (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Çığ tipi fotodiyot eklem gösterimi	31
Şekil 2.2 Çığ tipi fotodiyot besleme V profili. R_{abs} : soğurma bölgesi, R_{mult} : çarpma bölgesi	31
Şekil 2.3 Çığ tipi fotodiyodun yapısı	32
Şekil 2.4 Fotodiyot yarıiletken malzeme yapısı	33
Şekil 2.5 PIN Diyot eklem yapısı	40
Şekil 2.6 PIN Diyot ile radyasyon ölçümü	40
Şekil 2.7 Ters beslemeli PIN diyoda ait elektrik alan profili	41
Şekil 2.8 Transempedans yükselteç (Unbiased Mod)	48
Şekil 2.9 Transempedans yükselteç (Biased Mod)	48
Şekil 2.10 Voltaj duyarlı ön yükselteçlerin şematik gösterimi	50
Şekil 2.11 Akım duyarlı ön yükselteçlerin şematik gösterimi	52
Şekil 2.12 Yük duyarlı ön yükselteçler	53
Şekil 2.13 Yük duyarlı ön yükselteç ve dedektör	53
Şekil 2.14 Basit bir yükselteç	55
Şekil 2.15 Bir yükselteç sisteminin frekans cevabı	56
Şekil 2.16 Basit bir yükseltecin darbe cevabı	57
Şekil 2.17 Rezistif Geri Beslemesiz Çıkış	58
Şekil 2.18 Rezistif Geri Beslemeli Çıkış	58
Şekil 2.19 Fotodiyot devresinde bir fotovoltaiik mod örneği	60
Şekil 2.20 Fotodiyot devresinde bir fotoiletken mod örneği	61
Şekil 2.21 Geri besleme direnci eklenmiş olan fotodiyot	62
Şekil 2.22 Geri beslemeye paralel bir kondansatör eklenerek salınımın kontrol haline alınması	63
Şekil 2.23 Op-Amp Bias akımlı devre	64
Şekil 2.24 Bir darbe şekillendiricinin kısa bir sensör darbesini yuvarlak zirveli ve zirveye ulaşma süresi T_p olan daha uzun bir darbeye dönüştürmesi	64
Şekil 2.25 Darbe genişliklerin azaltılarak darbe çiftlerinin çözünürlüğünün artırılması	65
Şekil 2.26 Bir CR türev alıcıyı yüksek-geçiren filtre ve bir RC integral alıcıyı bir alçak-geçiren filtre olarak kullanan basit bir darbe şekillendirici	66
Şekil 2.27 Ön yüz sinyal işleme devresi blok gösterimi	66
Şekil 2.28 Gürültü analizi için eşdeğer devre	67
Şekil 2.29 Bir BLR örnek devresi	68
Şekil 2.30 Yüke duyarlı yükselteçteki geri besleme direncinin deşarj edilmesi sonucu çıkışı sinyalinin zamanla üstel olarak azalan bir forma dönüşmesi ...	69
Şekil 2.31 Devrenin türev alıcı kısmına kuyruk iptali için R_{pz} direncinin eklenmesi	69
Şekil 2.32 Kuyruk iptali işleminin uygulanmasından önceki (sol) ve sonraki (sağ) sinyal formları	70
Şekil 2.33 CSP giriş ve çıkış sinyalleri	71
Şekil 2.34 Yüke Duyarlı Ön Yükseltecin Çıkış Tepkisinin Kuyruk Darbesine Dönüştürülmesi	72

Şekil 2.35 Kuyruk darbesinin Gauss darbesine dönüştürülmesi.....	72
Şekil 3.1 BPW 34 PIN Diyot	77
Şekil 3.2 First Sensor X100-7 PIN Diyot.....	78
Şekil 3.3 Farklı modellerdeki X100-7 PIN Diyotların değişik enerjilerdeki γ radyasyonunu soğurma olasılıkları (23°).....	79
Şekil 3.4 Makaron boruların içine yerleştirilmiş olan BPW34 diyot dizileri	80
Şekil 3.5 Paralel PIN diyot dizisi ve renk kodlu sinyal kabloları	81
Şekil 3.6 Dedektör PIN diyot dizileri düzeni ve γ kaynağı görüş alanı	82
Şekil 3.7 Dedektör gövdesinin ve üst kapağının Solidworks Programında 3 boyutlu çizimi	83
Şekil 3.8 3 boyutlu yazıcıdan plastik malzeme olarak çıkarılmış dedektör gövdesi ve kapak modeli.....	84
Şekil 3.9 Dedektör gövdesi	84
Şekil 3.10 Kurşun dedektör gövdesi içine yerleştirmek için şekillendirilmiş kalay ve bakır levha.....	85
Şekil 3.11 Sıvı epoksi malzeme ile kaplanan dedektör bloğu.....	86
Şekil 3.12 Donma işleminden sonra fazlalıkları da alınmış olan montaja hazır dedektör gövdesi.....	86
Şekil 3.13 Sinyal kabloları birleştirilen dedektör bloğu	87
Şekil 3.14 Kapağın altına ve kapakla dedektör gövdesi arasına yerleştirilecek olan şeffaf plastikten üretilmiş yalıtım malzemesi	87
Şekil 3.15 Üst kapak dedektör gövdesine kılavuzla açılan vidalar	88
Şekil 3.16 Kurşun blok ile flex borunun birleştirilmiş hali.....	89
Şekil 3.17 Sistem blok şeması.....	90
Şekil 3.18 Düşük gürültülü yükselteç kartı baskı devre şeması.....	91
Şekil 3.19 Düşük gürültülü yükselteç kartı baskı devre şeması ön yüzü	91
Şekil 3.20 Düşük gürültülü yükselteç kartı arka yüzü	92
Şekil 3.21 Dizgileme işlemi sonrası düşük gürültülü yükselteç kartının ön yüzü	92
Şekil 3.22 Düşük gürültülü yükselteç kartı devre şeması	92
Şekil 3.23 Düşük gürültülü yükselteç kartı sistem şeması	93
Şekil 3.24 LNA test kartlarının test düzeneği için Faraday kafesi görevini görecek, sac malzemeden yapılmış olan kapaklı pano kutusu	97
Şekil 3.25 Ön yükseltecin giriş yüküne karşı çıkış darbe genliği grafiği.....	99
Şekil 3.26 Yükselteç kademe şarjından voltaja dönüştürme grafiği	99
Şekil 3.27 Yükselteç kademe şarjından voltaja dönüştürme. Bir γ etkileşimi için LNA'nın ön yükselteç, ana yükselteç, taban çizgisi düzeltici, diskriminatör bloklarının çıkış dalga formları	100
Şekil 3.28 ^{137}Cs test kaynağı için LNA ana yükselteç, taban çizgisi düzeltici, diskriminatör bloklarının çıkış sinyalleri.....	102
Şekil 3.29 Üst üste dizilerek monte edilmiş 8 kanallı LNA bloğu	103
Şekil 3.30 Ayarlanabilir yüksek voltaj güç kartı.....	104
Şekil 3.31 İnvertör kartı devre şeması.....	105
Şekil 3.32 İnvertör kartı ön yüzü.....	105
Şekil 3.33 Yazılım platformu olarak kullanılan XILINX/ISE programının ara yüzü...	106

Şekil 3.34 SYSTEM ana program bloğu ISE Schematic Viewer programı ekran görüntüsü	107
Şekil 3.35 SYSTEM ana bloğunun alt bloklarının RTL şematik gösterimi ekran görüntüsü	108
Şekil 3.36 RDF_BIN_TOP1 isimli bloğun RTL şematiği ekran görüntüsü	108
Şekil 3.37 Test sinyali yazılımı Isim simülasyon programı çıkış sinyalleri ekran görüntüsü	114
Şekil 3.38 Nextion Editor programı ve cihaz ara yüzü tasarımı ekran görüntüsü	115
Şekil 3.39 Cihaz ara yüzü Nextion Editor simülasyon programı ekran görüntüsü	116
Şekil 3.40 Dedektör ünitesi tüm dedektörlerin tertibatı	117
Şekil 3.41 (a) Dedektör ünitesi; (b) Dedektörün iç görünümü	118
Şekil 3.42 Elektronik sistem bileşenleri	119
Şekil 4.1 Kayar raylı kaynak tutucu mekanizması	120
Şekil 4.2 Radyoaktif kaynaklar (^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co)	123
Şekil 4.3 ^{241}Am radyasyon kaynağının <i>cpm</i> değerlerinin mesafeye göre değişimi	125
Şekil 4.4 ^{137}Cs radyasyon kaynağının <i>cpm</i> değerlerinin, mesafeye göre grafiği	126
Şekil 4.5 ^{60}Co radyasyon kaynağının <i>cpm</i> değerlerinin, mesafeye göre değişimi	126
Şekil 4.6 Kaynak açısı ve mesafesine göre dedektör açısal ölçümleri grafiği	128

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 X100-7 PIN Diyot çalışma aralıkları	78
Çizelge 3.2 Kullanılan yükselteçlere ait teknik bilgiler	94
Çizelge 4.1 CH ₄ kanalına ait arka plan ölçümleri	121
Çizelge 4.2 Tüm kanallara ait arka plan ölçüm ortalamaları ve standart sapma çizelgesi	122
Çizelge 4.3 CH ₄ 'e ait 2 cm mesafede bulunan 3.7 MBq ¹³⁷ Cs kaynağına ait 30 dakikalık <i>cpm</i> ölçüm çizelgesi	122
Çizelge 4.4 Tüm kanallara ait 2 cm mesafede bulunan 3.7 MBq ¹³⁷ Cs kaynağına ait 30 dakikalık sayım ortalamaları ve standart sapma çizelgesi	123
Çizelge 4.5 Gama ışını test kaynaklarının aktivitesi ve γ ışını enerjisi.....	124



1. GİRİŞ

İyonize radyasyon, etkileştiği bir atomun yörüngesinden elektron kopartarak iyonize olmasına neden olacak seviyede yeterli enerji taşıyan radyasyon olarak tanımlanır. İyonize radyasyonlar başlıca alfa (α), beta (β), gama (γ) ışınları, X-ışınları ve nötron ile birlikte elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili UV (mor ötesi) bölgesini içeren ışınlardan oluşur. En sık maruz kalınan ışınlar olan γ ışınları, yapay ve doğal kaynaklar ile uzaydan gelen ve yüklü parçacıklar olan kozmik ışınları kapsamaktadır. Gama radyasyonu gerek yüksek menzilleri gerekse yüksek enerjileri sebebi ile iyonize edici radyasyon türleri arasında önemli bir yere sahiptirler.

Radyasyon kaynaklarından radyografi, nükleer tıp ile görüntüleme ve radyoterapi tedavisi gibi farklı medikal uygulamalar ile endüstri ve araştırma gibi birçok alanda yaygın olarak faydalanılmaktadır. Bu faydaları ile birlikte, radyasyon kaynaklarının oluşturdukları kontaminasyon (bulaşma) ve ısımalar, insanlar ve diğer canlıların sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sebep oldukları için ve iyonize edici kaynaklar tehlikeli madde olarak sınıflandırılmaktadırlar.

İyonize radyasyon, insanın görebildiği görünür bölge aralığında olmadığı için insanlar tarafından algılanamaz. Bu sebeple kaynak tespiti için radyasyon sayaçlarına ihtiyaç duyulur. Başta γ radyasyonu olmak üzere iyonize edici radyasyonun tespitine dedeksiyon denir. Bu esnada kaynakların aktivitelerinin ve enerjilerinin ölçümleri de gerçekleştirilmektedir. Gama sayıcılar genellikle sadece aktiviteyi tespit ederken ayrıca yapılacak enerji ölçümleri sayesinde izotopun türünün tanımlanması da mümkündür. Bu prensiple çalışan sistemler de izotop tanımlayıcılar olarak isimlendirilmektedir.

Gama radyasyon kaynakları, tıbbi, endüstriyel ve araştırma amaçlı metal kapsüllü formlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Halk sağlığı ve güvenliği için devletlerin düzenleyici denetimlerine tabidirler. Muhtelif birimlerde kullanılarak tüketilen kaynaklar, güvenlik yönetmeliklerine uygun olarak toplanmadığı ve uygun depolama alanlarına yerleştirilmedikleri takdirde risk oluştururlar. İyonize radyasyon, çok yoğun aktivitede olmadığı sürece duyu organları tarafından algılanamayacağı için terk edilmişse bundan habersiz kişilere zarar verebilmektedir. Bu kaynakların anında tespit

edilmesi, kaynağın güvenli bir şekilde toplanması ve saha dışına taşınması, muhafaza işlemleri gibi işlemlerinin tamamen eğitilmiş ve donanımlı arama ekipleri tarafından gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Harcanan kaynakların yanı sıra çalınan, kaybolan, terk edilen, yanlış yerleştirilen, sahibi bilinmeyen ve yasa dışı olarak aktarılan veya depolanan diğer γ ışını kaynakları ve teröristler tarafından kasıtlı olarak elde edilen kaynaklar da canlılar için güvenlik riski oluşturmaktadır. Güvenlik nedenleriyle, hurda metal geri dönüşümü, gümrük ofisleri, sınır kontrolleri veya Nükleer Ajanslar, kayıp izotopları, radyoaktif maddeleri ve radyoaktif kontaminasyonları aramak ve nükleer tesislerdeki γ ışını sızıntısını tespit etmek, nükleer kazaların uzaktan algılanması için gama dedektörleri kullanılır. Sahada radyasyon kaynağının aranması esnasında personelin alacağı toplam radyasyon miktarı belirli seviyeleri aştığında sonuç ölümcül olmaktadır. Bu sebeple arama ekibindeki kişilerin alınması beklenen kişisel radyasyon dozlarının ve kişinin γ ışınına maruz kalacağı sürenin tahminlerini içeren bir arama projesine ihtiyaç vardır. Bununla birlikte ekip elemanları aktif bir kişisel dozimetre, koruyucu kıyafetler, muhtelif saha dedektörleri ile de donatılmalıdırlar. Saha araştırmacısı olarak isimlendirilen saha arama elemanları, kişisel becerilere ve tahminlere göre γ kaynağının konumunu tespit etmektedirler. İşlem esnasında harcadıkları zaman radyasyona maruz kaldıkları süreyi ve işlem esnasında alınacak dozu kısaltmaktadır.

Gama ışınlarının geliş açısının tahmini, bu tür kaynaklardan kaynaklı sızıntıların ve nükleer kazaların tespiti yanı sıra gümrük ofisleri, sınır ve hurda metal geri dönüşüm tesis güvenliği gibi muhtelif emniyet ve güvenlik uygulamaları, kozmik γ ışını çalışmaları ve astronomi çalışmaları için radyasyon kaynağının izlenmesi ve tespitinde önemli bir parametredir (IAEA 1995). Yapılan yeni çalışmalar sonucu tasarlanan, kaynak yönünü de tespit edebilme özelliğine sahip dedektör sistemlerinin sağladığı yön bilgisi, kaynağın pozisyonunun belirlenerek atıkların tespiti ve bertaraf edilmesi, yasa dışı kaynak kaçakçılığının önlenmesi ve kozmik ışınların geliş yönünün tayini gibi birçok uygulama için önemli bir parametredir. Bu tez kapsamında tasarlanan sistemin sağladığı radyasyon kaynağı yön bilgisi sayesinde sahada yapılan çalışmalarda kaynak daha hızlı tespit edilebilmekte, azalan dedeksiyon işlemi süresi sonucu arama personelinin radyasyona maruz kalma süreleri ve aldıkları doz miktarı azalmakta,

personel ve cihaz ihtiyacı azaltılabilmektedir. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda bu cihazın robotik ve insansız araçlara entegre edilmesi ve yön bilgisi vermesi sayesinde araçlar kısa sürede kaynaklara yönlendirilebilecek, uzaktan kaynak ve kontaminasyon tespiti yapabilecek ya da atıklar kolayca bertaraf edilebilecektir.

Çalışmanın Özgün Yönleri ve Tez Kapsamında Yapılan Dedektör ve Ölçüm Sistemi:

Yukarıda belirtilen iyonize edici radyasyon kaynağı yön tayini sistem ve yöntemlerine alternatif olarak hazırlanan bu çalışmada hem bir radyasyon kaynağı dedektörü ve yön tayin cihazı tasarlanmış, hem de cihaz imal edilerek testleri gerçekleştirilmiştir (Çuhadaroglu ve İlk 2021). Hazırlanan sistem radyasyon fiziği, nükleer elektronik, sinyal işleme ve elektronik tasarım, veri analizi, yazılım, mekanik tasarım gibi birçok konuyu içeren disiplinler arası bir çalışmadır. Çalışmanın mevcut sistemlere göre özgün yönleri ve avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Cihaz düşük bütçeli ve el yapımı bir sistemdir. Buna rağmen yüksek performansa sahiptir.
- Sistem metal bir alet çantasının içine monte edilmiştir ve böylece gürültüyü önleyen bir Faraday kafesi sağlanmıştır. Ayrıca tespit edilen gürültüler sonucu ekran, işlemci kartı, düşük gürültülü yükselteç kartları ve yüksek voltaj kartı aralarına da metal levhalar yerleştirilerek gürültünün minimum seviyelere indirilmesi sağlanmıştır.
- Cihaz gama sayıcı ve gama dedektörü olarak kullanılabilir.
- Etrafında bulunan bir iyonize edici radyasyon kaynağının cihaza göre yönünü bulabilmektedir.
- Sayımları isteğe göre *cpm* veya *cps* biriminde verebilmektedir.
- Tüm kanalların sayım değerleri ve hesaplanan açı değerleri cihazın kapağına monte edilmiş olan dokunmatik ekranlı İnsan-Makine Arayüzü (HMI: Human-Machine Interface) ünitesindeki ara yüzde, sayısal olarak gösterilmektedir. Ayrıca tespit edilen açı değeri 360°'lik bir skalada da ibre ile gösterilmektedir.
- Cihazın seri çıkış portu vardır ve istenirse ölçüm verileri kablo ile veya kablosuz bir haberleşme modülü ile uzaktaki bir sisteme aktarılabilir.

- Prob ünitesi sekiz farklı açıda yerleştirilmiş ve gelen iyonize edici ışınları yönlü şekilde algılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Algılayıcı olarak yarı iletken bir komponent olan BPW34 PIN diyotlar kullanılmıştır. Geiger-Müller (GM) sayıcıların ya da foto çoğaltıcıların çalışması için yüksek voltaj kaynağına, yüksek saflıkta germanyum dedektörlerin çalışması için ise soğutma sistemine ihtiyacı vardır. Bu sistemde bu gibi ilave sistemlere gerek duyulmamaktadır.
- Akülü ve hafif olduğu için elde taşınabilir ve sahada uzun süre kullanılabilir bir sistemdir
- Cihazda 12 V akü kullanılmaktadır ve çektiği maksimum akım değeri 247 mA olarak ölçülmüştür.
- Robotik ya da insansız araçlara entegre edilebilecek yapıdadır.
- Doğal γ kaynaklarıyla yapılan testlerde 59.54 keV gibi düşük enerjili ^{241}Am ile 1173 ve 1332 keV yüksek enerjili ^{60}Co kaynaklara kadar geniş bir aralıkta ölçüm yapabildiği gözlemlenmiştir.
- Pozitif İçsel Negatif (PIN: Positive Intrinsic Negative) diyotlar için kullanılan bias gerilimi değeri cihazın ön panelinde bulunan potansiyometre ile ayarlanabilmekte ve yine panelde bulunan gösterge ile bias voltajının anlık değeri okunabilmektedir. Bu sayede sistem farklı bias gerilimlerinde çalışmaya ya da farklı algılayıcıların entegre edilerek denemeler yapılmasına imkan sağlamaktadır.
- Her düşük gürültülü yükselteç devresinde, kendine ait diskriminatör ve taban çizgisi düzeltici (BLR: baseline restorer) bloklarının hassasiyet seviyelerinin ince ayarlarının yapılabilmesine imkan veren trimpotları mevcuttur.
- Dedektörde sekiz adet gama sayıcıyı ve gereken hesaplamaları eş zamanlı olarak işleyebilen, paralel çalışma özelliğine sahip Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA: Field Programmable Gate Array) yongası kullanılmıştır. Böylece tek yonga üzerinde algoritma dahil tüm işlemler gerçekleştirilmiştir.
- FPGA içerisinde sayma, sinyal işleme, filtreleme ve hesaplama algoritmalarını çalıştıran Yüksek hızlı entegre devre Donanım Tasvir Dilinde (VHDL: Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) yazılmış bir yazılım kullanılmıştır. Ayrıca, HMI için ayrı bir tasarım ve kodlama işlemi yapılmıştır.

- Cihazın yazılımında bulunan erken sonuç verme özelliği sayesinde, ilk açıldığı anda *cpm* veya *cps* değerlerini bir dakikanın dolmasını beklemeden, belirli katsayılarla hesaplayarak verebilmektedir.
- Yazılım algoritmasında, alınan ölçümlerdeki salınımın minimize edilmesi ve ölçümlerin daha doğru çıkması için kayan pencere tekniği kullanılmıştır.
- Cihazın probu benzer işlevlerdeki sistemlere göre çok daha küçük ebatlardadır.
- Cihaz probu, iyonize edici radyasyon kaynağının, dedektör dizilerinden aynı anda en fazla üç tanesi tarafından algılanabileceği geometride tasarlanmıştır. Ayrıca dedektör dizilerinin arasındaki duvar kalınlıkları da gelen γ ışınlarını bloklayarak yönlü bir algılama sağlayacak şekilde hesaplanarak tasarlanmıştır.
- Cihaz probu ana gövdeye bir flex hortum ile bağlanmıştır. Flex hortumun uzunluğu, dolayısıyla probun yüksekliği kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Prob üzerinde bulunan su düzeci sayesinde probun yere göre eğimi de ayarlanabilmektedir.
- Cihaza güvenlik amaçlı 500mA sigorta takılarak sistemin güvenliği sağlanmıştır.
- Sistem modüler yapıda tasarlanmıştır. Bozulan bir yükselteç kartı, dedektör gibi bileşen kolaylıkla değiştirilebilir.
- Benzer işlevlere sahip sistemlere göre yüksek voltaja veya kriyojenik sisteme ihtiyaç duymamasından dolayı daha pratik bir sistemdir.
- ^{137}Cs kaynağı kullanılarak 0° ila 360° arasında açılar ve 0 cm ila 50 cm arasındaki mesafeler için yapılan deneyler sonucunda cihazın, radyasyon kaynağının bulunduğu yönü $\pm 22.5^\circ$ ölçüm aralığında %99,22 başarımla seviyesiyle ölçebildiği tespit edilmiştir.

İkinci bölümde, iyonize edici radyasyon kaynak yönünün tanımlaması için kullanılan mevcut sistemler ve literatürde bu konuda yapılmış olan çalışmalar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Ardından, radyasyon dedeksiyon elektroniği konusunda temel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde cihazın tasarım aşamaları ve alt bileşenleri hakkında temel bilgilerin verildiği materyal ve yöntem ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, yapılan testler ve deneysel çalışmalar anlatıldığı araştırma bulguları anlatılmıştır. Beşinci ve son bölümde yapılan çalışmalar ışığında sonuçlar değerlendirilmiş ve cihazın özellikleri ortaya konulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde mevcut iyonize edici radyasyon yön tayini yöntemleri hakkında temel bilgiler ile bazı mevcut literatür çalışmaları konusunda özet bilgiler verilmiştir. Temel radyasyon terminolojisi, gama ışın dedektörleri, fotodiyotların yapısı, türleri ve çalışma prensipleri ve son olarak ön yüz elektronığı konuları ele alınmıştır.

2.1 Mevcut İyonize Edici Radyasyon Yön Tayini Yöntemleri

İyonize edici radyasyon kaynak yönünün tanımlaması için kullanılan mevcut sistemler genellikle aşağıdaki başlıklar altında toplanmaktadır;

- Germanyum Şerit Detektörler (GSD: Germanium Strip Detectors) ve gama kamera sistemleri
- kolimatör ve kodlu diyafram sistemleri
- sayıma dayalı çok algılayıcılı sistemler
- algoritma ve hesaplama temelli sistemler.

Bu sistemlere ait mevcut bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

2.1.1 GSD ve gama kameralar

Compton enerji bandındaki gama ışını polarimetrisi sistemleri, genellikle nükleer bozunma ölçümleri ve yüksek enerji astrofiziği alanlarında kullanılmaktadırlar. İki boyutlu dedektör olan GSD yarı iletken sisteminde, oluşan her etkileşimin pozisyon değeri ve enerji seviyesini tespit etmek için karşılıklı algılayıcı yüzeylerinde elektrotlar yerleştirilmiştir. Germanyum dedektörlerin çok iyi olan enerji çözünürlüğü özelliği sayesinde iyi görüntüleme kapasitesine sahiptirler (Kroeger vd. 1995). Bölümlenmiş germanyum dedektör sistemi içerisinde biriken toplam yük bulutunun sınırları yük difüzyonu, elektrik alan bileşeninin düzgün dağılımı ve yük bulutunun başlangıçtaki boyutuna bağlıdır. Bir elektrot bileşeninin ebatlarının en küçük boyutlara getirilmesi ve hassasiyet seviyesi bu özellikler ile belirlenir. Bu parametrelerin gözlemlenebilmesi için yapılan ölçümlerde oluşan yük çiftlerinin 9 mm uzunluğundaki bir sürüklenme

mesafesinde 65µm'den küçük bir yayılmaya sahip oldukları tespit edilmiştir (Kroeger vd. 1999a). Çalışmada kullanılan GSD'de, bir yüzeyinde Lityum ve diğer yüzünde Boron katkılı toplam yirmi beş adet şerit kullanılmıştır. Birbirine komşu pozisyondaki şeritlere fan ışını taraması tekniği uygulanarak oluşan yük bulutlarının boyutları hakkında bilgi edinilmiştir.

Bu deneylerin sonuçları, 10 mm kalınlığındaki bir cihazda şerit aralığı ≤ 300 µm'ye kadar olan olayların çoğu için tek bir şerit üzerinde tam yük toplanmasının sağlanacağını göstermektedir. Bir başka çalışmada 1 cm kalınlığındaki bir aygıtın uzaysal çözünürlüğü, bir etkileşimi takiben oluşan yük bulutunun yanal difüzyonu ve elektrotlar arasındaki şerit mesafesi tarafından sınırlandırılarak yaklaşık 200 µm civarında ayarlanmıştır.

Kroeger vd. (1999b) çalışmasında pozisyon hassas germanyum dedektörler kullanarak gama ışını polarimetresi yapan bir sistem incelemiştir. Sistem, Compton saçılma kesitinin polarize γ ışınlarına açısal bağımlılıklarını ortaya koymak üzere dedektör içerisindeki saçılma yönlerinin dağılımının ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır. 5×5 cm aktif alana, 1 cm kalınlığa ve 2 mm şerit aralığına sahip bir sistem ile ölçümler alınmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara göre optimize edilmiş Compton polarimetreler daha hassas sonuçlar vermiştir (Kroeger vd. 1999b).

GSD'ye ek olarak, Kurfess vd. (2003) çalışmalarında NRL'deki (Naval Research Laboratory) γ ışını astrofizik grubunun geliştirdiği GSD'yi incelemiştir. Gama ışını etkileşimlerinin üç boyutlu pozisyonlarının milimetre altı doğrulukla ölçülebildiğini ve tek bir GSD'nin görüntüleme kapasitesini ölçerek performansını ortaya koymuşlardır. Gelen γ ışınının toplam enerjisi soğrulmasa bile γ ışınının enerjisi ve yön konisinin sıralı üç etkileşimle tespit edilebilmesi faktörü de göz önüne alınarak kalın Silikon şerit dedektörler kullanılmıştır. Ayrıca şerit dedektör dizileri ile ilgili çok sayıdaki kanalın işlenmesi için kullanılmak üzere düşük güçlü ASIC (Application Specified Integrated Circuit)'ler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Üçlü Compton tekniğinin gerçekleştirilmesi için dedektörlerin düşük Z'li maddelerden oluşması gerekmektedir. Bu sebeple çalışmada ortogonal silikon şerit dedektörler kullanılmıştır ve istemin

performansı 3 boyutlu çok katmanlı dedektör yapısı ile test edilmiştir (Kurfess vd. 2003).

Yapılan Compton kamera çalışmalarına göre, iki boyutlu bölümlenmiş yarı iletken dedektörler için, hafifletici bir kolimatör kullanmadan, Gama ışını izleme prosedürlerini kullanarak dedektör içindeki saçılma sırasını belirlemek ve böylece γ yönünü belirlemek mümkündür. Kolimatör kullanımında daha küçük deliklerin olması daha yüksek çözünürlük sağlamasına karşın verimde de önemli bir düşüşe sebep olmaktadır. Ayrıca dedektörün hassas kısmının da dışarıdan gelen γ ışınlarına karşı yalıtılmaları gerekmektedir. Gelişmiş γ ışını izleme tabanlı Compton kameralar γ ışını kaynaklarını kolimatör tabanlı sistemlere göre daha yüksek hassasiyetle görüntülemenin yanı sıra özellikle karmaşık radyasyon alanlarında, görüntüleme dışı dedektörlere göre γ ışını kaynaklarını bulmada yüksek bir hassasiyete de sahip oldukları tespit edilmiştir. Çalışmada çift taraflı şerit Yüksek saflıkta germanyum (HPGe: High Purity Germanium) dedektörden üretilmiş, 2 mm şerit aralık boyutu olan bir Compton kamera geliştirilmiştir ve basit darbe şekli analizi kullanılarak 122 keV’de 0.5 mm’lik üç boyutlu bir konum çözünürlüğü elde edilmiştir. Ayrıca iki boyutlu bölümlendirilmiş çift yönlü şerit dedektörlerden (DSSD: double -sided strip) oluşan düzlemsel yerleştirilmiş konfigürasyona sahip bir dedektör ve kapalı uçlu koaksiyel HPGe dedektörden oluşan koaksiyel yapıda diğer bir konfigürasyonda dedektör de imal edilerek γ görüntüleme çalışmaları yapılmıştır. Ek olarak, potansiyel olarak görüntü kalitesini optimize etmek için yeniden yapılandırma prosedürleri geliştirilmiştir (Vetter vd. 2004).

HPGe konseptine dayalı olarak, Avrupa’da 10’dan fazla ülkenin katılımıyla Gelişmiş GAMMA İzleme Dizisi (AGATA) geliştirilmiştir (Gerl ve Korten 2001). Ayrıca ABD’de de Gamma Işını Enerji İzleme Dizisi (GRETA) geliştirilmiştir (Deleplanque vd. 1999). Bu sistemler küre yüzeyine pozisyonlandırılmış 100 ila 200 arası sayıda çok sayıda bölüntülenmiş HPGe dedektör bileşenlerinden oluşmaktadır. Tipik bir nükleer deneyde farklı enerjilere sahip 30’dan fazla γ ışını yayılabilir ve bu ışınlar yüzden fazla etkileşim noktasında gözlemlenebilmektedir.

NeXT (Japon gelecek yüksek enerjili astrofizik görevi) kapsamında geliştirilen Yumuşak Gama Işını Dedektörü (SGD), Silikon ve CdTe’den (kadmium tellür) oluşan

hibrit yarı iletken bir γ ışını dedektörüdür. Sistem arka planı geliştirmek için Compton kinematiğini kullanan ve dar bir görüş alanına (FOV) sahip bir Compton teleskopudur. Geniş bir enerji bandında (0.05-1 MeV) fotonları $5 \times 10^{-7} / \text{s} / \text{cm}^2 / \text{keV}$ arka plan seviyesinde algılayabilmektedir. Daha düşük enerji bandındaki (<0.3 MeV) performansının iyileştirilmesi için çift taraflı silikon şerit dedektörler DSSD (double sided silicon strip dedector) içeren silikon tabakalar kullanılmaktadır. Diğer bir özelliği de γ ışını polarizasyonunu ölçebilmesidir. Çalışmada yapılan enerji çözünürlüğü ölçümleri sonucu CdTe malzemeden oluşan piksel yapıdaki dedektörler için 1.7 keV değeri bulunmuştur. Si malzemeden oluşan strip yapıdaki dedektörler için ise 1.1 keV ölçülmüştür (Tajima vd. 2004).

Gama ışını ve nötron yön dedektörü için tasarlanan gama vektör kamera (GVC) isimli çalışmada ise birbirine dik olarak yerleştirilmiş ve yönleri her katmanda 90 derece değişen polystrene fiber optik sentilasyon bloklarından ve bunlara bağlı imaj yoğunlaştırıcılar ile yük bağlaşımlı aygıt (CCD: Charged-Coupled Device) kameralardan oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Sistem birinci, ikinci ve üçüncü Compton saçılmalarını kullanarak, Compton kinematiğine göre γ ışının geliş yönünü hesaplamaktadır. Nötronun yönü ise çift nötron saçılmasının istatistiki ortalamasıyla ya da saçılan nötronun Gama vektör kamera (GVC: Gamma vector camera) içindeki uçuş süresi kullanılarak enerjisinin hesaplanmasıyla bulunmaktadır. Bu sistem, dedektörün her yanının açık olması ve diğer sensörler gibi yan yüzeylerinde zırh bulunmamasından dolayı ağırlık açısından avantajlıdır. Özellikle zırhlanması güç olan yüksek enerjili γ ışınları için ikili Compton saçılması hesabı, Compton ve fotoelektrik hesabından daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca birim kütle başına Compton gerçekleşme olasılığı polistren fiber için Si, Ge ve NaI'ya göre daha yüksektir. Elektronun yönünde daha az sapma olması, enstrümantal pozisyon çözünürlüğü için uzun yollar oluşmasına sebep olmakta ve daha yüksek doğrulukta takip yapılmasına imkân vermektedir ve atomik elektron hareketinden dolayı saçılan γ ışınlarında düşük Doppler genişlemesi sağlanmaktadır. Polystren içindeki geçiş derinlikleri kullanılarak proton ve nötronlar enerjilerine göre ayırt edilebilmektedir. Sistem GEANT4 ile farklı tuzaklama verimleri, foton sayıları ve enerjileri ile imaj yoğunlaştırıcı verimleri için simüle edilmiştir (Hindi vd. 2008).

2.1.2 Kolimatör ve kodlu diyafram sistemleri

Bir çalışmada Fujimoto ve Noda (2005) gelen fotonların yön bilgisini elde etmek için düzinelerce sintilatör ve pozisyona duyarlı bir foto çoğaltıcı tüpten (PSPMT: Position-sensitive photomultiplier tubes) oluşan rüzgâr gülü tipi bir dedektör tasarlamış ve önermiştir. Bu dedektör sadece yanal yönlerden gelenleri ışınları tanımlayabilmektedir. En basit ve en ucuz sistemlerinden biri olarak üçgen şeklinde kurşun blendajlı bir çift NaI (TI) sintilatörden oluşan bir dedektör tasarlanmıştır. Bu dedektörün dezavantajı, yalnızca bir baskın olay açısını tanımlayabilmesidir. Tasarlanan bazı dedektör arasında, birçok sintilatör, ışık kılavuzu ve bir gövde parçasından oluşan küresel bir petek tipi dedektör bulunmaktadır. Bu çalışmada aralarında bizim imal ettiğimiz dedektör yapısını da andıran farklı tipte tasarımlar önerilmiştir (Fujimoto ve Noda 2005).

Alternatif bir yön duyarlı sistem, açısal konum duyarlılığına sahip olmayan bir dedektör üzerine yerleştirilmiş, sabit bir hızda dönerken şekli geometrik olarak değişen, düşük-Z maskesi kullanan ve maskenin bir fonksiyonu olarak enerji spektrumlarını kaydeden döner saçılım maskesi (RSM: Rotating Scatter Mask) konseptidir. Bu çalışmada RSM ucuz maliyetli polietilen malzemeden yapılmıştır. Konum bağımlı spektrumlar kaydedilir ve kaynak yönünü belirlemekte kullanılmak üzere dedektör yanıt eğrileri (DRC: Detector response function compensation) oluşturulur. Görüntü rekonstrüksiyonu için ki-kare rekonstrüksiyon tekniği kullanılmıştır. Sistem, 50 saniyelik tek bir dönüşten sonra 10 metre uzaklıktaki 100 μCi aktiviteli, ^{137}Cs - kaynağı algılayabilmektedir. Bununla birlikte, RSM'nin geometrisini değiştirmek, dejenere çözümleri azaltmakta veya ortadan kaldırmakta ve gerekli sayım sürelerini azaltarak tanımlamayı iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte maske için daha doğrusal olarak bağımsız özellikler üretebilmekte, bu da yanlış tanımlama olasılığının azalmasına neden olabilmektedir (FitzGerald 2015).

Döner saçılma maskeleri, bir γ kaynakların yönünü tanımlamak için geniş bir görüş alanına sahip, ucuz ve hafif bir yöntem olmakla birlikte mevcut döner saçılma maskesi tasarımlarının geometrilerinin değiştirilmesinin yanlış çözümleri azalttığı, ortadan kaldırdığı, sayım süresini azalttığı ve tanımlamayı iyileştirdiği görülmüştür. Bu değişiklikler maske için daha doğrusal bağımsız özellikler üreterek yanlış tanımlama

olasılığını azaltmaktadır. Alternatif maske geometrileri üretmek üzere ikili yaklaşım, özvektör ve Hadamard matrisi yöntemleri kullanılmıştır. Tasarım esnekliği sağlaması için geliştirilen ikili yaklaşım tekniğinde, geometrinin farklı kombinasyonları ikilik sayı sistemi ile ifade edilir. Ortalama verimliliği daha yüksek olan bu yöntem özvektör yöntemine göre daha yüksek seviyede doğrusal bağımlılığa sahiptir.

Özvektör yönteminde ise kütle-yay sistemi temelli bir geometri oluşturulur. Hadamard matrisi ise ayrıştırılmış geometrilerde belirli çözümler sağlar. Özvektör yöntemi düşük bir ortalama verim ve nispeten daha düşük seviyede doğrusal bağımlılık sergilemiştir. Başlıca dört kritere göre incelenen bu yöntemlerden elde edilen dedektör tepki matrislerine göre sonuçlar nispeten daha başarılı çıkmıştır. Hadamard tabanlı yöntem, orijinal tasarıma göre daha düşük bir maksimum üretmiştir. Ancak orijinal tasarımdan daha yüksek ortalama doğrusal bağımlılık üretmiştir (Holland vd. 2018).

RSM sistemleri yönlü algılama özelliğine sahiptirler. Farklı enerjideki radyasyonu algılayabilirler ve 4π 'lik alanı görebilen bir katı görüş alanına sahiptirler. Düşük maliyete sahip olan bu radyasyon dedektörlerinin dezavantajı dedektör yön tepkilerindeki modların birbiri arasındaki çok sayıdaki benzerlikleri ve buna bağlı olarak performanstaki olası azalmalardır. Önceki çalışmalarda, modlar arasındaki benzerlikleri önemli ölçüde azaltan daha iyi bir maske tasarımı olan Mace tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında mace ile karşılaştırmak üzere yeni bir tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımın simülasyonları yapılmış ve modal güvence ölçütü ile iki sınıf arasındaki performans farkı yönlü modlar baz alınarak değerlendirilmiştir.

Tam 4π steradyanların %93'ü şeklinde azaltılmış bir görüş alanı dezavantajına rağmen, bu yeni maske tasarımlarının, kaynağın yönünün açısal bileşenlerini başarıyla ayrıştırdığı ve ortalama kriter değerini %66'ya kadar artırdığı gösterilmiştir. Geometrik korelasyon yöntemi olarak adlandırılan yeni kaynak yönü tanımlama algoritması sayesinde yön tespit zamanında %60'a kadar performans artışı gözlenmiştir. RSM ile entegre olarak kullanılan bu yöntem sayesinde ölçüm süresi gerçek zamanlı ölçüme yaklaşmıştır ve ölçüm verimi de artmıştır.

Ek olarak, kaynak yönünün açısıl bileşenlerini ayırarak, analiz yönlü modların, bağımsızlığından da yararlanmıştır. Ayırıştırma, test edilen Spartan sınıfı tasarımları için görüş alanını azaltmıştır. Bunun performans azalmasının başlıca sebeplerinden birisinin NaI dedektör kristalinin silindirik yapıdaki geometrisi olabileceği, bir diğer sebebin de ekstrem açılardaki voksellerin azalan hacimlerinin olabileceği değerlendirilmiştir.

Spartan sınıfı tasarımların hala 4π 'nin %92.5'ini kapladığından ve ölü bölge operasyonları (yani dikey olarak) en az etkileyecek şekilde yönlendirilebildiğinden dolayı bu performans üzerinde sadece küçük bir etki yaratmıştır. Spartan sınıfının sistemin verimliliğini artırarak kaynağın yönünü belirlemek için gereken algılama süresini azaltılmasına yardımcı olduğu gözlenmiştir. Spartan sınıfı RSM boyutunun azaltılarak verimliliğinin daha da artırabileceği ön görülmüştür (Olesen vd. 2020).

2.1.3 Sayıma dayalı çok algılayıcı sistemler

Gama ışınının geliş yönünü tayin için $3'' \times 3''$ NaI (Tl) sintilatör, özel olarak şekillendirilmiş kurşun zırh ve yazılımdan oluşan basit gama spektrometresi yapılmıştır. Zırh pozisyonunu dedektör eksenini boyunca 90 derecelik açılarla döndürerek sahadaki belirli bir alanda dört farklı sayım alınmış ve dört enerji spektrumu elde edilmiştir. Aynı anda ^{137}Cs ve ^{54}Mn kullanan deneylerde, herhangi bir yönden çeşitli baskın kaynaklardan gelen γ ışınlarının yönünün 10 ila 20 dakikalık toplam ölçüm süresi içerisinde iyi seviyede tanımlanabildiği görülmüştür. Mevcut sistemin bir pozisyonda dört farklı ölçümü gerektirmesi, dedektör sisteminin çevresinde aynı enerji γ ışınlarını yayan birkaç kirlenme kaynağı varsa tek bir açı sonucu vermesi ve genellikle yatay olarak seçilen, yalnızca bir düzlem geometrisini arayabilmesi gibi dezavantajları vardır (Fujimoto 2006).

Shirakawa (2007) çalışmasında üç farklı sintilatörden (NaI (Tl), CsI (Tl) ve Bismuth Germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)-BGO) oluşan bir yön bulma γ ışını dedektörü tasarımı yapmıştır. Sintilatörler, silindirik yapıda 180 derecelik açılarla 3'e bölünmüş bir muhafazanın içine yerleştirilmişlerdir. Her sintilatörün sayımı toplam sayıma orantılanmış, ardından belirli katsayılar eklenerek açısıl hesaplama yapılmıştır.

Dedektör, gelen gamma ışınlarının yön tespitinin duyarlılığını pozitif olarak arttırabilme ve γ ışınlarının yön, enerji ve γ sayımını ölçebilme özelliklerine sahiptir. Kullanım alanı olarak, acil durumlarda nükleer santrallerin veya radyasyon tesislerinin izlenmesini sağlamak, radyoizotoplar ve radyoaktif kirlenmeler gibi radyasyon kaynaklarının aranmasında da etkili olabileceği öngörülmüştür. Yapılan ölçümlerde açısal hassasiyetin, γ ışınının enerjisi ile orantılı olduğu tespit edilmiştir (Shirakawa 2007).

Shirakawa vd. (2009) çalışmalarında yine bir öncekine benzer bir yapıda fakat bu sefer üçü de aynı talyum katkılı sodyum iyodür NaI (TI) sintilatörden oluşan bir dedektör tasarlamıştır. Bu tasarımla 60-1250 keV enerjili γ kaynaklarını 600 s'lik sürelerle ve 1024 kanala sahip çok kanallı analizör (MCA: Multichannel Analyzer) cihazları ile ölçmüşler ve her dedektörün sayım değerlerinin ağırlıklarından faydalanan kendi algoritmalarını kullanarak $\pm 3^\circ$ 'lik açılarla yön değerlerini bulmuşlardır. Dedektörü aynı türde NaI (TI) sintilatör ile oluşturmak daha kolay olmasına rağmen, çözünürlük önceki tasarıma göre daha düşük çıkmıştır (Shirakawa vd. 2009).

Dung vd. (2009) çalışmalarında ağırlıklı olarak organik malzemelerden oluşan radyoaktif atık varillerini karşıt yönlerden iki adet dedektörle alınan ölçümlerin kullanıldığı bir teknik ile ölçmüşlerdir. Ölçüm sistemi simülasyonları yapılmış ve bu çalışmalar sonucu sistematik hatalar tespit edilmiştir. Bölümlenmiş gama tarayıcısı (SGS: Segmented Gamma Scanner), γ ile kirlenmiş atık bidonlarındaki düşük aktivite düzeyindeki izotopik kompozisyonun ölçümü ve tayini için geleneksel bir ölçüm sistemidir. Radyoaktif kaynağın bidon içerisinde düzgün şekilde dağılmaması, radyoaktif olmayan malzemelerin düzgün olmayan dağılımı (matris), parçacık büyüklüğü nükleer madde, özel olarak uranyum ve plütonyum deneyi, varil-dedektör mesafesi ve gürültülü veriler gibi faktörlerle bu tekniğin sistematik hatası büyük seviyelerde çıkmaktadır. Bu tekniğin incelenecek bidon sayısının genellikle çok fazla olmasından dolayı SGS ile ölçümlerinin pratikte mümkün olmaması, iki ölçüm sistemine ihtiyaç duyması gibi dezavantajları yanında varil içerisindeki malzemelerin ortalama bir doğrusal azalma katsayısına sahip olmaları ve ölçüm sisteminin basit olmasından dolayı her yerde kullanılabilir olması gibi avantajları da vardır.

Başka bir çalışmada ise γ radyasyon haritalaması ve kaynak lokalizasyonu için insansız hava sistemlerinin (UAS: Unmanned Aerial Systems) kullanılma potansiyelini araştırılmıştır (Gabrlik ve Lazna 2018). Havadan haritalama yöntemi, karasal radyasyon haritalandırmasına göre zaman ve maliyet açısından avantajlı bir sistemdir. Radyasyon yoğunluğunun, kaynak-dedektör mesafenin karesi ile orantılı olarak azalması sebebi ile UAS yere olabildiğince yakın uçmalıdır fakat arazi ve üzerinde bulunabilecek bitki örtüsünün irtifa farklılıkları sebebi ile bu gereksinimler sahada her zaman sağlanamamaktadır. Araştırmada gerçekleştirilen simülasyonlar, γ radyasyon haritalamasının karasal bir robot tarafından gerçekleştirildiği gerçek bir misyondaki çeşitli senaryolara dayanmaktadır. Bu çalışmanın performans karşılaştırması için daha önce gerçekleştirilmiş farklı kaynak pozisyonu ve uçuş yüksekliği senaryolarına sahip radyasyon haritalama simülasyonları kullanılmıştır. Çalışmalarda 0.1 litre hacimli silindirik NaI(Tl) sintilatör dedektör ile 35 MBq ve 350 MBq aktiviteli ^{137}Cs kaynakları kullanılmıştır. 50 m yükseklikte hiçbir ölçüm alınamamış ve 10 m yüksekliğin ölçüm için yeterli olduğu belirlenmiştir. Sunulan tekniğin özellikle zor bir topografik arazilerde oldukça faydalı olduğunu göstermiştir (Gabrlik ve Lazna 2018).

Bir diğer çalışmada Oregon State Üniversitesi'nde yere yakın uçuş yaparken radyasyon kaynaklarını bağımsız olarak aranabilmesi için, küçük bir insansız hava aracı sistemine monte edilmek üzere hafif, düşük maliyetli, çok panelli, yöne duyarlı bir radyasyon dedektörü tasarlanmış ve prototipi geliştirilmiştir (Becker ve Farsoni 2016). Dedektör algılayıcısı ayarlanabilir görüş açısı özelliğine sahip toplamda 16 adet BGO-SiPM panelden oluşmaktadır. Bu panellerin çıkış sinyalleri ise bir FPGA'da işlenmektedir. Algılanabilir minimum aktivite, 60 s'nin altında bir sürede 1 m mesafede 1.3 μCi aktiviteli ^{137}Cs test kaynağı kullanılarak hesaplanmıştır. Dedektör panellerinin sayma tepkisinin nispi standart sapması % 4.7 olarak karakterize edilmiştir ve bu değer de genel tasarım ve montajda iyi bir homojenlik göstermektedir. Dedektör ayrıca 2.3° ile cihaz merkezinden 100 cm'lik mesafedeki 12.3 μCi aktiviteli ^{137}Cs test kaynağının yönünü 60 s'de 10.8° güven aralığında % 95 doğrulukla tahmin edebilmektedir. Daire şeklinde yerleştirilmiş ve hepsi bağımsız olarak çalışan dedektör panelleri, verimlilik ve yön hassasiyetlerinin optimize edilebilmesi için yere göre açılarını dedektör panellerinin açısının merkezi dişli çubuğun dönüşüyle bağımsız olarak değiştirebilme kabiliyetine

sahiptirler. Her bir panelden kaydedilen sayım sayısı $D_i = R_i / \sum R_i$ denklemi yardımı ile "yön ağırlığına" dönüştürülür. Burada yön ağırlığı D_i ile ifade edilmiştir. Panellerden i . dedektörün sayım hızı ise R_i ile gösterilmektedir. Birincil bölgedeki paneller tarafından γ ışını akısının zayıflatılması sonucu kaynağa uzak olan ikincil bölgedeki panellerin yön ağırlık değerleri birincil bölgeye kıyasla daha küçük çıkmaktadır. Radyasyon yön tayini sisteminin ana bileşenleri dedektör panelleri ve dedektör panellerinin monte edildiği, eklemlerden oluşan montaj platformudur. Her panel bir adet algılayıcı komponentten ve $20 \times 45 \text{ mm}^2$ ebatlarında baskı devre üzerine yerleştirilmiş sinyal okuma devresinden oluşmaktadır. Algılama elemanı $25 \times 15 \times 8 \text{ mm}^3$ BGO sintilatör kristali ve yüzeye optik olarak birleştirilen MicroFB-60035 SiPM'den oluşmaktadır. Tespit elemanı Baskılı devre kartına (PCB: Printed Circuit Board) ışık sızdırmaz 3D baskılı bir muhafazanın içine yerleştirilmiş şekilde monte edilmiştir. SiPM çıkışı, bir ön yükselteç, bir karşılaştırıcıdan ve seri olarak ayarlanabilir eşik serisinden oluşan ön uç analog elektronik bloğuna bağlanır ve her paneldeki karşılaştırıcı çıkışları paralel olarak dijital sayma modülüne bağlanırlar. Radyasyonla olan her bir etkileşim sonucu ilgili panelin çıkışından bir lojik darbe gözlemlenir. Üç yön tahmin yönteminin doğruluk ve kesinlik açısından karşılaştırıldığı bu çalışmada ise eşleşen filtreleme yöntemi, simetri yöntemi ve maksimum olabilirlik tahmini yöntemi test edilmiştir. Bu yöntemlerin arasında eşleşen filtre yönteminin en iyi toplam birleşik doğruluğa ve hassasiyete sahip olduğu ve ardından maksimum olabilirlik yönteminin de neredeyse aynı şekilde performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Mafsallı dedektör panellerine sahip olmanın avantajlarından olan görüş açısının değişmesi, farklı aralıklara ve görüş açılarına sahip ölçümlerle de ispatlanmıştır. Görüş açısı cihazın yüksekliği ve mesafe ile doğrudan ilişkili olmamakla birlikte yön için dedektör paneli artikülasyonunun önemi de bu çalışmada gösterilmiştir (Becker ve Farsoni 2016).

“GEometry AND Tracking (Geometri ve İz sürme)” kelimelerinin kısaltmasından oluşan GEANT programı, madde içinden geçen ve etkileşen parçacıkların simülasyonları için hazırlanmış ve birçok uygulama alanına sahip Monte Carlo tabanlı bir simülasyon programıdır. GEANT, CERN tarafından hazırlanmış ve halen de geliştirilmekte olan bir simülasyon ve modelleme programıdır. İlk başlarda Yüksek Enerji Fizik deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanan program günümüzde

biyoloji, nükleer fizik, astrofizik, medikal fizik, hızlandırıcı fiziği gibi değişik alanlarda sıkça kullanılmaktadır.

Akkoyun (2013) tarafından yapılan çalışmada muhtemelen yeni bir kara deliğin doğumundan veya bir dev yıldızın ölümünden sonra oluşan gama ışını patlamaları (GRB: Gamma-ray bursts) gibi kozmik ışınların yönlerinin tayini için farklı yönlere bakan, birbirine dik durumda yerleştirilmiş üç kuadratik NaI (Tl) sintilatöründen oluşan sensör dizisi Geant yazılımı ile simüle edilmiştir. Bu üç dedektöre gelen kaydedilmiş sayımların farkına dayanan bir yöntem kullanılmıştır. Sistemde her bir sensörün sayımının toplam sayıya oranı baz alınmıştır. Yapılan simülasyon çalışmanın sonuçlarına göre γ ışınlarının geliş yönü ufak sapmalarla bulunabilmektedir (Akkoyun 2013).

Schemm vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada uzaysal olarak yerleştirilmiş üç adet NaI sensör kullanılmıştır. Çalışmada hesaplama ve işlemleri yapan analogdan dijitale dönüştürücü (ADC: Analog to Digital Conversion) bloğunu içeren elektronik bir ön kart tasarlanmıştır. Sistem üç sensörden gelen γ izotop spektrum genliklerini almakta ve bunları karşılaştırarak kaynağın yönünü bulmaktadır. Ana kartta 18 mikrometre kalınlığında düşük enerji sarfiyatlı Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor) işlemci kullanılmış, böylece saha çalışmasına uygun bir tasarım olmuştur. NaI kristaline bir γ ışını gelince çok miktarda foton yaymaktadır. Her bir 2×2 inç ebatındaki silindirik kristal sintilatör, 2 inçlik, %25 verimli bir foto çoğaltıcıya optik kuplajla bağlıdır ve foton miktarına orantılı olarak, birbirinden bağımsız şekilde her tüpten bir voltaj çıkışı elde edilir. Bu voltaj sinyalleri ADC bloğunda işlenir ve her tüpten gelen verilere göre yön tayin edilir. Çalışmada gömülü yazılım geliştirilmiştir. Kalibrasyon değerleri, 5 derecelik açılarla ^{137}Cs kaynağının kaydırılarak her sensörün çıkışının kaydedilmesi ve açısal pozisyona göre ölçüm eğrilerinin oluşturulması aşamalarından sonra hazırlanarak yazılıma yüklenmiştir. Bu verilerle yazılım kalibrasyon işlemini yapmakta, pik değerlerinden geliş açısını hesaplamakta ve lookup tablosundan faydalanarak uygun açısal değeri bulmaktadır. Sistem sadece deneyde kullanılan izotoplara duyarlıdır (Schemm vd. 2011).

2.1.4 Algoritma ve hesaplama temelli sistemler

Milechina ve Cederwall (2004) geri saçılma algoritması üzerine çalışmışlardır. Yeni geliştirilen Ge dedektör bölüntüleme ve gelişen dijital sinyal işleme teknolojisi ile birlikte γ ışını etkileşim noktalarının konumlarını ve bu noktalarda biriken enerjileri tanımlamaya imkân sağlanmıştır. Etkileşim konumu ve enerji bilgileri kullanılarak germanyum dedektör dizisinin soğurduğu γ ışınına ait yolların yeniden hesaplanması mümkündür. Etkileşim noktalarının bir iz boyunca biriken enerjilerinin toplamı γ ışınının ilk enerjisini verir ve bu da kinematik saçılma işleminin başlangıç yönü hakkında bilgi sağlar. Çalışmada birkaç γ ışını izleme algoritması geliştirilmiş ve geri izleme algoritması ile elde edilen yeniden yapılandırma işleminin sonuçları sunulmuştur. Ayrıca pozisyon belirsizliğinin, enerji bağımlılığının yeniden değerlendirilme sonuçları üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada tek fotoetkileşim olayının geri elde edilmesi işlemi üzerine çalışılmış, atom-elektron momentumunun rekonstrüksiyona etkisi ile geri izleme ve kümeleme algoritmalarındaki performans da tartışılmıştır (Milechina ve Cederwall 2004).

Wahl ve He (2011) tarafından yapılan çalışmada CdZnTe (CZT) dedektör üzerinden üç farklı zayıf kaynaktan gelen veriler toplanmış, ardından genelleştirilmiş benzerlik oran testi (GLRT: Generalized Likelihood Ratio Test) ile kaynak-yoğunluk testi (SIT) algoritmaları kullanılarak sonuçlar incelenmiştir. Görüntüleme sistemleri, yapılarından dolayı aynı zamanda yön bulma işlemini de gerçekleştirebilmektedir. Algoritma oda sıcaklığında 11×11 pikseli anot ve düzlemsel katotlu 20mm, 20mm, 15mm ebatlarında CZT kristalde denenmiştir. Tekli etkileşimler için enerji bilgisi, toplayıcı anottan ölçülen sinyal şiddet oranı ile tespit edilirken etkileşim derinliği değeri ise 1mm'lik bir hassasiyet ile katot- anot arası oran kullanılarak tespit edilebilmektedir. Tetiklenen anot elektrodu etkileşimin gerçekleştiği pikseli belirlemektedir. Çoklu etkileşimlerde ise veriler kayıt edilmektedir. Bu modelde iki pikselde gözlemlenen bir olay iki farklı şekilde gerçekleşebilmektedir: bir pikselde Compton saçılmasından sonra ikinci pikselde fotoelektrik olması, ya da farklı iki pikselde iki ardışık Compton saçılması olması ve bir fotonun kaçışının görülmesi. Bu iki olası model de sisteme eklenmiştir. Genelleştirilmiş benzerlik oran testi bir kaynağın ve arka plan gürültüsünün mevcut olduğunda gözlemlenen olayların görülme olasılıklarının istatistiği ile ilgilidir. Kaynak-

yoğunluk testi ise test istatistikleri belirli bir seviyenin altına düştüğündeki tespitlerin raporlanmasında benzerlikleri kullanmaktadır. Yapılan denemelerde sayma zamanı arttırıldığında ve kaynağın yönü bilindiğinde yanlış alarm oranının azaltıldığı ve doğru ölçüm oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. SIT algoritmasının, ticari yazılım olan Genie 2000'den (Canberra) daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Atık kaynak lokalizasyonu için Bayes temelli bir algoritma kullanan mobil gama spektrometrisi sisteminin fizibilite çalışması yapılmıştır. Yöntem, %123 verimlilik ve standart darbe edinme ayarlarına, sahip bir araca monte edilmiş bir HPGe dedektörü ve 180–470 MBq etkinlik aralığında üç tip γ kaynağı (^{137}Cs , ^{133}Ba ve ^{131}I) kullanılarak test edilmiştir. Kaynak etkinliği %51, kaynak konumları ise %29 başarımla bulunmuştur. Sonuçlar, özellikle tek bir kaynak olan ortamlarda, kayıp γ kaynaklarının bulunması için uygun bir sistem olduğunu ortaya koymuştur. Sistemin performansı, araç dedektör sisteminin sayım verimliliğindeki açısal değişikliklerin, GPS ünitesinden kaynaklanan gerçek belirsizlikler ve daha yüksek ve değişken arka plan radyasyon seviyelerinde farklı mesafelerde daha fazla kaynak içeren durumlarda algoritmanın performansı dikkate alınarak arttırılabilecektir (Bukartas vd. 2019).

Karafasoulis (2011) tarafından yapılan çalışmada konuma duyarlı, portatif, Compton saçılması temelli radyasyon cihazı olan Compton saçılması temelli radyasyon cihazı (COCAE: Cooperation across Europe for Cd(Zn)Te based security instruments) tarafından tespit edilen nokta radyoaktif kaynakları lokalize eden algoritmaların performansı ile ilgili simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Kaynak yönünün tahmini için bir görüntüleme algoritması olan Liste Modu Maksimum Olabilirlik Beklentisi Maksimizasyonu (LM-ML-EM: List-mode maximum likelihood expectation maximization) kullanılmıştır. Ayrıca, kaynak-dedektör mesafesi, her bir katmanının tespit edilen foto-pik sayısını kullanan üç farklı algoritma sayesinde, nirengi yöntemi ile yeniden yapılandırılmış, kaynak görüntünün kalitesi değerlendirilmiştir. Bu algoritmalar farklı yönlerde ve kaynak-dedektör mesafelerinde bulunan nokta radyoaktif kaynaklardan yayılan geniş bir enerji aralığında (200keV'den 2MeV'ye kadar), çok sayıda ($\sim 2 \times 10^9$) simüle edilmiş fotonlar ile değerlendirilmiştir. Cihaz, birbirinden 2 cm uzağa yerleştirilmiş 4 cm $\times$ 4 cm'lik bir alanı kaplayan pikseli Kadmiyum Tellurid (CdTe) kristallerinden yapılmış on paralel düzlemsel katmandan oluşmaktadır. Her

algılama katmanı iki boyutlu bir piksel dizisinden oluşur. Her dedeksiyon katmanı (100×100) $400\mu\text{m}$ aralıklı iki boyutlu bir dedektör dizisi olarak CMOS okuma devresine bağlanmıştır. Hem pikseller hem de okuma dizileri, baskı devre kartı katmanını destekleyen bir Al_2O_3 'ün üstüne yerleştirilmiştir. COCAE dedektör geometrisi Geant4 ile ara yüze sahip MEGAlib yazılımı ile özellikle Compton saçılımı ve Doppler genişleme etkisi ve diğer fiziksel etkileşmeler için Monte Carlo ile simüle edilmiş, bu sistem ile dedeksiyon verimi ve açısal çözünürlük ile kaynak- dedektör mesafesi tespit çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Nokta benzeri radyoaktif kaynaklar LM-ML-EM görüntüleme algoritması uygulanarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu algoritmada nokta kaynağın görüntüsünün oluşturulması için ilk etapta oluşan her bir Compton'a ait koni bir düzleme aktarılmaktadır. Bu verilerden en uygun ve olası kaynak dağılımı, arkadan yansıtılan görüntünün ardışık şekilde tekrar edilmesiyle üretilmektedir. Nokta kaynakların mesafe tahmininde nirengi yöntemi, tekrar oluşturulmuş kaynak görüntünün kalitesi yöntemi, dedekte edilmiş katmanlardan gelen foto-pik miktarı değeri yöntemi olmak üzere farklı yöntemler kullanılmıştır.

Kaynak yönü tahmini simülasyon çalışmaları, LM-ML-EM görüntüleme algoritması kullanılarak kaynağın görüntüsünü yeniden yapılandırılması sonucunda, 50 dereceye kadar eğim açıları için 1 dereceye kadar (hem azimut hem de eğimde) doğru bir şekilde değerlendirildiğini göstermiştir. Sistemin 2MeV'e kadar enerjili fotonlarda 2 metreye kadar kaynak-dedektör mesafelerini başarıyla tahmin edebileceğini gösterilmiştir. 1m'den daha uzak mesafelerde bulunan kaynakların yaydığı enerjileri 1000keV üzerindeki enerjiye sahip fotonların gerçekleştirdiği olaylarda hataları azaltmak için daha çok istatistiki hesaplama gerekmektedir. Kaynak ile dedektör arası mesafenin tahmininde kullanılmak üzere nokta radyasyon kaynaklarının tekrar oluşturulmuş görüntülerinin kalitesini baz alan farklı bir algoritma da bu kapsamda incelenmiştir. Sonuçlar, bu yöntemin yakın alandaki kaynak-dedektör mesafelerini (merkezinden ~30 cm kadar) doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir. Nirengi tekniğinden nokta benzeri kaynakların konumunun tahmin edilmesi için bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak nokta radyasyon kaynaklarının pozisyonlarının birkaç cm hassasiyet ile tespit edilebileceği görülmüştür (Karafasoulis 2011).

2.2 Temel Radyasyon Terminolojisi

Fotonlar durgun kütlesi olmayan, ışık hızında yol alan hem dalga hem de parçacık özelliği gösteren, $h\nu$ (h : Planck sabiti, ν : frekans) enerjisine ve h/λ (λ : dalga boyu) momentumuna sahip bozonlardır. Başlıca iyonlaştırıcı radyasyon türleri α , β ve γ ışımaları ile X ışınlarıdır. Radyoaktif dönüşümler genellikle içerisinde protonlar ile nötronların arasında bağların kuvvetli olmayan, uyarılmış durumdaki bir çekirdeğin dönüşmesi sonucu meydana gelir. Uyarılmış durumdaki protonlar ve nötronların en düşük enerjide olacak şekilde tekrar yerleşmeleri esnasında elektromanyetik radyasyon yayınlanır. Çekirdek kabuk modeline göre kesikli enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı γ fotonu olarak yayınlanır. Gama yayınlanması sadece uyarılmış çekirdeğin fazla enerjisini salma işlemi olduğundan ^{60}Co ve ^{137}Cs gibi γ yayınlayan atom hala aynı atom olarak kalmaktadır.

Fotonlar madde ile etkileştiklerinde enerji kaybı ve enerji değişimi oluşur. 1 keV'tan daha az enerjiye sahip γ ışınlarının dedeksiyonu ve ölçümünde, dedektör materyali içerisinde gerçekleşen bu enerji değişimi ve enerji kaybı etkileri kullanılmaktadır. Foton ve madde arası temel etkileşimler Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşumdur. Bununla birlikte enerji depolaması ve azalması ihmal edilebilecek Bragg saçılması, Rayleigh saçılması, nükleer rezonans ve fotobozunum gibi etkileşimler de yapmaktadırlar.

Radyasyon enerji birimi, bir elektronun 1 Voltluk potansiyel ile hızlandırılması sonucu kazandığı enerjiyi ifade eden elektron Volttur (eV). Aktivite birimleri ise sırasıyla Curie (Ci) ve Becquereldir (Bq). Işınlamada (poz) kullanılan doz birimleri Roentgen (R) ve Coulomb/kg'dır. Soğurulan doz için kullanılan birimler ise gray (Gy) ya da Rad'dır. Eşdeğer doz birimleri Rem ve Sievert (Sv)'tir (Ankara Üniversitesi 2020)

2.2.1 Efektif eşdeğer doz birimleri

Radyasyonun enerjisi, etkileşime girdiği maddede ne kadar değişiklik yaratabileceğini ifade eder. Aktivite birimlerinden Ci, bir saniyede 3.7×10^{10} parçalanma veren madde miktarını belirtirken diğer bir birim olan Bq ise saniyede bir parçalanma veren madde

miktarını temsil eder. Işınlama, iyonize edici X veya γ ışınlarının havada meydana getirdikleri iyonlaşma miktarına denir ve ışınlama doz birimleri olarak Roentgen ve Coulomb (C) kullanılmaktadır. İyonizasyon, atomda bulunan yörünge elektronlarının etkiye maruz kalan atomdan uzaklaşması olarak tanımlanır ve iyonizasyon sonucu atom (+) ve elektron (-) oluştuğunda bir iyon çifti oluşmaktadır. Roentgen 1kg hava içerisinde 2.58×10^4 C'luk yük üreten X veya γ radyasyonudur. 1 Roentgen, 2.58×10^4 C/kg'a eşittir. Soğurulmuş doz birimleri olan rad, dokunun 1 gramında 100 erg'lik enerji soğurulmasına eşittir. Diğer bir birim olan Gy ise ortamın 1 kg'lık kütlesi başına soğurulan 1 Joule'lük enerji olarak tanımlanmaktadır.

2.2.2 Eşdeğer doz birimleri

Bir canlı dokusu veya organın, etki eden radyasyonun ağırlık faktörü kullanılarak ortalama değeri hesaplanan dozu, eşdeğer doz olarak tanımlanır. Burada radyasyonun cinsine ve enerjisine bağlı olarak oluşturduğu biyolojik hasarı belirleyen doz birimi olarak efektif eşdeğer doz birimleri olarak rem kullanılır. 1 rem; $1 \text{ rad} \times \text{Faktör}$ olarak hesaplanırken diğer birim olan Sv ise $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{Faktör}$ olarak hesaplanır ve aralarında $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ bağıntısı bulunmaktadır. Radyasyonun doku üzerindeki etkisi soğurulmuş olan doza (rad), ışınımın enerjisine, cinsine ve ışımaya maruz kalan kısmın doku faktörüne bağlıdır ve efektif eşdeğer doz değeri ise doku ve ağırlık faktörleri ile rad değerinin çarpımı ile hesaplanır.

2.2.3 Radyoaktif bozunma

Radyoaktif bozunma, karasız çekirdeklerin kararlı hale geçerken dönüşüme uğraması ve çekirdekte bulunan fazla enerji sonucu buradan parçacık fırlatılması olarak tanımlanır. Çekirdekten salınan enerji de radyasyon olarak tanımlanır.

2.2.4 Radyasyon çeşitleri

Radyasyon başlıca iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. İçine girdiği ortamı iyonlara ayırtıran radyasyon türüne iyonlaştırıcı radyasyon denir. Bu radyasyon türü başlıca parçacık radyasyonu (alfa

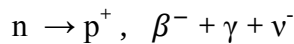
ışınları ve beta ışınları) ve elektromanyetik radyasyon (X ışınları, γ ışınları) olmak üzere sınıflandırılabilirler. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon türü ise kızılötesi, mor ötesi ışınlar, görünür ışık, radyo frekansı (RF) ve mikro dalgalar olarak sayılabilirler.

Elektromanyetik spektrumdaki ışınlar sahip oldukları enerjiye göre radyasyon ışınları ve proton ve nötron fazlalığında alfa parçacığı olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

Alfa ışıması, ağır radyoizotopların kararlı izotopa dönüşmeleri esnasında proton ve nötron sayılarından 2'ser, kütle sayısı da 4 azalarak ${}^4_2\text{He}$ çekirdeği salımıyla oluşmaktadır. Havadaki menzili 4, 5 cm arası olup enerjiye bağlı olarak değişmektedir. İyonlaştırma gücü en yüksek parçacık olmakla birlikte manyetik alanda içinde sapma gösterirler. Giriciliği az olan bu ışıma ince bir materyal ile durdurulabildiğinden cilde girememektedir ve sadece solumun yoluyla bulaşır. Enerjisi 4 ile 9 MeV arasında olup hızları yaklaşık 1.5×10^{-7} - 2.2×10^{-7} m/s arasındadır.

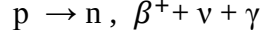
Beta parçacığı nötron fazlalığında oluşan Negatron (β^-) ve proton fazlalığında oluşan Pozitron (β^+) olmak üzere iki türe sahiptir. Nispeten daha az iyonlaştırıcı özelliğe sahip olan beta ışıınımları manyetik alanda saparlar ve yaklaşık ışık hızında hareket ederler. 1 MeV enerjili bir β ışını dokuda yaklaşık olarak 0.42 cm ilerler ve doku içerisinde soğurulurlar. Giriciliği yaklaşık alfa ışıınının yüz katıdır ve enerjileri 0.2 ila 2 MeV arasındadır.

Negatronlar (β^-) çekirdekdeki nötron fazlalığı sebebi ile doğal radyoizotoplar tarafından yayınlanır. Işıma esnasında fazla nötronlar (n) protona (p^+) dönüşürler ve bunun sonucu β^- yayınlanırken atom numarası 1 artar ve atom ağırlığının sabit kaldığı tür olan izobarik bozunma gözlemlenir. Işıma şu şekilde ifade edilebilir:



Nötron protona dönüşürken, pür beta yayıcılar da tüm enerji negatrona ve nötrinoya aktarılırken diğer beta yayıcılar da enerji negatrona (elektrona) ve çekirdek merkezinde bulunan yüksüz ve hemen hemen kütesiz nötrinoya aktarılır ve kalan enerji ise γ ışını olarak yayınlanır.

Pozitron (β^+) çekirdek yapısındaki proton fazlalığından dolayı yayınlanır ve bu esnada fazla protonlar ise nötrona dönüşürler. Pozitron yayınlama ve elektron yakalama sonucu atom numarası 1 azalırken, atom ağırlığı parametresi sabit kalır. Bozunum şu şekilde ifade edilebilir:



Gama bozunumu sonucu ortaya çıkan γ ışını 1 ila 3 MeV arasında yüksek enerjiye sahip olabilirler ve ışık hızında hareket ederler. Çekirdekte alfa ve beta ışımlarından sonra, atom ağırlığı ve nötron sayısının değişmediği, izomerik geçiş esnasında yayınlanırlar. Yüksüz oldukları için manyetik alanda sapma göstermezler ve giricilikleri çok fazladır. Bununla birlikte iyonize edicilikleri düşüktür ve durdurmak için genellikle enerjilerine göre değişen bir kalınlıkta kurşun kullanılarak durdurulurlar. Geçtikleri ortama enerji aktarırlar ve boşlukta düz bir çizgi boyunca yayılırlar. Gama ışınları; radyoaktif bozunma, bir parçacık ile onun, karşıt parçacığının birbirlerini yok etmesi, yüksek enerjili bir parçacık ile başka parçacığın çarpışması ve ivmelendirilmiş yüklü parçacıklar sonucu açığa çıkarlar. Gama ışınlarının ölçümünde, γ ışınlarının dedektördeki algılayıcı madde ile arasında gerçekleşen enerji aktarımı ve bunun sonucu oluşan enerji kaybı niceliklerinden faydalanılmaktadır. Ayrıca enerjinin tespitinde, gelen γ fotonu ile meydana gelen ikincil parçacıkların yönü arasındaki açısal ilişkiden de faydalanılmaktadır.

Gama ışını ile benzer özelliklere sahip olan X-ışınları yörüngelerden yayınlanırlar elektromanyetik dalga yapısındadır ve manyetik alan içinde sapma göstermezler. X-ışınları Bremsstrahlung ve karakteristik X-ışını üretimi ile oluşturulurlar. Enerjileri yaklaşık 1 MeV civarındadır.

2.2.5 Radyasyonun madde ile etkileşimleri

Radyasyon türlerinin madde ile etkileşimleri, yüklü parçacıkların (pozitron, alfa ve negatron,) ve fotonların (X ve γ) etkileşmesi olarak değerlendirilebilir.

2.2.5.1 Alfa parçacığının madde ile etkileşmesi

Alfa parçacığı nötr hale gelebilmek için madde ile etkileşmesi esnasında atomlardan elektron koparmaya çalışır. Elektronu koparacak kadar enerji verilmişse iyonizasyon oluşmaktadır, aksi takdirde uyarılma oluşur. Elektron aldığı kadar enerjiyi X-ışını ile geri verir ve ardından eski (taban) durumuna geri döner. İyonizasyon işlemi sonucu (+) yüklü atom, koparılan (-) yüklü elektrondan oluşan bir iyon çifti ortaya çıkar. Bu etkileşme alfa parçacığının enerjisi tükenene kadar sürer.

2.2.5.2 Negatronun (β^-) madde ile etkileşmesi

Negatronun (β^-) madde ile etkileşmesinde Alfa parçacığı gibi iyonizasyon, uyarılma ve bremsstrahlung gözlenebilmektedir. Hafif ve negatif yüklü beta yörüngelerle etkileşme esnasında büyük sapmaya uğrar ve elastik çarpışmalar yaparak enerjisini elektrona aktarır ve onu yörüngesinden koparır. Bu etkileşim negatron tüm enerjisini kaybedene kadar sürer.

2.2.5.3 Bremsstrahlung (frenleme ışını)

Röntgen tüplerinde X ışını elde edilmesinde de kullanılan Bremsstrahlung, yüksek enerjili negatronun çekirdek yakınından geçerken kuvvetli çekim alanı sebebi ile yavaşlaması ve parçacığın doğrultusunun değişmesi esnasında kaybedilen enerjinin X-ışını (frenleme ışını) şeklinde dışarı atılmasıyla oluşmaktadır.

2.2.5.4 Pozitronun (β^+) maddeyle etkileşmesi

Pozitronun (β^+) madde ile etkileşmesi esnasında iyonizasyon, eksitasyon, Bremsstrahlung ve anihilasyon olayları meydana gelir. Anihilasyon olayı, (+) yüklü pozitron ile (-) yüklü bir elektronun çarpışması sonucu, mevcut kinetik enerjilerini tamamen kaybetmeleri ve her iki kütlelerin de tamamen yok olmasıdır ve ardından birbirine zıt yönde iki adet 511 keV enerjiye sahip foton salınır.

2.2.6 Fotonların madde ile etkileşmesi

Fotonların madde ile etkileşmeleri sonucu bir sonraki alt başlıklarda da açıklandığı üzere Compton ve Thomson saçılmaları, çift oluşum ve fotoelektrik olay gözlemlenmektedir.

2.2.6.1 Compton ve Thomson saçılmaları

Nispeten daha yüksek enerjiye sahip bir foton, atomun dış yörünge elektronlarından birisine bir kısım enerjini aktararak onun yörüngeden fırlamasına sebep olur ve ardından kendisi de kalan enerjisi ile belirli bir açıda saçılır. Bu saçılma esnasında oluşan enerji kaybı, kinetik enerji olarak elektronlara transfer edilir. Yörüngeden fırlayan bu elektrona Compton elektronu adı verilir. Foton enerjisi ($E\gamma$), saçılan foton enerjisi ($E\gamma'$) ve saçılan elektron kinetik enerjisi (T_e) olmak üzere kinetik enerji $T_e = E\gamma - E\gamma'$ bağıntısı ile ifade edilir. Thomson saçılması ise Compton saçılmasının basit bir türüdür. Bu saçılma esnasında gelen fotonun enerjisi olay esnasında saçılan fotonun enerjisi birbirlerine eşittir. Bununla birlikte saçılma sonrasında saçılan fotonun yönü değişmektedir.

2.2.6.2 Çift oluşum

En az 1.022 MeV' lik yüksek enerjiye sahip bir foton çekirdek alanından geçerken bir (+) bir de (-) elektrona ayrılırlar. (-) elektron, beta ışını gibi madde ile etkileşir ve ardından (+) elektron kısa bir zamanda içerisinde (-) elektronla birleşerek bu defa da yok olma olayını gerçekleştirirler. Çift yok olmada önce enerji maddeye ardından da madde enerjiye dönüşmektedir. Özetle foton madde etkileşimlerinde düşük enerjili fotonlar için ve büyük Z numaralı atomlardan oluşan maddelerde fotoelektrik olay baskın olmaktadır ve foton enerjisi arttıkça, soğurulma olasılığı azalacağı için soğurulma yerine Compton saçılmasına uğrayarak saçılacaktır. 5 MeV 'un üzerindeki enerjiye sahip fotonlarda ise çift oluşumu olayı daha sık görülmeye başlayacaktır.

2.2.6.3 Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olayda gelen bir foton enerjisinin tümünü K yörünge elektronlarından birine aktarır ve elektronu fotoelektron olarak bulunduğu yörüngeden fırlatır. Yörünge elektronları tekrar bir düzene girerken bu esnada karakteristik X-ışını salınımı ya da Auger elektronu olayı oluşur. Bu işlemin gerçekleşebilmesi için gelen fotonun enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden daha büyük olması gerekmektedir.

Gelen γ fotonunun enerjisinden (E_γ), elektronu uyarma enerjisinin (E_b) çıkarılması ile fotoelektronların kinetik enerjisi (T_e), hesaplanmaktadır ($T_e = E_\gamma - E_b$). Fotoelektrik soğurma olasılığı artan foton enerjisi ile azalma gösterirken, soğurucu atomun Z sayısı ile artış göstermektedir. Enerji ve çizgisel momentumun korunumu kullanılarak saçılan elektronun kinetik enerjisi **Eşitlik 2.1** ile hesaplanır:

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma 2(1 - \cos \theta)}{mc^2 + E_\gamma(1 - \cos \theta)} \quad 2.1$$

Etkileşimin ardından meydana gelen X-ışını veya iç tabakada oluşan boşluğu doldurmak için gelen dış tabaka elektronu bir diğer elektrona çarparak onun yörüngesinden dışarı fırlatırsa, fırlayan bu elektrona Auger elektronu ismi verilir.

Bu ışınlardan γ ışınları alfa ve beta ışımlarına göre havada daha az soğurulmaktadırlar. Ayrıca enerjileri hassas şekilde ölçülebilmekte ve daha kolay gözlemlenebilmektedirler. Menzilleri de alfa ve betaninkine oranla kıyaslanamayacak kadar fazladır. Duyu organları ile hissedilemedikleri için genellikle ölçümleri dedektörler vasıtası ile gerçekleşir. Gama spektrometre sistemleri ölçülen maddelerin radyoaktif olup olmadıklarını tayin eder ve eğer radyoaktif iseler bu maddelerin aktivitelerinin seviyesini ve izotopun türünü belirlemeye yardımcı olurlar.

2.3 İyonize Edici Radyasyon Dedektörleri

Radyasyon ölçüm sistemleri radyasyonun dedeksiyonu, soğurulan dozu veya ışınlamayı ölçmek için kullanılan, genellikle taşınabilir yapıda olan, radyasyon kaynağının tanımlanmasını ve miktarının hassas şekilde tespit edilmesine imkan veren, başlıca gaz

dolu odacıklar ve kristal malzemeler olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılabilen ölçüm cihazlarıdır. İyonize radyasyon tespiti için kullanılan dedektörler genellikle radyasyonun dedektöre girerek algılayıcı atomları ile etkileşmesi ve bu etkileşmeler esnasında mevcut enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybetmesi ve bu sayede atom yörüngelerinden daha düşük enerjiye sahip elektronların salınması prensibi ile çalışmaktadırlar. Ardından oluşan bu elektronlar toplanırlar ve muhtelif elektronik devreler yardımıyla akım ya da voltaj darbesine dönüştürülerek analiz edilirler. Dedektörde kullanılacak algılayıcı seçimi, ölçülecek radyasyonun türüne ve tipine göre yapılmaktadır. Işınlara ölçümünde genellikle, ışınların kullanılan algılayıcı materyal içinde iyonlaşarak enerjilerini kaybetmeleri prensibine göre çalışan yarıiletken dedektörler ve sintilasyon dedektörleri tercih edilmektedir.

2.3.1 Gazlı dedektör sistemleri

Bu tip dedektörlerin genel çalışma prensibi, gaz dolu bir odacık, odacığın duvarı ile odacık eksenine yerleştirilmiş elektrot arasında elektrostatik alan oluşturulması ve radyasyonun bu gazlar tarafından soğurulmasının sonucunda pozitif iyonlar ve elektronlar şeklinde iyon çiftleri üretilmesi ve bu iyon çiftlerinin elektriksel bir sinyale çevrilmesi için toplanarak güçlendirilmesi şeklindedir. Gaz basıncı 1 atm'den başlayıp etkileşim sayısını arttırmak için daha yüksek seviyelerde de kullanılabilir. Uygulanan potansiyel miktarı arttıkça toplanan iyon sayısı da artış gösterir. Toplanan iyon sayısı ya da darbe yüksekliği voltaj artışına göre değişiklik gösterir ve artan voltaja göre sırasıyla ölçülen akımın iyonlaşma miktarıyla ilişkili olduğu iyonlaşma bölgesi, oluşan iyon çiftlerinin miktarının birincil iyonizasyonda meydana gelen çiftlerle orantılı olduğu bölge olan orantılı bölge, gaz çoğaltım etkisinin hızla artması sonucu artan elektron çığının birbirleriyle etkileştiği sınırlı orantı bölgesi ve düz plato bölgesinden oluşan GM bölgesi adında farklı çalışma bölgeleri mevcuttur.

İyon odası sistemleri iyonize edici radyasyonla serbest kalan elektronların tamamını sayar. Akım darbesi iyonlaşma miktarıyla doğru orantılıdır. Burada toplanan yük miktarı kullanılarak radyasyon ışınlama miktarı belirlenebilir.

Orantılı bölgede çalışan sistemler başlangıçtaki iyonlaşma ile orantılı bir darbe üreten yük artışının tespitinde kullanılırlar. Alfa ile beta parçacıklarının darbe tipi ölçümü sayesinde parçacıklar ayırt edilebilirler.

GM tipi sayaçlar ise dedektöre giren her parçacığın bir çığ boşalmasına yol açtığı plato bölgesinde çalışırlar ve genellikle beta ve γ dedeksiyonu için kullanılırlar. Genellikle düşük basınçta %10 etil alkol ve %90 argon gazı ile doldurulurlar ve 800-2000V arası bir potansiyel fark altında çalışırlar. GM tüpleri radyasyonun enerjisini veya tipini belirlemek için kullanılmazlar.

2.3.2 Sintilasyon dedektör sistemleri

Sintilatörler, yüksek enerjili yüklü parçacıklar gelerek kendisine çarptığında parıltı yaparak görülebilir dalga boylarında, düşük enerjili fotonlar yayınlayan kristal malzemelerdir. Gama dedeksiyonunda kullanılırken ışının kendisini algılamak yerine γ ışınlarının ürettikleri yüklü parçacıklar sintilatör ile etkileşirler. Bu etkileşimler sonucu kristalin ürettiği düşük enerjili fotonlar, foto çoğaltıcı tüp adı verilen aygıtta toplanırlar. Işığa duyarlı katoda çarpan fotonlar enerjileri ile orantılı olarak fotoelektrik olay yolu ile katot tarafından az miktarda foto elektron salınmasına sebep olurlar. Elektrik alan sayesinde fotoelektronlar dinot (dynode) adı verilen metal bir plakalara doğru hızlandırılarak dinot'lara çarptırılırlar ve bu sayede hızlanan elektronlar birçok yeni elektronun salınmasını sağlarlar. Her elektrona karşılık yaklaşık 4 ikincil elektron üretilir. Elektronlar çoğalarak bir öncekinden daha yüksek potansiyelde olan bir sonraki dinota hareket ederler. Ortalama bir foto çoğaltıcı tüpte yaklaşık 10 ila 12 arası dinot bulunur son dinottan kristale gelen γ fotonunun enerjisi ile orantılı, belirli bir oranda yükseltilmiş bir çıkış voltajı elde edilir.

Sintilatörler organik veya inorganik malzemeler olabilirler. Gama ışın dedeksiyonunda genellikle sezyum iyodür (CsI) veya alternatif olarak sodyum iyodür (NaI) gibi alkali halinde tuzlardan oluşan inorganik materyaller kullanılmaktadır. Bu maddelere foton yayınlama olasılığının yükseltilmesi ve aynı zamanda ışığın kendisinin soğurulmasının azaltılması amacı ile aktivatör (aktifleyici) denilen malzemeler katkılanır ve bu, katkılandırma işlemine de dopping denir. Aktivatör olarak çoğunlukla talyum ve

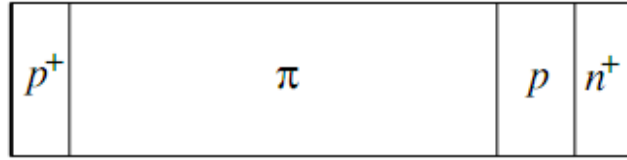
sodyum kullanılmaktadır. Dedektörler isimlendirilirken talyum aktifleyici ile sodyum iyodid kristali NaI(Tl), sodyum aktifleyici ile sezyum iyodidi CsI(Na) şeklinde tanımlanırlar. Sodyum iyodür yüksek verimle ölçüm alabilir ve yaklaşık 0.25µs darbe çözme zamanı vardır. Plastik sintilatörlerin birkaç mikro saniyeye kadar çözme zamanları vardır fakat düşük enerjili fotonları saptayamazlar ve ışık çıktıları ile enerji bağımlılıkları doğrusal değildir.

2.3.3 Yarıiletken dedektör sistemleri

Yarıiletken dedektörler, fazla miktarda negatif yük (elektron) içeren n tipi materyaller ve pozitif yük (deşik) taşıyıcıları içeren p tipi materyallerin eklem olarak adlandırılan birleşiminden oluşan elektronik komponentlerdir. Ters besleme uygulandığında dedektör içerisinde elektronlardan vedeşiklerden arındırılmış, hassas bir bölge meydana gelir. Yüksek verimli bir dedektör için hassas bölgenin derin olması gerekmektedir. Bunun sağlanması için oldukça saf bir madde gerekmektedir. Fotonun bu eklem yapısından geçmesi esnasında bir elektron, valans bandı seviyesinden iletim bandı seviyesine yükseltilir. Bundan sonra bir elektron-deşik çifti meydana gelir. Eklem içerisindeki elektrik alan sayesinde elektronlar eklem pozitif kısmına,deşikler ise negatif kısmına doğru sürüklenirler. Bu esnada bir sayıcı devresi yardımı ile sayılabilen bir puls (darbe) oluşur. En sık kullanılan yarıiletken dedektör türleri Ge(Li) ve Si(Li) dedektörlerdir.

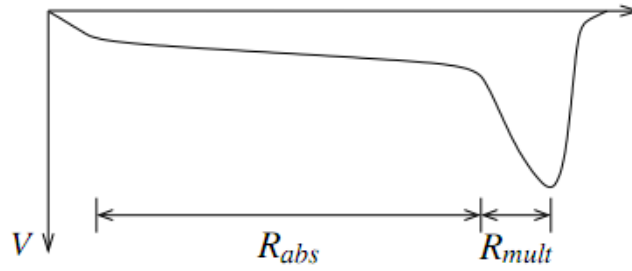
Yarı iletkenlerde elektron-deşik çifti oluşturmak için gerekli enerji yaklaşık olarak 1 eV'tur ve bu enerji seviyesi de bir sintilatörde iyonizasyon oluşturması için gerekli enerjiden daha düşüktür. Bu sayede soğurulan her bir foton için çok sayıda yük taşıyıcı oluşur ve çok kanallı analizörler kullanılarak gelen fotonun enerjisi hassas şekilde tespit edilebilir. Bu işlem için genellikle yüksek verimli saf germanyum dedektörler kullanılmaktadır. Yarıiletkenler sintilatörlere göre daha yüksek çözünürlükleri ve nano saniye mertebesinde daha hızlı darbeler üretmeleri sayesinde daha avantajlıdırlar. Lityum katkılı germanyum (Ge(Li)) dedektörleri termal gürültünün azaltılması ve oda sıcaklığında bozuldukları için sıvı azot sıcaklığında kullanılmakta ve depolanmaktadır. Bu dezavantajlarından dolayı Ge(Li) yerine artık oda sıcaklığında muhafaza edilebilen germanyum dedektörler tercih edilmektedir. Ayrıca spektrum analizinde yine yüksek

orantılı olması sayesinde çığ tipi diyotlar spektroskopide de kullanılabilirler. Dedektör **Şekil 2.1**'deki gibi yüksek şekilde katkılandırılmış p katmanı ve n katmanı arasına sandviç edilmiş yerleştirilmiş safsız (veya hafifçe katkılandırılmış p tipi (π) materyal) maddeden oluşmaktadır.



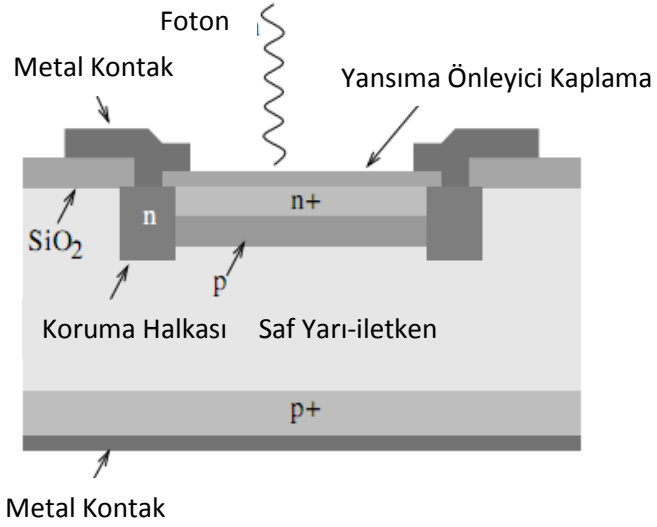
Şekil 2.1 ığ tipi fotodiyot eklem gösterimi

İki uca yüksek elektrik alan uygulandığında bir elektrik profili oluşmaktadır (**Şekil 2.2**).



Şekil 2.2 ığ tipi fotodiyot besleme V profili. R_{abs} : soğurma bölgesi, R_{mult} : Çarpma bölgesi

Bu elektrik alan profiline göre soğurma bölgesinde R_{abs} gelen radyasyon yük çiftleri oluşturur ve çiftler elektrik alan altında zıt yönlerle hareket ederler. Çarpma bölgesi R_{mult} ise elektronlar yüksek elektrik alan şiddetiyle p bölgesine hareket ederek çığ olayını bu bölgede oluşturmaktadırlar. Bu hareket sonucunda çıkışta bir voltaj sinyali gözlenmektedir. **Şekil 2.3**'te çığ tipi diyotun yapısı gösterilmektedir. Elektriksel kırılma ihtimaline karşı Guard Ring yerleştirilmiştir.



Şekil 2.3 Çığ tipi fotodiyodun yapısı

2.4.1.1 İstenilen temel karakteristikler

Küçük kaçak akımı: Çığ tipi foto diyotlarda çok az kaçak akımı olmasına rağmen bu akım çığ etkisi ile yükseltilerek çıkışta voltaj oluşmasına ve dedektör çıkışında doğrusal olmayan tepkiler gözlemlenmesine sebep olmaktadır.

Yüksek kazanç: Dedektörün hassasiyeti için 10^8 mertebesine kadar çıkabilen yüksek kazanç istenmektedir. Daha düşük hassasiyet gerektiren uygulamalar için elektrik alan seviyesi düşürülmektedir.

İyi frekans tepkisi: Uygulamada özellikle yüksek oranlı çalışmalarda iyi frekans tepkisi istenmektedir.

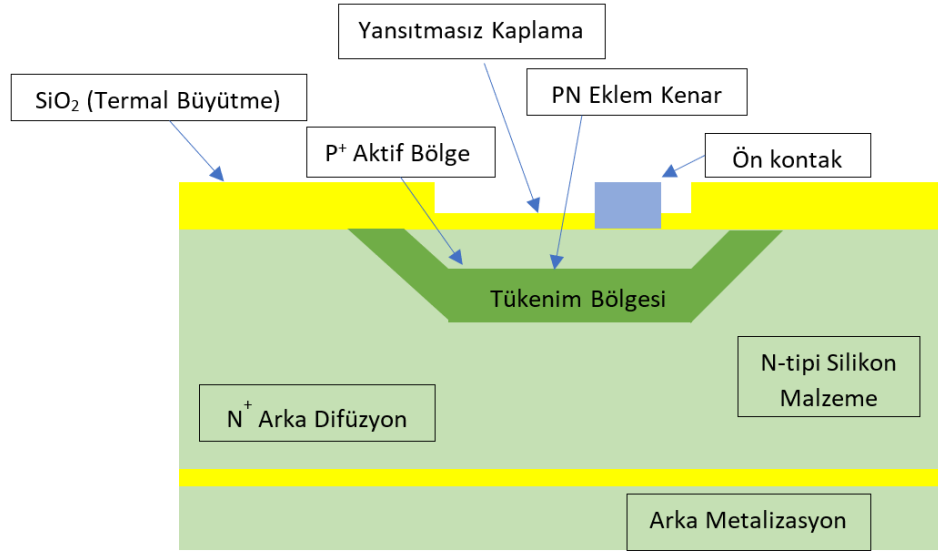
2.4.1.2 Çalışma modları

Çığ tipi foto diyotlar doğrusal ve GM modlarında çalışabilmektedir. GM modunda yeterli ters besleme voltajı uygulandığında foton tarafından madde içinde oluşan bir yük çifti yüksek bir akım darbesi meydana getirebilmektedir. Bu modda çalışması esnasında istenirse dedektör, PMT cihazına benzer şekilde bir foton sayıcı olarak kullanılabilir. Bu modun dezavantajı, oda sıcaklığında bile görülebilen karanlık akımıdır. Bunun azaltılması için sistemlerin düşük sıcaklıklarda çalıştırılmaları

gerekmektedir. Silikon çığ tipi foto diyotlar çok düşük karanlık akımına ve yüksek foton sayma kabiliyetine sahiptirler. Darbe çözünürlükleri 20ps civarında olabilmektedir ve 10^8 gibi bir kazanç seviyesi ile %80 gibi bir kuantum verimine ulaşabilmektedirler.

2.4.2 Si-PIN fotodiyot yapısı

Si-PIN fotodiyot yapısı **Şekil 2.4'** te gösterildiği gibi N-tipi silikon malzeme üzerine ön yüzeyde boron iyonu implante edilmiş ince bir P tabakası oluşturulmasıyla imal edilir. Sistemin geometrisi ise silikon dioksit pencereler kullanılarak aşındırma işleminin yapıldığı polithografik yöntemler ile oluşturulur. P tabakasının kalınlığı, tespit edilecek radyasyonun dalga boyu tarafından belirlenir. P ve n tipi katmanlarının arasındaki eklem bölgesinde intrinsik (içsel) iletken katman büyütülür ve ardından ön taraftaki anot ve tüm arka kısımdaki katot üzerine metal kontaklar yapılırlar. Ohmik kontağı iyileştirmek için N^+ katkılandırılması yapılır. Silikon nitrür, silikon monoksit/dioksit gibi malzemelerden kalınlığı belirli dalga boyu için optimize edilmiş yansımaya önleyici kaplama malzemesi kaplanır.



Şekil 2.4 Fotodiyot yarıiletken malzeme yapısı

Silikon fotodiyotlar genellikle 250nm ile 1100nm dalga boyu aralığındaki ışığı soğururlar. İçsel bölgede çok az miktarda yük taşıyıcısı vardır. Uzay yükü bölgesi P bölgesinden N bölgesine doğru uzanır. Bir foton geldiğinde elektronları uyarır ve bunun

sonucunda (e ve o) yük taşıyıcılar meydana getiriler. Yük taşıyıcıları, bir konsantrasyon gradyanı tarafından yönlendirilen p-n eklemi boyunca difüze olurlar. Bu gradyan eklem boyunca dahili bir iç elektrik alanı üretir ve elektronları N tarafına ve deşikleri de P tarafına doğru yönlendirir. Tükenim bölgesinin dışındaki yükler rastgele hareket ederlerken tükenim bölgesi içinde olanlar hızla yönlendirilerek elektrotlarda küçük bir foto akıma sebep olurlar.

Fotodiyotlar X ve γ ışını fotonlarının dedeksiyonu için kullanılabilirler. Kuantum verimi (QE: Quantum Efficiency)

$$QE = \frac{I_{foto}}{I_{ışık}} \quad 2.2$$

bağıntısı ile verilebilir. Burada, I_{foto} foton şiddeti ve $I_{ışık}$ ise ışık şiddetidir. Dedeksiyon verimi silikon pulun veya tükenim bölgesinin kalınlığının artışı ile artış gösterir. Üretimde yarı iletken katkılandırma miktarı ile değişirken üretim sonrası kullanımda harici bias gerilimi uygulanması ile verimlilik değiştirilebilmektedir. Çoğu foto diyotlarda, örneğin 300 μ m pul kalınlığı için verimlilik 10 keV enerjide %100 iken 150 keV enerjide %1'e düşmektedir. 60 keV 'den büyük enerjiye sahip γ fotonlarının etkileşimleri neredeyse tamamen Compton saçılımı şeklinde olmaktadır.

Kuantum verimi (QE), çıkış sinyalinin oluşmasına katkısı olan fotonların, gelen fotonların sayısına oranının yüzdesi olarak ifade edilir ve fotodiyotun hassasiyetini belirten önemli bir parametredir. 800-900nm dalga boyu bölgesinde çalışan silikon dedektörler için kuantum verimi genellikle %80 seviyesindedir (Vishay Intertechnology Inc. 2021).

Diğer bir parametre olan duyarlılık ($R\lambda$) ise fotodiyot akımının amper cinsinden değerinin gelen aydınlatmanın Watt birimden değerine oranı olarak da ifade edilmektedir. Duyarlılık, **Eşitlik 2.3** ile verildiği şekilde, QE'nin elektron yükü e ile çarpılması ve belirli bir dalga boyu için foton enerjisine bölünmesi ile bulunabilir:

$$R\lambda(A/W) = \frac{QE(\%) \times \lambda}{124} \quad 2.3$$

Bu ilişkiye göre dalga boyu kısaltıkça duyarlılığın azaldığı görülmektedir. Silikon fotodiyotlarda 1.1 µm dalga boyunu üstündeki fotonlarda, fotonun enerjisi elektronu silikon boşluk bandından karşıya geçirmeye yetmeyeceği için kesilim görülmektedir. Fotonun soğurulma olasılığı, dalga boyunun artmasıyla hızlıca azalmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla soğurma katsayısı da artmaktadır ve dalga boyunun artmasıyla duyarlılıkta da artış gözlenir.

Nüfuz etme derinliği dalga boyuna karşı değiştiği için kullanım açısından farklı tasarımların oluşmasına sebep olmaktadır.

Kullanılacak dalga boyuna göre, örneğin mavi ve ultraviyole gibi düşük dalga boyları için sıg eklemeler kullanılırken yüksek dalga boylu işlemler için daha derin tüketim bölgesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sağlanması için yüksek dirence sahip silikon pullar, yüksek çalışma voltajları ile birlikte kullanılırlar. Ayrıca yüzeyleri, gelen dalga boyunu maksimum soğuracak şekilde bir tabaka ile kaplanmaktadır.

2.4.3 Tepki hızı

Fotodiyot kullanılan çoğu uygulamada genellikle dinamik performans istenmektedir. Fotodiyodun tepki süresi, yük toplama süresi ve seri yük direnci ile eklem ve kaçak (stray) kapasitans değerlerinin toplamından oluşan RC zaman sabiti değerinin quadrature (kareleme) bir toplamından oluşmaktadır.

Önemli bir parametre olan yük toplama hızı, büyük ölçüde voltaja bağlıdır ve elektron ile deşiklerin, elektrik alanın etkisi altında tüketim bölgesinden kendi sürüklenme hızlarına göre geçişleriyle oluşmaktadır. Tüketim bölgesi dışında soğurulan fotonların enerjileri, difüzyon ile toplanan ve nispeten yavaş hareket eden taşıyıcılar oluşturmaktadırlar.

Hızlı tepki süresi elde etmek için, silikon direnci ve çalışma voltajı parametreleri, çalışılacak dalga boyunda üretilecek taşıyıcıların çoğunluğunu kapsayacak bir tüketim bölgesi genişliği verecek şekilde seçilmelidir.

Sürüklenme hızı, elektrik alan kullanılarak artırılabilir. Bu tür yapılarda tüketim bölgesi, sadece gereken tüketim derinliği olacak şekilde azaltılmıştır ve ayrıca yüksek voltajlarda tüketim alanına gereken yükün sağlayabilmesi amacı ile yüksek seviyede katılandırılmış bir arka tabaka mevcuttur. Bu sayede taşıyıcı sürüklenme hızı ve çalışma alanı, tüketim derinliğinde herhangi bir artış yapılmasına gerek olmadan yükseltilebilmektedir. Hızda daha büyük artışlar sağlanması için hassasiyet dezavantajına rağmen, gelen radyasyonun tamamını soğurmaya yetecek kalınlığa sahip olmayan silikon kullanılabilir.

Eklem kapasitansı paralel plakalı kapasitöre benzer şekilde düşünülebilir. Plakalar arası uzaklık, uygulanan voltaja bağlıdır. Bu sebeple kapasitans, eklem alanıyla doğru orantılıdır ve tüm tüketim gerçekleşene kadar bias besleme geriliminin artırılması sonucu değeri azalmaktadır ve **Eşitlik 2.4** ile ifade edilir:

$$C_j = 1.06A \frac{pF}{W} \quad 2.4$$

Burada $A \text{ cm}^2$ ve W cm birimindedir. Uygulamada yanıt süresi, devredeki dedektör kapasitansı, seri direnç ve yük direncinin kombinasyonundan kaynaklanan RC zaman sabiti ile sınırlıdır.

2.4.4 Minimum dedekte edilebilir güç

Bir fotodiyottaki toplam gürültü akımına eşdeğer bir fotoakım yaratacak gelen minimum güce, gürültü eşdeğeri güç (Noise Equivalent Power, *NEP*) denir ve matematiksel olarak **Eşitlik 2.5** ile ifade edilir:

$$NEP = \frac{RMS \text{ gürültü akımı}}{Fotodiyod duyarlılığı} \left(\frac{A}{A/W} \right) \quad 2.5$$

NEP, ölçüm sisteminin bant genişliğine bağlıdır. Watt/ Hz ^{1/2} birimi ile ifade edilen *NEP* yoğunluğu, gürültü figürünün bant genişliği değerinin kare köküne bölünmesi ile hesaplanarak ve bant genişliğinden bağımsız hale getirilir. Böylece, güç-akım dönüşümü dalga boyuna bağlı bir parametre olduğu için *NEP* genellikle dalga boyu ile birlikte ifade edilmektedir.

Ters beslemedeki bir silikon fotodiyotta üretilen toplam gürültü, karanlık sızma akımından kaynaklı olan saçma gürültüsünün ve ortam sıcaklığındaki parçanın şönt rezistansından kaynaklanan Johnson gürültüsünün bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Bir komponentin ters sızıntı akımı ile oluşturduğu dağıtılmış gürültü akımı aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$I_S: \text{saçma gürültü akımı} = (2e i_D B)^{1/2}$$

e: elektron yükü (1.6×10^{-19} Coulomb)

i_D: karanlık sızma akımı (A)

B: sistemin bant genişliği

Johnson gürültü dağılımı, komponentin şönt rezistansı tarafından sağlanmaktadır.

I_J: Johnson gürültü akımı

K: Boltzmann sabiti (1.33×10^{-23} J/K)

T: mutlak sıcaklık (K)

R: Direnç (Ω)

Toplam gürültü bu gürültülerin ayrı ayrı dağılımlarının quadrature toplamı olarak

Eşitlik 2.6 ile hesaplanır

$$I_N = (I_S^2 + I_J^2)^{1/2} \quad 2.6$$

Bununla beraber, gürültü eşdeğeri güç (*NEP*) **Eşitlik** 2.7 ile hesaplanır:

$$NEP = \frac{I_N}{R\lambda} \quad 2.7$$

Buna göre ters beslemedeki, geniş yüzeyli, yüksek voltajda çalıştırılan bir fotodiyot için dağıtılmış gürültüsü baskın bir bileşen olurken sıfır beslemedeki bir komponentte karanlık akım azalacağı için Johnson gürültüsü daha baskın gelmektedir.

2.4.5 Silikonda DC akım modunda doğrudan dedeksiyon

X ve Γ ışınlarının dedeksiyonu amacı ile genellikle yarı iletken dedektör olarak geniş aktif bölgeye sahip silisyum PIN diyotlar da kullanılmaktadır (Detection Technology Inc., 2000). İyonize radyasyon fotonları aktif bölgeye ulaştıklarında, enerjilerinin tümü veya bir kısmı bazı etkileşimler ile bağlı elektronlar tarafından soğurulmaktadır. Bu etkileşimler, ortamda elektron-deşik çiftleri şeklinde bağımsız yükleri oluşturan, iyonizasyon işlemine sebep olmaktadır.

Bir elektron-deşik çiftinin oluşabilmesi için 3.6 eV'luk bir foton enerjisinin soğurulması gerekmektedir. Diyot eklemesindeki katottan anota doğru yönelmiş olan bir dahili bir elektrik alan altında (+) yük olan deşikler anot tarafına, (-) yük olan elektronlar ise katot tarafına doğru sürüklenirler.

P ve N tipi maddelerinin ara yüzünde bulunan verici (donör) ve alıcı (akseptör) atomların konsantrasyon gradyanından oluşan bu elektrik alan, harici bir elektrik alan uygulanmasa bile, silikon diyotlarda bulunan ve genelde 0.6 V mertebesinde olan dahili eklem voltajı sebebi ile yine gözlemlenebilmektedir. Bazı uygulamalarda bu dahili voltajı arttırmak için harici ters besleme verilmektedir. (+) ve (-) yüklerin zıt taraflara sürüklenmesi sonucu oluşan bu düşük seviyedeki akım ilave yükselteç devrelerinin kullanımı ile ölçülebilir seviyelere yükseltilir. Silisyum diyotlar 1.12 eV enerjiye tekabül eden 1100nm veya daha büyük dalga boylarındaki fotonların elektronları iletim bandına uyardırmaya yetecek enerjiye sahip olmamalarından dolayı 1100 nm ve üzerini ölçemezler ve bu dalga boyları için dedektör kör davranırlar.

Sensör olarak kullanılan bir fotodiyotun temel çıktısı, cihazdan katottan anoda akan ve aydınlıkla yaklaşık olarak doğrusal orantılı olan akımdır. Fotoakım, ileri sinyal işleme basamakları için bir seri direnç veya bir akım-voltaj yükseltici tarafından voltaja dönüştürülür.

Bir fotodiyodun ışık-akım dönüşümü, diyotun ön gerilim koşullarına göre değişmektedir. Fotoiletken modda, fotovoltaiik moddan farklı olarak fotodiyodun bağlı olduğu devrede anot ve katot kısımları aynı potansiyel seviyesinde tutulmaktadır. Burada fotodiyot sıfır biastadır. Bir fotoiletken uygulamada ise fotodiyodu çevreleyen devre ters bir bias uygular, böylece katot anottan daha yüksek bir potansiyelde olur.

2.4.6 PIN diyotların dezavantajları

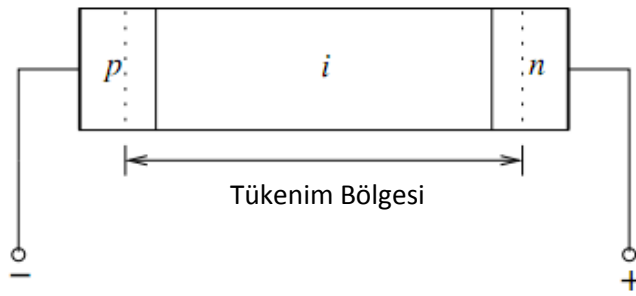
Radyasyon dedeksiyonunda p-n eklem diyotlar kullanılmasına rağmen aşağıda belirtilen sebepler yüzünden sıkıntılarla karşılaşmaktadır:

Küçük tüketim katmanı: Elektron-deşik çiftlerinin tüm madde içinde oluşmasına rağmen ölçülebilir akımın büyük çoğunluğu tüketim bölgesinde oluşmaktadır. Uygulamada zayıflama bölgesinin, radyasyonun tüm enerjisini bırakabileceği kadar geniş olması istenmektedir. Bir p-n diyotta zayıflama bölgesinin artırılması için bias voltajının yükseltilerek yüksek harici elektrik alan uygulanması gerekmektedir fakat yüksek voltaj kullanımının da kristal yapısını bozma ihtimali vardır ve kristal kırılma voltajının değerini aşamayacak şekilde sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sebeple uygun seviyedeki voltajlar ve tüketimin tamamen gerçekleşebileceği örneğin 100-300µm kalınlığında, ince materyaller kullanılmaktadır.

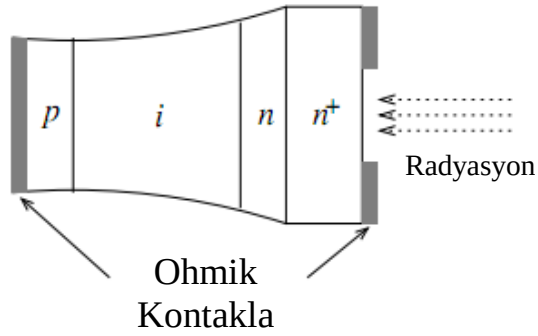
Büyük kapasitans: Kapasitans, tüketim bölgesinin kalınlığıyla orantılı olarak artar. Yüksek voltajda çalışan p-n eklem diyotlarda, dedektör kullanımı için dezavantajlı olan yüksek kapasitans değeri görülmektedir.

Yavaş tepki: Genelde p-n diyotların tam tüketim modunda çalışmaları gerekmektedir bu mod ancak ince dedektörlerde mümkündür ve zayıflama bölgesini genişletmek için ekleme yüksek potansiyel uygulanması gerekmektedir. Nispeten kalın dedektörlerde

tam tüketim sağlanamadığı için tüketilmemiş alanda elektron-deşik çiftlerinin oluşturulması, uygulamada dedektör tepkisindeki doğrusallığın bozulması ve yüklerin bölgeler arası difüzyonu sebebi ile tepki süresini düşmesi gibi önemli problemlere sebep olabilirler. Bias voltajının yükseltilmesi de beklenen iyileşmeyi sağlamamaktadır. Bu problemin çözümü için p ve n eklemlerinin arasına tüketim bölgesi genişliğini arttırılması amacı ile yarı iletken safsızlık bölgesi yerleştirilmektedir ve bu safsızlık bölgesi sebebi ile bu komponentler PIN diyot olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.5).

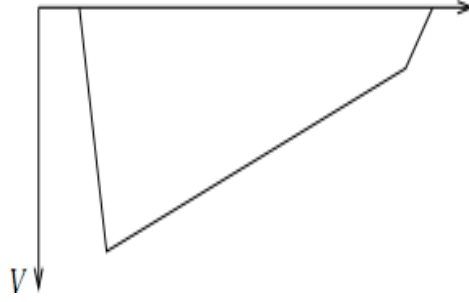


Şekil 2.5 PIN Diyot eklem yapısı



Şekil 2.6 PIN Diyot ile radyasyon ölçümü

Araya safsızlık katmanının yerleştirilmesi ile tüketim genişliği sabitlenir ve böylece geniş tüketim bölgesi, yüksek bias voltajına gerek kalmadan kullanılabilir. Şekil 2.7’te ters beslemeli PIN diyoda ait elektrik alan profili verilmektedir.



Şekil 2.7 Ters beslemeli PIN diyoda ait elektrik alan profili

2.4.7 Fotodiyot dedektörler

Fotodiyot dedektörler görünür bölgedeki ışığı algılayabilecek şekilde tasarlanmış yarı iletken dedektörlerdir. Bir dedektörün A yüzeyi, birim zamanda ν frekansı ile homojen olarak aydınlatılırsa Φ akısı oluşur. Birim hacim başına üretilen yük çifti sayısı

$$N = \eta \frac{\Phi_{\gamma}}{h\nu} \quad 2.8$$

olarak verilmektedir. Kuantum verimi olan η foton başına üretilen yük taşıyıcı sayısını ifade eder. Bu yüklerden oluşan akımların toplamı:

$$i_{\gamma} = qN = q\eta \frac{\Phi_{\gamma}}{h\nu} \quad 2.9$$

olarak verilir. Oluşan yük çiftleri τ yüklerin ortalama ömür süresi olmak üzere $1/\tau$ ortalama oranı ile tekrar birleşmektedirler.

Foto diyotun kazancı **Eşitlik 2.10** ile verilmektedir:

$$Kazanç = \frac{i_s}{i_{\gamma}} = \frac{\tau \mu E}{d} = \frac{\tau}{t_d} \quad 2.10$$

Burada t_d geçiş ya da sürüklenme süresi olarak isimlendirilmektedir. Fotodiyotların görünür ve yakın kızılötesi bölgelerdeki kuantum verimleri ortalama %80 civarındadır

fakat çıkış sinyali çok düşük seviyelerde olduğu için sinyallerin yükseltilmeleri gerekmektedir.

Tepki hızı: Darbeli ve hızlı değişen X ışını gibi ışınların ölçümlerinde hızlı tepki veren hassas sistemler gerekmektedir. Mikro saniye aralığında veya daha hızlı bir sistem yükselme zamanı yanıtı, başta yavaş hareket eden değişimler olmak üzere yükün tamamının toplanabilmesi ve düşük eklem kapasitesinin sağlanabilmesi için bias modda çalışan sistemler gereklidir.

Karanlık akım: Fotodiyot sistemlerini etkileyen başlıca bir etken aydınlatma olmadığında bile fotodiyottan geçen ve karanlık akım olarak adlandırılan akımdır. Karanlık ve foto akımların toplamı, diyot üzerinden geçen toplam akım değerini oluşturur. Karanlık akımın büyüklüğüne yakın büyüklükte fotoakımlar ölçülemeyeceği için karanlık akım sistemin düşük ışık yoğunluklarını ölçme yeteneğini sınırlandırmaktadır. Sıcaklığın bir fonksiyonu olan karanlık akım her 5-6 derecelik sıcaklık artışı için 2 katına kadar artış göstermektedir. Karanlık akımının diyot akımından çıkartılması teknikleri sayesinde olumsuz etkileri azaltılabilir. Bununla birlikte, karanlık akım karanlık gürültü ile birlikte gelir ve ışık yoğunluklarının oluşturduğu fotoakım karanlık gürültüde kaybolacak kadar küçükse sistem ölçüm alamaz.

Yükselteç ofseti: Yüksek hızlı tepki gerektirmeyen ölçümlerde, dedektör sistemini unbiased modda çalıştırmak karanlık akımdan kaynaklı hataları büyük ölçüde azaltır. Buna rağmen yükseltecin giriş ofset voltaj hatası hala hesaba katılması gereken bir parametredir. Genelde tüm yükselteçlerde bulunan giriş ofset hatası yükseltecin (+) giriş terminaline seri bağlanmış bir voltaj kaynağı olarak varsayılabilir. Transimpedans yükselteçlerde ofset voltajı, geri besleme direnci üzerinden geri dönerek tekrar yükseltecin eviren (-) terminalinde gözlemlenmektedir. Bu yüzden unbiased diyot, pozitif ya da negatif biaslı bir şekilde çalıştırılmaktadır ve bu da sonlu bir karanlık akım bileşeni oluşturmaktadır.

Şönt direnç: En önemli parametrelerden birisi olan diyotun şant direnci, $V=10\text{ mV}$ 'luk diyot biası altında voltajın değerinin akıma bölümü olarak tanımlanmaktadır. Eğer

diyotun şönt direnci, transrezistans yükseltecin geri besleme direncine göre çok küçük ise, yükseltecin (+) giriş terminaline göre voltaj kazancı yaklaşık olarak ($R_{şönt} + R_{geribesleme} / R_{şönt}$) şeklinde verilebilmektedir. Her 5-6 C° sıcaklık artışında yaklaşık 2 katına çıkarak artan karanlık akımın dengelenerek çıkış voltaj hatası azaltılması için diyotun şönt direncinin yarıya indirilmektedir.

2.5 Ön Yüz Elektronik

Dedektör sistemlerinde ilgili elektronikler çok farklı biçimler alabilse de, elektronik okuma ve sinyal-gürültü oranının optimizasyonunun temel ilkeleri hepsi için aynıdır ve geçerlidir (Spieler, H., 2003). Ön Yüz (Front-End) elektronik bileşenleri, elektronik gürültü ve sinyal işleme dedektör alanının önemli konularıdır. Ön yüz elektronik ve sinyal işleme sistemlerinin amacı;

1. Sensörün çıkışında oluşan ve genellikle kısa süreli bir akım darbesi formunda olan bir elektriksel çıkış sinyalinin alınması
2. Sistemin zaman yanıtını optimize edilmesi için gerekli ayarların yapılması
 - a) minimum algılanabilir sinyal seviyesinin (isabet/isabet yok algılaması) ölçülmesi,
 - b) enerji ölçümü,
 - c) olay gerçekleşme oranı,
 - d) varış zamanı (zamanlama ölçümü),
 - e) sensör darbe şekline karşı duyarsızlık ölçümü veya yukarıdakilerin bir kombinasyonu şeklindedir.
3. İlerdeki analiz işlemlerinde kullanılmak üzere sinyalin sayısal formatta kaydedilmesi

Pozisyona duyarlı dedektörler, bir vuruş, genlik ölçümü veya zamanlamanın varlığından yararlanırlar. Dolayısıyla bu dedektörler için de aynı gereksinimlerin karşılanması gerekmektedir. Genel olarak, bu özelliklerin hepsi aynı anda optimize edilemezler ve bu nedenle bazen seçimler yapılması gerekmektedir. Elektronik okuma sisteminin bu birincil fonksiyonlarına ek olarak, radyasyona karşı dirençli, düşük güç sarfiyatlı (özellikle taşınabilir sistemler, büyük dedektör dizileri, uydu sistemleri), sağlamlık düşük maliyet gibi özelliklere sahip olmaları da son derece önemlidir.

Bir sintilasyon dedektöründe radyasyon- bu örnekte γ ışınları- görünür ışık fotonları üreten sintilatör bir kristalinde soğurulur ve burada oluşan sintilasyon fotonlarının sayısı, soğurulan enerji ile orantılıdır. Bu basamakta sintilatör içerisinde soğurulan enerji değeri ile orantılı miktarda bir yük tarafından oluşturulan elektriksel çıkış sinyaline dönüştürülür. Sinyal yükü PMT tarafından belirli bir katsayı oranında yükseltilir ve çıkışta bir akım darbesi oluşturulur. Zamanla entegre edilen bu darbe, emilen enerjiyle orantılı olan sinyal yükünü içerir. Ardından sinyal darbe şekillendiriciden geçer. Bu kısım çıkışı sinyalini sayısala çevirip bu formatta kaydederek saklayan ADC birime aktarır. Eğer bu kısımda darbe şekli sinyal yükü ile değişmiyorsa, sinyalin tepe genliği- darbe yüksekliği- sinyal yükünün bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir ve bu ölçüm türüne darbe yüksekliği analizi denir. Darbe şeklini ADC'ye göre uyarlayan darbe şekillendiriciler farklı işlevler için de kullanılırlar. ADC sistemlerinin ölçtükleri sinyali örneklemeleri için sınırlı bir süreleri vardır ve işlemi bu süre içerisinde tamamlamalıdır. Gelen giriş darbesi bu süreye göre daha uzun olduğunda sinyal kademeli olarak yuvarlatılmış bir tepe noktasına sahip olacak şekilde yuvarlatılmalıdır. Sintilatör dedektörlerinde darbe şekillendirici olarak genellikle bir integrator bloğu kullanılır ve bu blok ADC'nin ilk aşamasında uygulanır. Ardından, PMT çıkışı doğrudan yük algılamalı bir ADC'ye bağlanmaktadır.

Minimum algılanabilir sinyal ve genlik ölçümü işleminin hassasiyeti, dalgalanmalarla sınırlıdır. Sensörde soğurulan enerji sinyal kuantasına dönüştürülür. Bu enerji sintilasyon dedektörlerinde sintilasyon fotonlarına, iyonizasyon odasında ise gazlarda dedektörlerde elektronlar ve iyonlar, katı dedektörlerde elektron-deşik çiftleri olmak üzere yük çiftlerine dönüştürülür. Emilen enerjinin uyarma enerjisine bölümü, ortalama sinyal kuantası sayısını verir ve **Eşitlik 2.11** ile hesaplanır:

$$N = \frac{E}{\varepsilon_i} \quad 2.11$$

Bu sayı istatistiksel olarak dalgalanır, dolayısıyla göreceli çözünürlük **Eşitlik 2.12** ile bulunur:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta N}{N} = \sqrt{\frac{F \varepsilon_i}{E}} \quad 2.12$$

Çözünürlük, enerjinin karekökü ile orantılı olarak iyileşme göstermektedir. F, birden fazla uyarma mekanizmasının devreye girmesi ve genel istatistiksel yayılımı azaltması nedeniyle ortaya çıkan Fano faktörüdür. Örneğin, bir yarı iletken soğurulan enerji elektron-delik çiftleri oluşturur, fakat aynı zamanda örgü titreşimlerini ve uyarma enerjisi çok daha küçük olan (meV'a karşı eV) fononları da uyarır. Bu nedenle, görünürdeki yük sinyalinin çok daha fazla uyarım söz konusudur ve bu da yük sinyalinin istatistiksel dalgalanmalarını azaltır. Si için Fano faktörü değeri 0.1 mertebesindedir. Bununla birlikte sinyal üzerine bindirilen ve tepe genliğini değiştiren elektronik gürültü, temel dalgalanmalara sebep olurlar. Ortamdaki gürültünün seviyesi dedekte edilebilen minimum sinyali belirlemektedir.

Optimize sistemlerde, dalgalanmalar ile sinyallerin zaman ölçeği, mukayese edilebilir ölçülerdedir. Sinyalin genliğinin tepe değeri ortalama sinyal değerinin üstünde ve altında rastsal salımlar gösterebilir. Gürültü tepe genliğinde dalgalanmalara sebep olmakla birlikte zamanlama ölçümleri üzerinde de etkileri vardır. Zamanlama sinyali, sinyalin sabit bir tetikleme seviyesi ile karşılaştırılmasıyla elde ediliyorsa sinyalin kenarındaki genlik dalgalanmaları zaman kaymalarına dönüşürler.

2.5.1 Sensörden sinyalin alınması

Genellikle zamanın bir fonksiyonu olan ve kısa süreli bir akım darbesidir olan çıkış sinyali $i_s(t)$, genellikle ps'ler mertebesindedir. Biriken enerjinin ölçümü için mevcut akım darbesi **Eşitlik** 2.13 ile gösterildiği gibi integre edilmelidir.

$$E \propto Q_s = \int i_s(t) dt \quad 2.13$$

Bu entegrasyon doğrusal bir sistemin herhangi bir aşamasında gerçekleştirilebilir:

1. sensör kapasitansında entegre edilebilir

2. entegre eden bir ön yükseltici ("yük duyarlı" yükseltici) kullanılabilir
3. mevcut darbeyi yükseltilir ve entegre eden bir ADC ("yük algılama" ADC'si) kullanılabilir
4. Mevcut darbeyi hızlı bir şekilde örneklenerek sayısallaştırılır ve sayısal olarak entegre edilir

Yüksek enerji fiziğinde genellikle en verimli olan ilk üç seçenek kullanılmaktadır.

2.5.2 Sinyalin entegre edilmesi

İyonizasyon odası hacmi, katı veya gaz fazdaki bir algılayıcı materyal ile doldurulabilir. Mobil yük taşıyıcıları dedektör kapasitansını (C_{det}) oluşturan sensör elektrotlarına doğru hareket edince, indüklenen yükü değiştirirler. Eğer yükseltecin giriş direnci (R_i) çok küçükse, sensör yükünü boşaltmak için gereken zaman sabiti $\tau = R_i(C_{det} + C_i)$ çok küçük olur ve yükselteç sinyal akımını algılayacaktır. Bununla birlikte, giriş zaman sabiti, akım darbesinin süresine büyükse, akım darbesi kapasitans üzerinde entegre edilerek yükselteç girişine aktarılır ve V_{in} **Eşitlik 2.14** ile bulunur:

$$V_{in} = \frac{Q_s}{(C_{det} + C_i)} \quad 2.14$$

Sinyalin büyüklüğü sensör kapasitansına bağlıdır. Değişken sensör kapasitanslarına sahip bir sistemde, örneğin değişen şerit uzunluklarına sahip bir Si izleyici veya kapasitans değeri uygulanan bias gerilimi ile değişen bir yarı iletken sensörde ek kalibrasyonların yapılması gerekmektedir. Dedektörlerde, yük kalibrasyonunun mümkün olduğunca sensöre bağımlı olmadığı tasarımlar hedeflenir. Bu amaçla genellikle kolay kullanımlarından dolayı yüke duyarlı yükselteçler tercih edilirler.

Entegrasyon işlemi için kullanılan geri beslemeli yükselteç bloğu, $-A$ gerilim kazancına sahip bir evirici yükselteç ile çıkış ile giriş arasına yerleştirilen bir geri besleme kondansatöründen (C_f) meydana gelmektedir. Yükseltecin giriş empedansı sonsuza yakın olduğunda girişine akım akmaz. Giriş sinyali v_i , çıkışta yükselteç sayesinde $-Av_i$ olacak şekilde arttırılmış olur. Geri besleme kapasitörü üzerindeki voltaj

$$v_f = (A + 1)v_i \quad 2.15$$

ve C_f üzerinde biriken yük arasındaki voltaj farkı

$$Q_f = C_f v_f = C_f (A + 1)v_i \quad 2.16$$

olur. Sinyal akımı tamamen geri besleme kapasitansını şarj eder ve yükseltece hiç akım akamaz. Bu durumda $Q_f = Q_i$ olur. Böylece, yükseltecin giriş kapasitans değeri dinamik olarak görünür. $A \gg 1$ olduğunda birim yük başına çıkış voltajı $A_Q \approx \frac{1}{C_f}$ olur. Buna göre çıkış voltajı C_f 'ye bağlıdır.

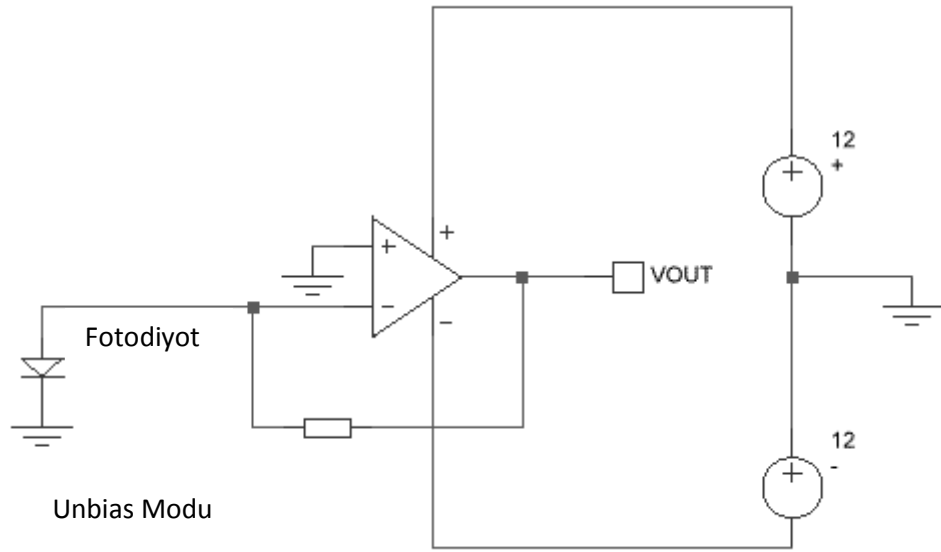
Sinyalden gelen yük olan Q_s yükü, dinamik giriş kapasitansı olan C_i ile sensör kapasitansı olan C_{det} tarafından paylaşılacaktır. Ölçülen yükün sinyal yüküne oranı

$$\frac{Q_i}{Q_s} = \frac{1}{1 + \frac{C_{det}}{C_i}} \quad 2.17$$

olduğu için dinamik giriş kapasitansı, sensör kapasitansına kıyasla büyük olmalıdır.

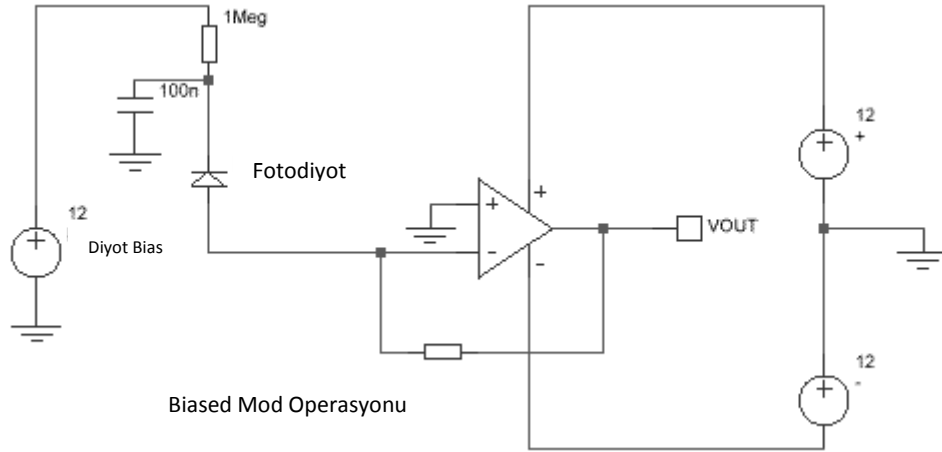
2.5.3 Küçük akımların yükseltilmesi

Si diyotlarda radyasyon nedeni ile oluşan foto akım genelde 10^{-12} - 10^{-8} Amper seviyesindedir. Diyotun terminal voltajı ile doz hızı arasında logaritmik bir bağıntı vardır. Aradaki bağıntının doğrusallığının sağlanması için uygulamada yaygın olarak transempedans (akım-voltaj dönüştürücüler) yükselteçler kullanılmaktadır. Transempedans yükselteçler genellikle yüksek kazançla sahip eviren yükselteçler kullanılarak tasarlanırlar. Çıkış terminali ile giriş terminali arasında bir geri besleme direnci bulunmaktadır (**Şekil 2.8**).



Şekil 2.8 Transempedans yükselteç (Unbiased Mod)

Açık devre kazancı yeterince büyük olan yükselteçlerde devrenin transempedans genliği geri besleme direncinin çarpanı ile orantılıdır. Örneğin **Şekil 2.9**'de gösterildiği gibi 100Mohm değerindeki bir geri besleme direnci devreye 10^8 mertebesinde bir kazanç sağlamaktadır.



Şekil 2.9 Transempedans yükselteç (Biased Mod)

Eklem kapasitansı, kaçak veya karanlık akım nicelikleri ters bias besleme işleminin bir fonksiyonudurlar.

2.5.4 Radyasyon dedeksiyonunda kullanılan ön yükselteçler

Radyasyon tarafından dedektörde oluşturulan analog sinyaller, dar bir genişliğe ve düşük şiddete sahip oldukları için direkt olarak sayısal hale getirilemezler ve dolayısıyla sayılamazlar (Ahmed 2007). Ölçülecek analog sinyallerin sinyal işleme bloklarına iletilmesinden önce, dedektör çıkışına doğrudan bağlanan, basit ve verimli olan ön yükselteçler tarafından yükseltilmeleri gerekmektedir.

Kullanım amaçlarına göre farklı ön yükselteç devreleri ve her devre yapısının kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Tasarım esnasında ihtiyaç belirlenerek kullanıma uygun bir devre seçimi yapılmalıdır. Ön yükselteçlerin seçiminde göz önünde bulundurulacak bazı önemli tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir:

- Dinamik aralık
- Giriş sinyalinin aralığı
- Ortak mod
- SNR
- Güç sarfıyatı
- Darbe yığılması
- Tepki süresi

Radyasyon dedeksiyonu işleminde genellikle aşağıda verilen üç tip ön yükselteç devresi kullanılmaktadır:

- Voltaj duyarlı ön yükselteçler
- Akım Duyarlı ön yükselteçler
- Yük duyarlı ön yükselteçler

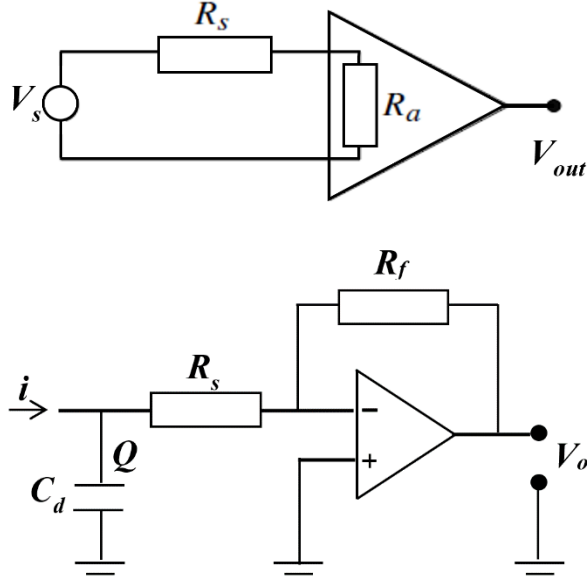
2.5.4.1 Voltaj duyarlı ön yükselteçler

Radyasyon dedeksiyonunda sıklıkla kullanılan bir tür olan voltaj duyarlı ön yükselteçler, girişindeki voltaj sinyalini, ayarlanabilir genlik çarpanları ile orantılı olarak yükseltebilen devrelerdir. **Şekil 2.10**'deki devre göz önüne alınarak dedektör bir

voltaj kaynağı olarak gösterilirse, yükselteç girişindeki V_a voltajı ile sinyal voltajı V_s arasındaki bağıntı:

$$V_a = \frac{R_a}{R_a + R_s} V_s \quad 2.18$$

olarak verilebilir.



Şekil 2.10 Voltaj duyarlı ön yükselteçlerin şematik gösterimi

Bu devrelerin düzgün çalışabilmesi için kaynaktan gelen akımda kayıp olmaması gerekmektedir. Akımdaki azalma, R_s üzerinde bir potansiyel düşüşüne sebep olmaktadır. Bunun önlenmesi için ön yükseltecin giriş empedansının kaynak empedansına göre çok yüksek olması, hatta pratikte sağlanamamasına rağmen idealde sonsuz direnç seviyesinde olması gerekmektedir. Buna göre $R_a \gg R_s$ ise $V_a \approx V_s$ olmaktadır. Ön yükseltecin kazancı A ise, $V_{out} = A V_a$ ve böylece $V_{out} \approx A V_s$ olur.

Bu tür yükselteçlerde genelde bir geri besleme direnci R_f kullanılmaktadır. C_d dedektör ve kaçak toplam kapasitansdır ve R_s toplam empedanstır. Pratikte toplam dedektör kapasitansı ve kablolar gibi bileşenler arasında Q elektrotta ölçülen biriken yükü temsil etmek üzere

$$V_s \approx \frac{Q}{C_d} \quad 2.19$$

olarak verilen, V_s potansiyel farkı oluşmaktadır. Yükseltilmiş çıkış voltajı ise

$$V_{out} \approx A \frac{Q}{C_d} \quad 2.20$$

olarak ifade edilir. Bağlantıya göre çıkış voltajı dedektör kapasitansına bağlıdır ve dedektör kapasitansındaki her değişiklik için tekrar kalibrasyon yapılması gerekmektedir. İyon odası gibi sistemlerde etkin olarak kullanılmakta olan bu tür yükselteçler, sıcaklık gibi etkilerle kapasitansı değişen sistemler için ise çok verimli değildirler. Düşük empedanslı çıkış sinyali sayesinde uzun menzilli sinyal transferi imkanı sağlarlar.

Dedektördeki yük, gelen ışının dedektör üzerinde oluşturduğu anlık akımın, kondansatör üzerinden integralinin alınmasıyla

$$Q = \int_0^{t_0} i_s(t) dt \quad 2.21$$

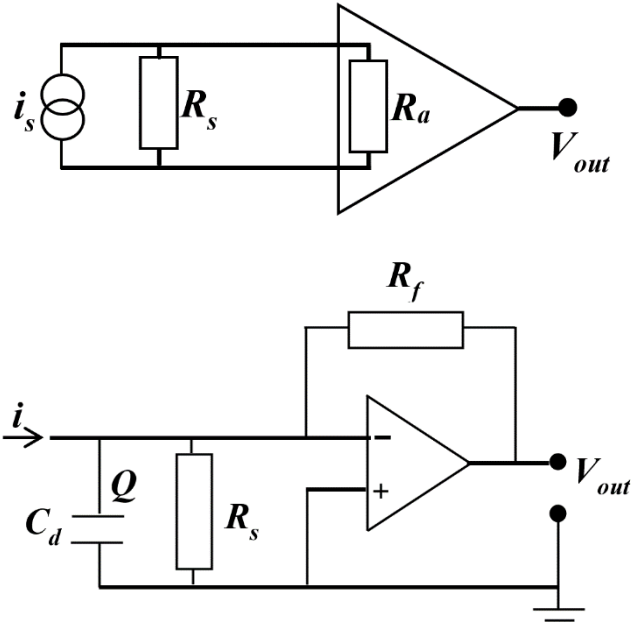
olarak dedektördeki yük hesaplanabilmektedir. Burada, i_s , t sürede dedektörden geçen akımı ve Q , dedektörde biriken toplam yükü ifade etmektedir. Ön yükseltecin çıkış voltajı ise

$$V_{out} = \frac{A}{C_d} \int_0^{t_0} i_s(t) dt \quad 2.22$$

şeklinde verilmektedir. Burada C_d kapasitif yükü ifade etmektedir. Bu bileşenler, kapasitörün ne kadar hızlı boşalacağını belirleyen devrenin zaman sabitini ($R_d C_d$) oluştururlar. Akımın integrali ve zaman sabiti, voltaj darbesinin şeklini belirleyen ve C_d 'nin boşalma süresi, zaman sabitinin yük toplama süresi olan t_d 'ye göre daha yavaş olması $t_d \ll R_d C_d$ gerektiği gibi voltaj duyarlı ön yükselteç devrelerinin kullanımına karar vermek için kullanılan kriterleri ortaya koyan parametrelerdir.

2.5.4.2 Akım duyarlı ön yükselteçler

Dedektör üzerinden geçen anlık akımın ölçülmesine ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda, genellikle dedektörün anlık akımını ölçülebilir bir voltaja çeviren ve akım-voltaj çevirici olarak da isimlendirilen akım duyarlı ön yükselteçler kullanılmaktadır. **Şekil 2.11**'de bir örneği verilen bu yükselteçlerde akımın yükselteçten geçebilmesi için giriş empedansının mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir.



Şekil 2.11 Akım duyarlı ön yükselteçlerin şematik gösterimi

Yükselteçten geçen akım i_a ile kaynak akımı i_s arasındaki ilişki

$$i_a = \frac{R_s}{R_a + R_s} i_s \quad 2.23$$

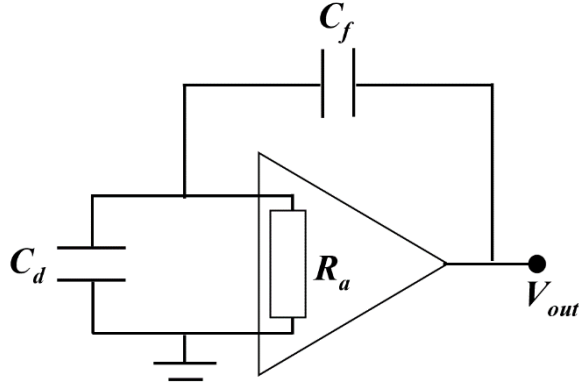
ile verilmektedir.

Ön yükseltecin giriş empedansının kaynak empedansına göre çok küçük olduğu ($R_a \ll R_s$) durumda yükselteçten akan akımın kaynak akımına eşit ($i_a \approx i_s$) olduğu varsayılabilir ve doğrusal bir akım-voltaj çevirici olarak çıkış voltajının kaynak akımı ile orantılı olduğu ($V_{out} \propto i_s$) söylenebilir. Anlık akımın voltaja çevirimi işleminin gerçekleştirilebilmesi için, dedektör kapasitansı ve R_s 'nin çarpımının yük toplama zamanına (τ_d) oranla çok daha küçük değerde $\tau_d \gg R_s C_d$ olması gerekmektedir .

2.5.4.3 Yük duyarlı ön yükselteçler

Voltaj duyarlı ön yükselteçlerin, giriş kapasitansına bağlı olmalarından kaynaklanan dezavantajları, yük duyarlı ön yükselteçlerin geliştirilmesi ile çözülmüştür. Şekil 2.12'de gösterilen bu yükselteçlerin çalışma prensibi, dedektör kapasitansı üzerinde biriken yükün bir diğer kapasitans üzerine entegre edilmesi şeklindedir. Kapasitör

üzerindeki biriken potansiyel, dedektör üzerindeki yük ile doğru orantılı olduğundan bu devreler yük integratörü olarak çalışmaktadırlar. Çalışma sistemi aşağıda verilmiştir:

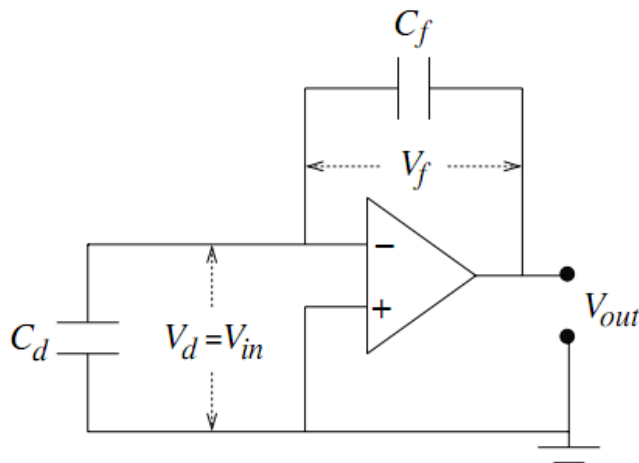


Şekil 2.12 Yük duyarlı ön yükselteçler

Kombine dedektör ve kaçak kapasitans C_d üzerindeki yük, geri besleme kapasitansı C_f , kendi üzerinde biriktirilir. Çıkış voltajı ise

$$V_{out} \propto \frac{Q_f}{C_f} \quad \text{veya} \quad V_{out} \propto \frac{Q_d}{C_f} \quad 2.24$$

ile verilebilir. Burada Q_d , C_d üzerinde biriken yükü ifade eder ve geri besleme kapasitansı C_f üzerinde biriken Q_f yükü ile orantılıdır. Yükseltecin giriş empedansı çok büyük olduğunda ($R_a \approx \infty$) $Q_f \approx Q_d$ olur ve ön yükseltecin girişinden hiç akım geçmez.



Şekil 2.13 Yük duyarlı ön yükselteç ve dedektör

Dedektör, ön yükselticinin evirici girişine bağlı kapasitif bir yük olarak gösterilmektedir. Ön yükselticinin giriş empedansının çok büyük olmasından dolayı, geri besleme kondansatörü olmadığında devre, gerilime duyarlı bir eviren ön yükseltici olarak çalışmaktadır. **Şekil 2.13**'deki devrede V_d giriş voltajı, A ise ön yükseltecin kazancı olmak üzere çıkış voltajı

$$V_{out} = -AV_d \quad 2.25$$

olur. Burada giriş voltajı, geri besleme kapasitörü voltajı ve çıkış voltajının toplamı şeklinde verilebilir ve buna göre

$$V_d = V_f + V_{out} = V_f - AV_d \quad 2.26$$

ise

$$V_f = (A + 1)V_d \quad 2.27$$

olur ve bu sadece ön yükseltecin empedansı sonsuz şeklinde ise geçerlidir. Giriş ve geri besleme kapasitansları üzerinde biriken yükler $Q=CV$ eşitliği kullanılarak hesaplanırsa

$$\frac{Q_f}{C_f} = (A + 1) \frac{Q_{in}}{C_{in}} \quad 2.28$$

olur ve $Q_{in} = Q_f$ olduğu göz önünde bulundurulursa

$$C_{in} = (A + 1)C_f \frac{Q_{in}}{Q_f} \approx (A + 1)C_f \quad 2.29$$

olarak ifade edilebilir.

Burada, Q_{in} yükselteç girişindeki yükü ifade eder. Yükseltecin dinamik kapasitansı olarak da adlandırılan C_{in} ise yükselteç girişindeki kapasitanstır ve geri besleme kapasitansı ile yükseltecin kazancının bir fonksiyonudur. Yük kazancı olarak isimlendirilen diğer bir kazanç olan A_Q , çıkış voltajının giriş yüküne bölünmesiyle elde edilir ve

$$A_Q = \frac{V_{out}}{Q_{in}} = \frac{AV_{in}}{V_{in}C_{in}} = \frac{A}{C_{in}} = \frac{A}{A + 1} \frac{1}{C_f} \approx \frac{1}{C_f} \quad (A \gg 1) \quad 2.30$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bağıntıya göre yük kazancının artırılabilmesi, C_f kapasitans değerinin küçük seçilmesine bağlıdır.

Diğer önemli bir parametre de yükün dedektör kapasitansından geri besleme kapasitansına transfer verimini ifade eden yükseltecin yük transfer verimi olan η_{in} olup

$$\eta_{in} = \frac{Q_f}{Q_t} \quad 2.31$$

bağıntısı ile verilir.

Dedektör ve dinamik kapasitans üzerindeki toplam yük Q_t ile ifade edilir. Dedektör kapasitansı C_d olmak üzere

$$Q_t = Q_d + Q_{in} \quad 2.32$$

olur ve

$$Q_f = Q_{in} = C_{in}V_{in} \quad 2.33$$

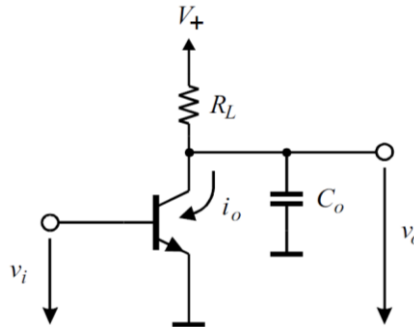
olmak üzere $V_d = V_{in}$ kabul edilerek yük transfer verimi

$$\begin{aligned} \eta_{in} &= \frac{Q_{in}}{Q_{in} + Q_d} = \frac{1}{1 + Q_d/Q_{in}} = \frac{1}{1 + C_d V_d / C_{in} V_{in}} \\ &= \frac{1}{1 + C_d / C_{in}} \end{aligned} \quad 2.34$$

şeklinde ifade edebiliriz.

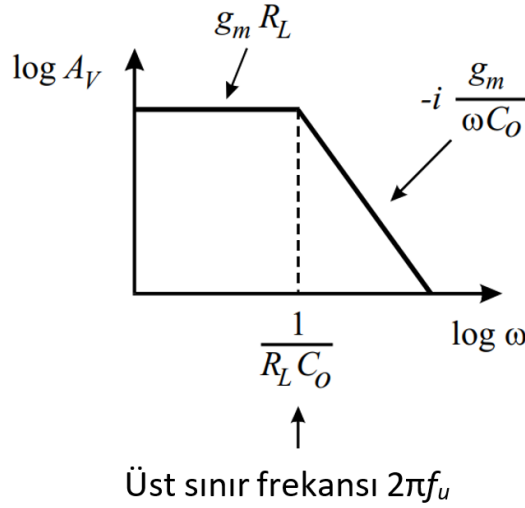
2.5.5 Gerçekçi yüke duyarlı yükselteçler

Gerçekte uygulamalarda yüke duyarlı yükselteçler (Şekil 2.14), idealdeki gibi çok hızlı tepki vermek yerine sensörden gelen akım darbesinin zaman süresinden çok daha yavaş yanıt verirler. Başlangıçta, sinyal yükü, sensör kapasitansına entegre edilir ve daha sonra, yükselteç yanıt verdiğinde, sinyal yükü yükseltece aktarılır (Spieler 2003).



Şekil 2.14 Basit bir yükselteç

Şekil 2.14'deki basit yükseltecin frekans cevabı için çizilen Şekil 2.15'da transkondüktans, parametresi g_m , transistörlerin kazancını, bant genişliğini ve gürültüsünü belirleyen önemli bir parametredir. Gerilim kazancı $A_v \equiv g_m Z_L$ olarak verilir.



Şekil 2.15 Bir yükselteç sisteminin frekans cevabı

Z_L yük empedansı, paralel şekilde bağlanmış R_L yük direncinden ve C_o çıkış kapasitansından meydana gelmektedir. Her kazanç cihazının bir çıkış kapasitansı, sonraki her basamağın bir giriş kapasitansı vardır ve ayrıca bağlantılar ve ek bileşenler kaçak kapasitansı oluşturduğu için bu kapasitans her sistemde mevcuttur. Yük empedansı **Eşitlik** 2.35 ile verilir:

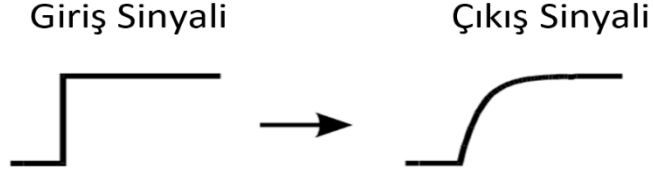
$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_L} + i\omega C_o \quad 2.35$$

Burada imajiner kısım olan i , kapasitans ile ilişkili faz kaymasını gösterir. Voltaj kazancı ise **Eşitlik** 2.36 ile verilir:

$$A_v = g_m \left(\frac{1}{R_L} + i\omega C_o \right)^{-1} \quad 2.36$$

Düşük frekanslarda ikinci terim ihmal edilebilir ve kazanç olduğu, kazanç sabit olarak $A_v = g_m Z_L$ olarak verilebilir. Bununla birlikte, yüksek frekanslarda ikinci terim baskın hale gelir ve kazanç, 90° faz kayması ile doğrusal olarak düşer. Asimptotik düşük ve yüksek frekans yanıtlarının kesiştiği yer olan yüksek kesilim frekansı değeri, zaman sabiti $R_L C_o$ ile belirlenir ve **Eşitlik** 2.37 ile ifade edilir:

$$f_u = \frac{1}{2\pi R_L C_0} \quad 2.37$$



$$\text{Çıkış Sinyali : } V_{\text{çıkış}} = V_{\text{giriş}}(1 - e^{-t/\tau})$$

Şekil 2.16 Basit bir yükseltecin darbe cevabı

Kazancın frekansla doğrusal olarak düştüğü durumda kazancın ve frekansın çarpımı sabittir. Böylece yükselteç kazancın 1 ve birim kazanç frekansı ω_0 frekansa eşit olan kazanç-bant genişliği çarpımı ile karakterize edilebilir. Yük hassas bir ön yükselteçte giriş empedansı **Eşitlik** 2.38 ile verilir:

$$Z_i = \frac{1}{\omega_0 C_f} \quad 2.38$$

Giriş empedansı reeldir ve bir direnç olarak ortaya çıkar. Böylece, yüke duyarlı bir yükselticinin girişi düşük frekanslarında ($f < f_u$) kapasitif görünürken, yüksek frekanslarda ($f > f_u$) rezistif görünürler. Sensör kapasitansı, geri besleme giriş direnci R_i üzerinden boşalır. Zaman sabiti değeri $\tau_i = R_i C_{det}$ olmak üzere **Eşitlik** 2.39 ile de hesaplanabilir:

$$\tau_i = \frac{1}{\omega_0 C_f} C_{det} \quad 2.39$$

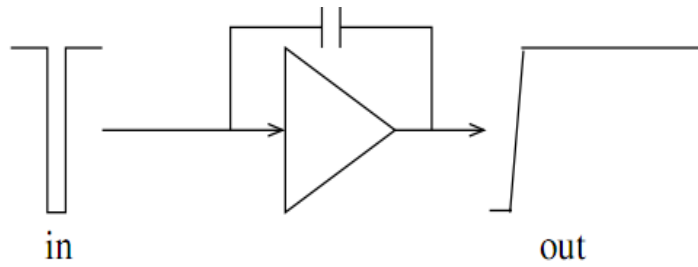
Denklem, sensör kapasitansının değerinin artışına bağlı olarak, yüke duyarlı yükseltece ait yükselme süresinin de artacağını göstermektedir. Yükselteç tepkisi, sensörün akım sinyalinden yavaş olsa bile darbe şekillendiricinin tepe süresine göre daha hızlı olmalıdır. Genellikle C_f değeri, C_{det} değerinden den küçük seçilir.

Yük transfer verimi için ($\eta_{in} \approx 1$) dedektör kapasitansının giriş kapasitansından çok daha büyük $C_d \ll C_{in}$ veya $C_d \ll (A+1) C_f$ olması gerekmektedir. Ardışık ölçümler yapılabilmesi için, bir sonraki ölçümü almadan önce biriken yükün boşaltılarak deşarj

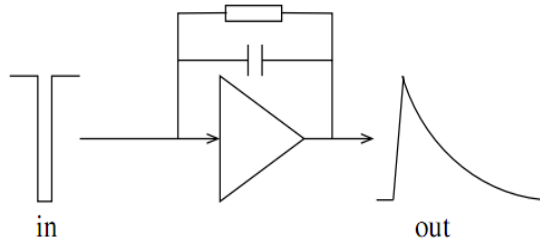
edilmesi veya reset edilmesi gerekmektedir. Bu fonksiyonun gerçekleştirilmesi için rezistif geri besleme ve darbelendirilmiş reset yöntemleri kullanılmaktadır.

2.5.6 Rezistif geri besleme

Bu yöntemde biriken yükün daha önceden belirlenen bir zaman sabiti ile azalarak boşalması için bir geri besleme direnci kullanılır. Bu işlem sonucunda sinyal keskin bir şekilde yükselen ama zaman sabiti $R_f C_f$ ile üstel olarak azalan bir darbeye dönüşür (Şekil 2.17, Şekil 2.18).



Şekil 2.17 Rezistif Geri Beslemesiz Çıkış



Şekil 2.18 Rezistif Geri Beslemeli Çıkış

Bu tür bir ön yükseltecin zamana bağlı çıkışı ise **Eşitlik 2.40** ile ifade edilir:

$$V_{out}(t) = \frac{Q_f}{C_f} e^{-t/R_f C_f} = \frac{\eta_{in} Q_t}{C_f} e^{-t/R_f C_f} \quad 2.40$$

Çıkış sinyalinin genliği ise **Eşitlik 2.41** ile hesaplanır:

$$V_{out}(t) = \frac{Q_f}{C_f} = \frac{\eta_{in} Q_t}{C_f} \quad 2.41$$

Çıkış maksimum değeri, devrenin dedektör çıkışında basamak tepkisini gösterdiği $t=0$ anında oluşur. Darbe şekli genelde sonraki analog devreler tarafından değiştirildiği için

genellikle yükselme süresi ile ilgilenilmemektedir. Bununla birlikte bazı uygulamalarda maksimuma dolması için geçen süre istenmektedir. Boşalma süresi zaman sabiti $\tau_f = R_f C_f$ ise bazı parametreler değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Rezistif geri besleme ön yükselteçlerinin önemli bir özelliği de yüksek sayım oranlarında görülen darbe yığılması pahasına, hiç ölü zaman göstermemeleridir. Bu tip ön yükselteçler, bir sonraki darbe, darbe azalma süresi içinde ulaşsa bile yükseltmeye devam etmektedirler ve bu esnada önceki darbenin ofseti yeni darbeninkine eklenmektedir. Bu dezavantajlarından dolayı yüksek darbe oranlarında bu tür yükselteçler çok tercih edilmezler. Geri besleme direncinin kendisinden kaynaklanan ve sisteme eklenen gürültü sebebi ile düşük sayım oranlarında kullanımı daha uygundur.

2.5.7 Fotodiyot devrelerinde fotovoltajik ve fotoiletken modlar

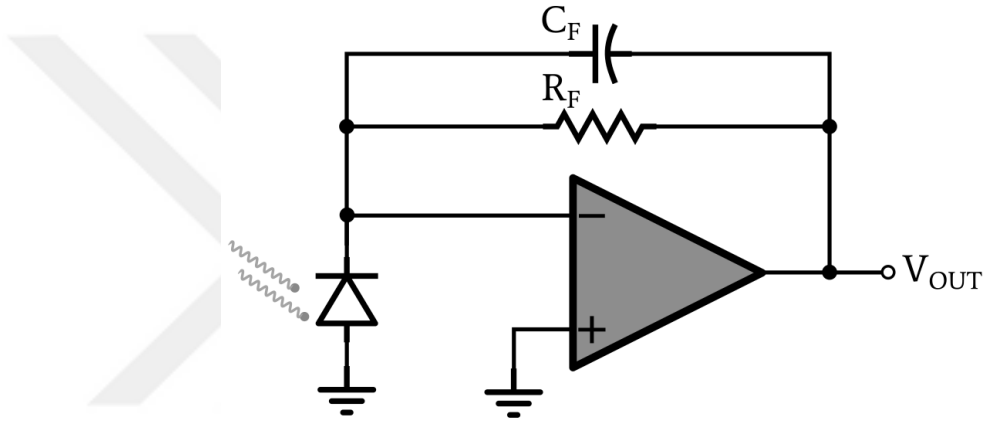
Radyasyon ölçümünde genellikle μCi aktivitesinde bir kaynak bile pA mertebesinde bir akım oluşturmaktadır ve bu akımı ortam ve elektronik gürültüler içerisinde tespit etmek çok kolay bir işlem değildir. Diyotların iç dirençlerinden kaynaklı kaçak akım oluşmaktadır ve bu akım sıcaklıkla da artış gösterir. Direnç artışı ile gürültü de artacağı için AC ve DC empedansın düşürülmesi gerekmektedir.

Diyotların kapasitansı vardır ve kapasitans artınca hızlı değişen sinyallerin dedeksiyonu ölçüm yavaşladığı için zorlaşır. Genel olarak hızlı fotodiyotlar 2pF geniş fotodiyotlar ise 50pF mertebelerinde değere sahiptirler. Fotodiyodun aktif alanının artması verimi arttırmaktadır ama bu aynı zamanda daha yavaş olmasına sebep olmaktadır. Zaman sabiti RC olarak düşünülürse R direnç değerinin küçük kapasitans değerli diyotlar için çok yüksek seçilmesi gerekmektedir.

Akım kaynağı ters yönde çalışır ve ters bias voltajı P ve N'yi birbirinden uzaklaştırır. Kapasitans bağıntısı $C = \frac{K\epsilon_0 A}{d}$ verilir ve buna göre bias voltajı artışı d'yi arttırdığı için kapasitans değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Diyottaki dahili büyük direnç de karanlık akıma sebep olmaktadır. Diyot uçlarında gerilim olmaması dahili bir akım olmamasına sebep olur ve bu durumda kapasitans büyük olur ve yavaşlar. Hızlı ve daha hassas olması için aşağıdaki modlar kullanılırlar (Keim, R., 2020).

2.5.7.1 Fotodiyot devrelerinde fotovoltajik mod

Diyot üzerinde herhangi bir voltaj oluşmasına izin vermemek için diyodun alt kısmı topraklanır ve Op-Amp'ın doğrusal modunda (+) ve (-) girişleri aynı voltaj seviyesinde bulunur. Fotoakımı aşağı doğru gider ve Op-Amp'tan akım akmaz. Fotoakım, geri besleme direnci üzerinde ters biasa neden olur ve geri besleme direncinde görünen fotoakım çıkış voltajı olarak $V_{out} = I_{pc} \times R_F$ açığa çıkar. Böylece karanlık akımın olmaması, daha az gürültü oluşması ve çıkışın doğrusal olması gibi avantajlar sağlar. Şekil 2.19 bir fotovoltajik uygulamaya bir örnektir.



Şekil 2.19 Fotodiyot devresinde bir fotovoltajik mod örneği

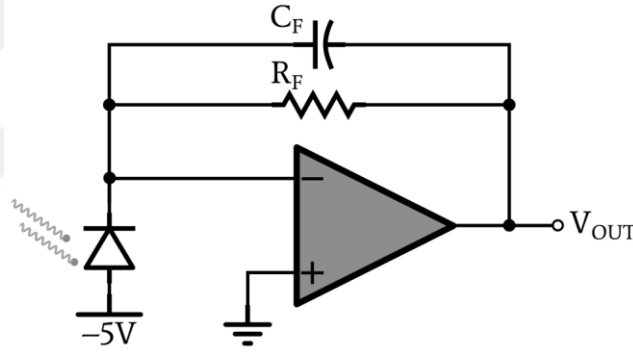
Geri besleme direnci R_F değeri tarafından belirlenen akım-voltaj oranı ile bir akım sinyalini bir voltaj sinyaline dönüştürmek için özel olarak tasarlanmış bu tür op-amp devrelerine transempedans yükselteci (TIA) denir. Op-Amp'ın ters çevirmeyen giriş terminali topraklanmıştır ve eviren giriş terminali de her zaman yaklaşık 0 V'ta olur. Bu sayede fotodiyotun hem katodu ve hem de anodu toprak seviyesinde tutulur. Aynı TIA devresi, fotodiyot ile fotovoltajik modda veya fotoiletken modda kullanabilir. Burada en önemli fark ters bias voltajının olmamasıdır.

Fotovoltajik modun en önemli faydası karanlık akım değerinin daha düşük olmasıdır. Normal bir diyot için, ters bias voltajı, kaçak akımın sebep olduğu ters akımı artırmaktadır. Ayrıca difüzyon akımı da azalmaktadır fakat bununla beraber sürüklenme akımında bir azalma olmayacaktır. Benzer davranış fotodiyotta da gözlemlenmesine rağmen buradaki ters akıma karanlık akım adı verilir. Ters bias voltajının artırılması

karanlık akımın da yükselmesine sebep olur. Karanlık akımı minimum seviyeye indirmek için op-amp kullanılır ve fotodiyod yaklaşık sıfır bias seviyesinde tutulur. Bu nedenle, fotovoltaiik mod, yüksek performans gerektiren düşük aydınlatma uygulamaları için daha kullanışlıdır.

2.5.7.2 Fotodiyot Devrelerinde Fotoiletken Mod

Yukarıdaki dedektör devresini fotoiletken moda geçirmek için fotodiyotun anodu toprak yerine negatif bir voltaj kaynağına bağlanır ve voltajın artmasıyla diyot kapasitansı azalmaya başlar. Katot hala toprak seviyesinde bulunur fakat anot nispeten negatif bir gerilim altında bulunduğu için fotodiyot ters beslemede bulunmaktadır. Temel tepki hızı sınırlaması C_F 'den kaynaklanmaktadır. Hızın daha önemli olduğu uygulamalarda bir örneği Şekil 2.20'de verilen fotoiletken modu tercih edilmektedir.



Şekil 2.20 Fotodiyot devresinde bir fotoiletken mod örneği

Bu fotoiletken modu daha az kapasitans stabilitenin korunmasına yardımcı olur. Bununla birlikte dezavantajları; doğrusal olmayan çıkış, daha fazla gürültü sıcaklıkla da artan karanlık akım olarak sıralanabilir.

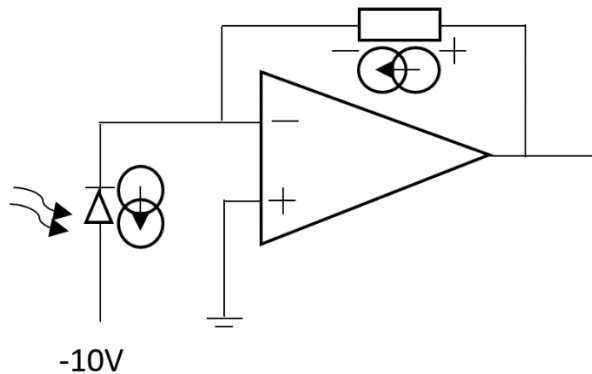
Bir PN bağlantısına ters yönlü voltaj uygulamak, tükenim bölgesinin daha geniş olmasına neden olur. Bunun fotodiyot uygulamalarında iki faydalı etkisi vardır. Birincisi, daha geniş bir tükenim bölgesinin fotodiyodu daha hassas hale getirmesidir. Bu sebeple, aydınlatmaya göre daha fazla çıkış sinyali üretmek için fotoiletken mod daha çok tercih edilir.

İkincisi, daha geniş bir tüketim bölgesinin, fotodiyotun bağlantı kapasitansını azaltmasıdır. Fotoiletken devrelerde, devrenin kapalı döngü bant genişliği, geri besleme direnci ve bağlantı kapasitansı dahil olmak üzere diğer kapasitans kaynakları sayesinde sınırlanır. Alçak geçiren RC filtredekine benzer şekilde kapasitansın azaltılması sonucu kesim frekansı değeri de bununla birlikte artmaktadır. Bu nedenle, fotoiletken mod daha geniş bant genişliğine izin verir ve dedektörün aydınlatmadaki hızlı değişimlere yanıt verme kapasitesini artırır.

Fotodiyotların doğrusal çalışma aralığı, uygulanan ters bias sayesinde genişler. Yüksek aydınlatma ile doğru ölçümler yapmak için fotoiletken modu kullanabilir ve ardından ölçüm gereksinimlerine göre ters bias voltajı seçilmektedir. Ters bias voltajının artması karanlık akımı artıracağı için voltaj artışı gürültü seviyesine göre sınırlandırılmaktadır.

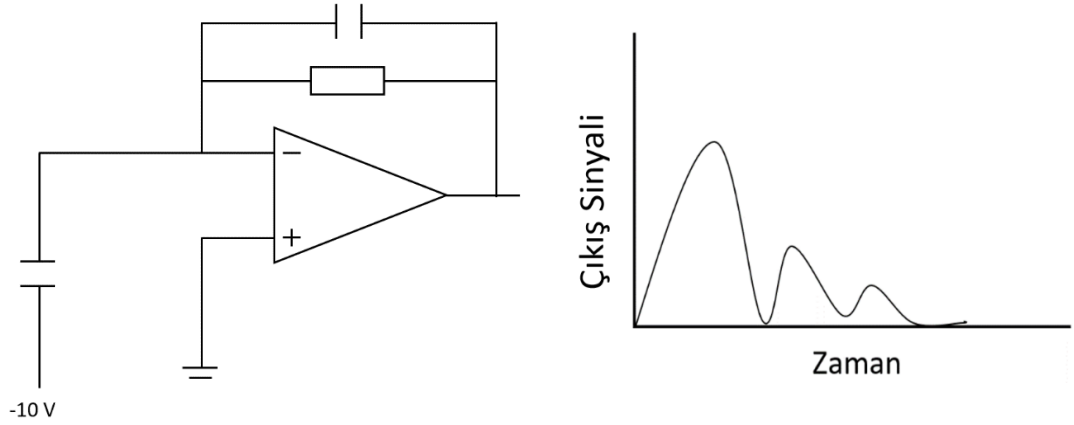
2.5.8 Geri besleme direnci

Sinyal ölçümü için bir geri besleme direnci eklenir. Geri besleme direncindeki fotoakımın yönü; direncin sağ tarafı pozitif, sol tarafı ise toprağa bağlanmıştır (**Şekil 2.21**). Bu nedenle, foto akım, Op-Amp çıkışını yükseltmektedir. Kaçak akım çıkışı kazançla orantılı olarak yükseltecektir. Bias voltajının gürültüsü varsa, bu gürültü sisteme girişim yapacağı için diyotun dayanabileceği kadar ters voltaj kullanılması önerilmektedir (Emirhan ve Özben 2022).



Şekil 2.21 Geri besleme direnci eklenmiş olan fotodiyot

Uygulamada geri beslemede sadece direnç varsa çıkışta bir salınım veya kesilim meydana gelir. Bu salınım, girişteki kapasitif diyottan kaynaklanmaktadır. Girişteki kapasitör, geri besleme sinyalini yavaşlatır ve bir gecikmeye sebep olur. Bunu telafi etmek için **Şekil 2.22**'deki gibi geri beslemeye paralel bir kondansatör eklenerek salınım kontrol altına alınır.

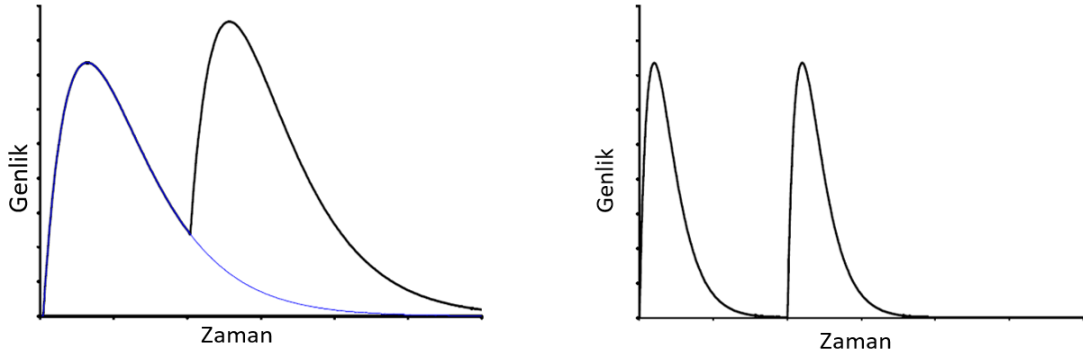


Şekil 2.22 Geri beslemeye paralel bir kondansatör eklenerek salınımın kontrol haline alınması

2.5.9 Op-Amp'ın bias akımı

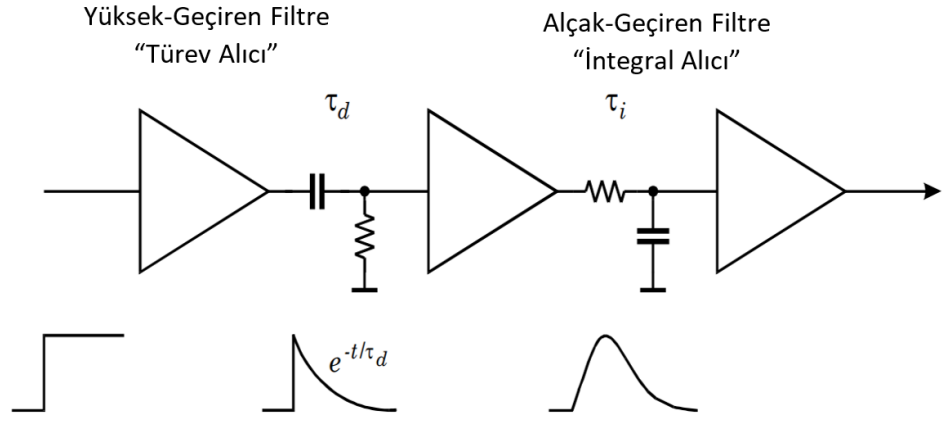
Gerçekte, bir (giriş) bias akımı + ve -girişlerinden akar. Bias akımı -pininden çıkarsa, diyot yüksek empedanslı bir akım kaynağı olduğu için akım diyota giremeyecektir ve geri besleme direncine girecektir (**Şekil 2.23**). Bunun sonucunda da büyük bir -DC ofseti oluşturur. Bazı durumlarda bias akımı, foto akımdan çok daha büyük olabilir.

Darbe şekillendiricinin ikinci amacı da art arda gelen sinyal darbelerinin örtüşmeden (birikme) ölçülebilmesi için darbe genişliğini sınırlamaktır. Darbe süresinin azaltılması, elektronik gürültü pahasına izin verilen sinyal hızının artırılmasına imkan sağlar. Darbe genişlikleri azaltılarak Şekil 2.25’deki gibi darbe çiftlerinin çözünürlüğünü artırır.



Şekil 2.25 Darbe genişliklerin azaltılarak darbe çiftlerinin çözünürlüğünün artırılması

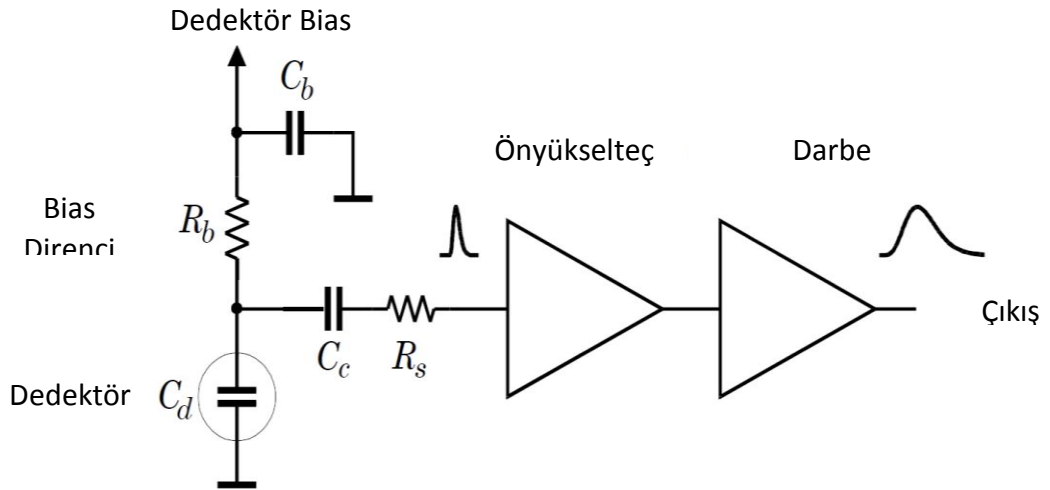
Şekillendiricinin tasarımı esnasında birbiriyle çelişen bu hedeflerin dengelenmesi gerekmektedir. Genellikle uygulamaya göre bir optimizasyon yapılır. Darbenin süresi, yüksek geçiren filtrenin azalma süresi sabiti olan τ_d parametresi ile ayarlanırken gürültü bant genişliği sınırlaması için bir sonraki basamak olan alçak geçiren filtre devresi de yükselme süresini artırır. Kısa darbeler için türev alma işlemi gerçekleştirdiği için yüksek geçiren filtre genellikle "türev alıcı" olarak adlandırılır. Alçak geçiren filtreler entegratör olarak isimlendirilirler. Yüksek geçiren filtrenin CR bölümü ve alçak geçiren filtrenin RC bölümü birlikte uygulandığı için bu şekillendiriciye CR-RC şekillendirici denir.



Şekil 2.26 Bir CR türev alıcıyı yüksek-geçiren filtre ve bir RC integral alıcıyı bir alçak-geçiren filtre olarak kullanan basit bir darbe şekillendirici

2.5.10.1 Bir dedektör ön yüz devresinin analitik analizi

Dedektör bias voltajı, direnç R_b üzerinden uygulanır. Burada baypas kapasitörü olan C_b , bias besleme hattındaki gürültülerin topraklanması işlevini gerçekleştirir. Ayrıca AC sinyalleri açısından bakıldığında, ön gerilim direncinin uzaktaki ucu bu kapasitör üzerinden toprağa bağlanır ve R_b dedektöre paralel şekilde bağlanmış olur (Şekil 2.27).

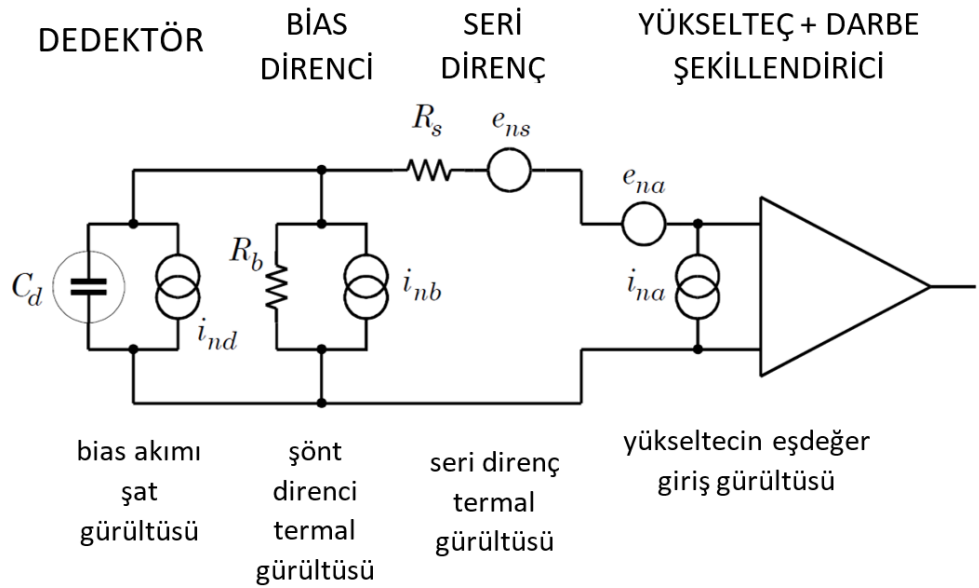


Şekil 2.27 Ön yüz sinyal işleme devresi blok gösterimi

Yükselteç giriş yolundaki C_c kuplaj kapasitörü, yükselteç girişinden gelen dedektör ön gerilim voltajını bloke eder. Burada aşağıda verilen dirençler gibi dedektör ile yükselteç girişi arasındaki dirençler R_s seri direnci ile temsil edilirler:

- dedektör elektrotlarının direnci
- bağlantı tellerinin direnci
- yükselteci büyük voltaj geçişlerine karşı korumak için kullanılan "giriş koruması" dirençlerini içerir.

Şekil 2.28’te verilen örnekteki gibi bir voltaja duyarlı bir yükselteçte tüm gürültü katkıları, girişinde görünen gürültü voltajı açısından hesaplanır ve dirençler gerilim veya akım üretici olarak modellenenirler.



Şekil 2.28 Gürültü analizi için eşdeğer devre

- Giriş ile paralel olan dirençler akım kaynağı görevi görürler
- Giriş ile seri bağlı dirençler, gerilim kaynağı görevi görürler

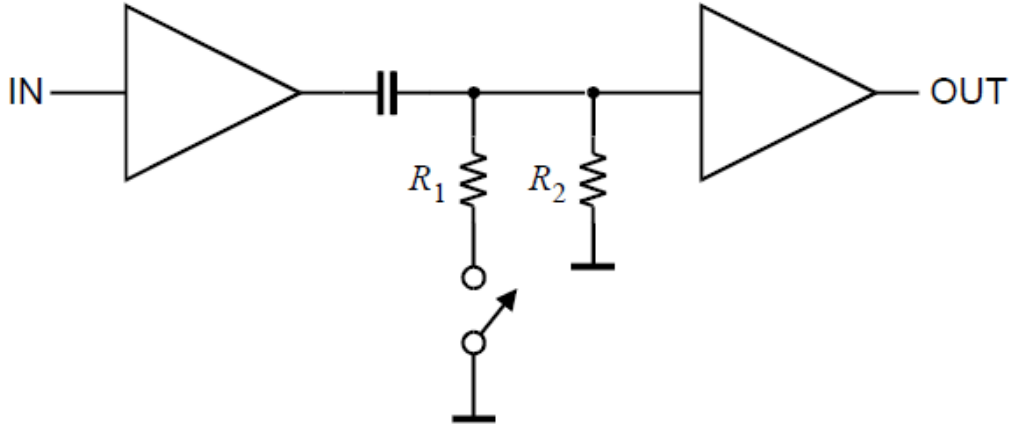
Analizdeki adımlar:

1. Tüm ayrı gürültü kaynaklarından yükselteç girişine gelen gürültü voltajının frekans dağılımını belirlenir.
2. Toplam gürültü çıkışını belirlemek için, bir CR-RC şekillendiricinin frekans yanıtı üzerinden entegre edilir.
3. Bilinen bir sinyal yükü için çıkış sinyali belirlenir ve eşdeğer gürültü yükünü hesaplanır (sinyal yükü için S/N=1)

İlk olarak, türev ve entegrasyon zaman sabitlerine ($\tau=\tau_d=\tau_i$) ve bu özel durumda pik süresine eşit, basit bir CR-RC şekillendirici varsayılır.

2.5.10.2 Taban çizgisi düzeltici çalışma prensibi

Öncelikle, taban çizgisinin oluşturulması için bir darbenin gelmesinden hemen önce sinyal yokken sinyal hattı toprağa bağlanır. Şarj ve deşarj zaman sabitlerini Şekil 2.29'da verildiği üzere R_1 ve R_2 dirençleri belirlemektedir. Boşalma zaman sabiti değeri, darbe genişliğine göre çok daha büyük değerde olmalıdır. Yüksek sayım oranlı uygulamaların performansının yükseltilmesi için asimetrik yapıda şarj ve deşarj süresi sabitleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.29 Bir BLR örnek devresi

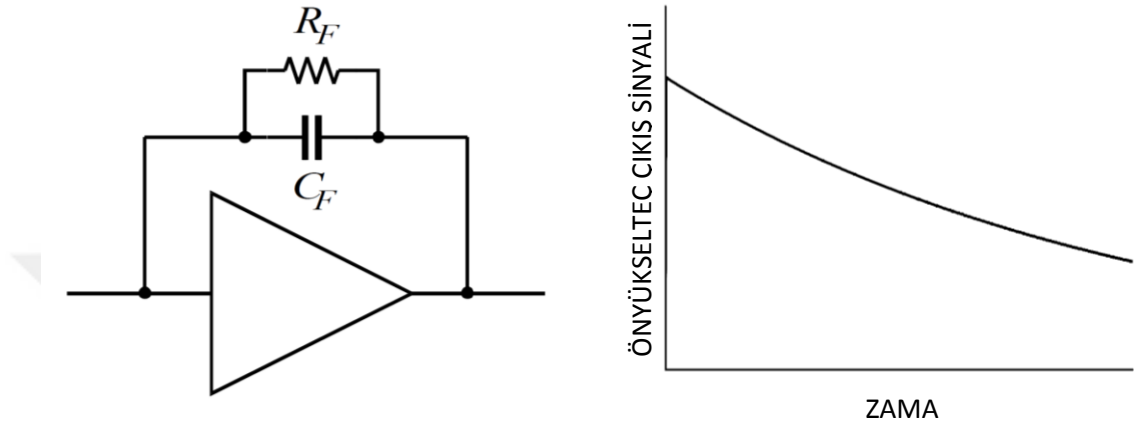
Bu, zamana bağlı filtrelemenin bir şeklidir. BLR tarafından uygulanacak gürültüyü azaltmak ve artefaktları değiştirmek için özen gösterilmelidir. İyi bir sıfır-kutup iptali, uygun taban çizgisi restorasyonu için çok önemlidir.

2.5.10.3 Kuyruk darbesi sinyal işlemleri

Yükselteç çıkışındaki sinyalin düzenlenmesi için çıkış sinyaline kuyruk (kutup sıfır) iptali işlemi uygulanmalıdır. Ayrıca ön yükseltecin kuyruk darbesine dönüştürülmesi ve ardından da kuyruk darbesinin Gauss darbesine dönüştürülmesi gibi sinyal işleme adımları uygulanmaktadır. Söz konusu işlemler aşağıda verilmiştir.

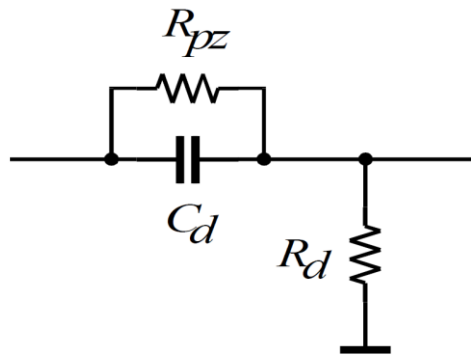
2.5.10.3.1 Kuyruk (kutup sıfır) iptali

Yüke duyarlı yükselteçteki geri besleme direncinin Şekil 2.30’da gösterildiği gibi deşarj edilmesi gerekmektedir ve bu genellikle geri besleme direnci ile yapılmaktadır.

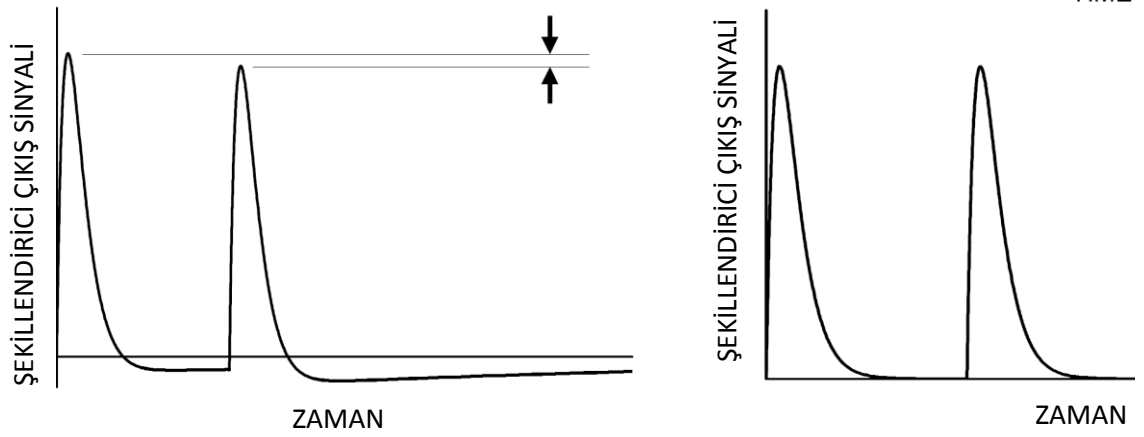


Şekil 2.30 Yüke duyarlı yükselteçteki geri besleme direncinin deşarj edilmesi sonucu çıkışı sinyalinin zamanla üstel olarak azalan bir forma dönüşmesi

Çıkışı artık basamak değil, zamanla üstel olarak azalan bir forma dönüşür. Şekillendirici çıktısı üzerine bindirilmiş olan bu üstel bozunma yetersiz kalma ve baseline farklılıkları nedeniyle çözünürlük kaybı gibi sonuçlara sebep olmaktadır. Devrenin türev alıcı kısma Şekil 2.31’deki gibi C_d ’ye paralel olarak bir R_{pz} direnci eklenir.



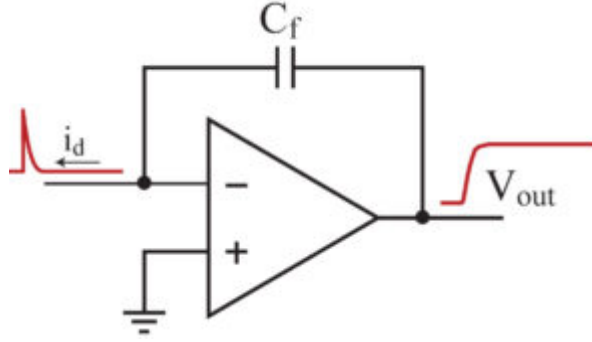
Şekil 2.31 Devrenin türev alıcı kısmına kuyruk iptali için R_{pz} direncinin eklenmesi



Şekil 2.32 Kuyruk iptali işleminin uygulanmasından önceki (sol) ve sonraki (sağ) sinyal formları

Darbe dedektörlerinin dedektör çıkışlarının okunabilmesi için genellikle darbe oluşumu esnasında dedektörden akan toplam yük ile orantılı şekilde çıkış verebilen, düşük gürültülü ve kararlı tasarıma sahip yüke duyarlı ön yükselteçlerin (CSP: Charge Sensitive Preamplifier) kullanımı tercih edilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı özellikle her bir palsın yüksek hassasiyetle ölçülmesi gereken radyasyon dedeksiyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar (Cremat Inc. 2022).

Yüke duyarlı ön yükselteçlerde dedektörden gelen yükler geri besleme kondansatörü C_f üzerinde depolanır ve dedektörün kazancı da $1/C_f$ oranındadır. Dedektörden gelen her akım darbesi dedektör akımının zaman integralinin alınması sayesinde ön yükseltecin çıkışında **Şekil 2.33**'te belirtildiği formda bir basamak çıkışı oluşturur. Bir CSP'nin kazancı, örneğin V/pC gibi giriş yükü üzerinden çıkış voltu birimlerinde verilir. Bazı uygulamalarda ise kazanç, MeV girişi başına çıkış voltajı olarak (örneğin mV/MeV) verilir. Silikon dedektörler, elektron yükü başına 3.6 eV iyonizasyon hızına sahiptirler ve γ ışınlarını veya enerjik parçacıkları tespit etmekte kullanılırlar.

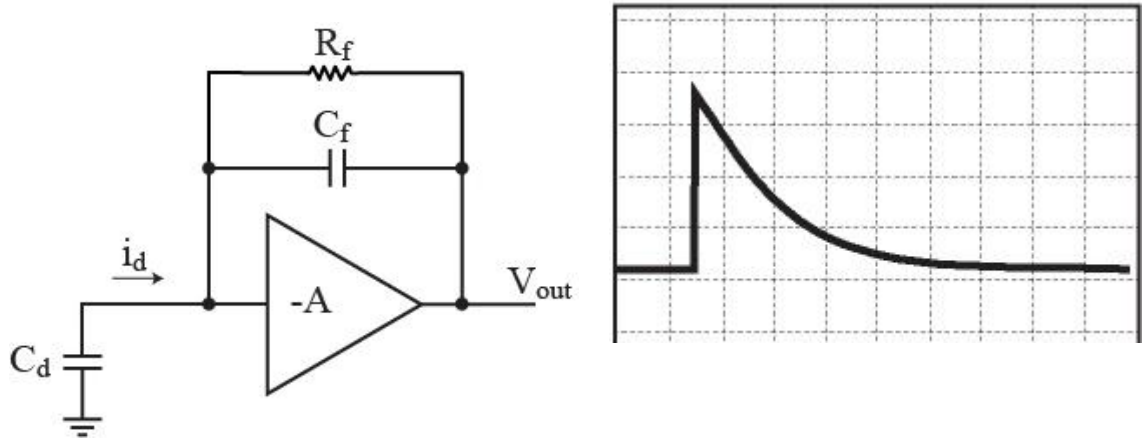


Şekil 2.33 CSP giriş ve çıkış sinyalleri

Akım darbesi Yüke Duyarlı Önyükselteç (CSP: Charge Sensitive Preamplifier) girişinden akarken, çıkış darbesinin polaritesi pozitifdir ve dedektör akımı CSP'ye aktığında, çıkış darbesi negatif olur. Dedektörden gelen akım hızlı ya da yavaş şekilde toplanabilir ama yüke duyarlı ön yükselteç devre tasarımı sayesinde, son ön yükselteç katmanının çıkışı yük toplama hızından bağımsız olabilmektedir. Böylece tepki, dedektör ve ön yükselteç arasında bağlı bulunan kaçak dirençten veya ön yükselteç girişindeki kaçak kapasitanstan etkilenmez. Dedektörden gelen sinyal ve ona karşı ön yükseltecin çıkışı örnek olarak şekilde verilmiştir.

2.5.10.3.2 Yüke duyarlı ön yükseltecin kuyruk darbesine dönüştürülmesi

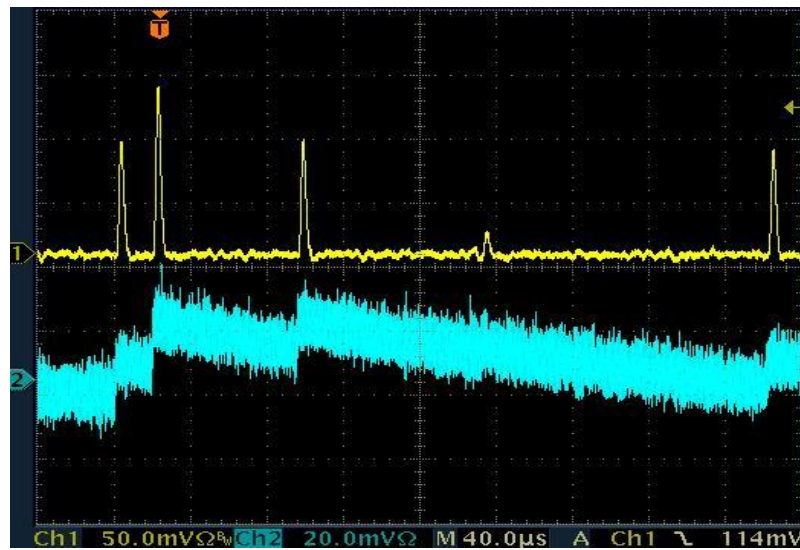
Ön yükseltecin çıkışı maksimum olana kadar çıkış yükselecektir ve bunun için devre üzerinde çıkışı sıfırlayacak bir yol yoktur. Çıkışın sıfırlanması için en pratik yol geri besleme kondansatörüne bağlanacak yüksek değerlikte paralel bir akım boşaltma direncidir. Yüke duyarlı Yükselteç (CSA: Charge-Sensing Amplifier) darbe yanıtı, yükselme süresinin Şekil 2.33'te gösterildiği gibi sabit kaldığı, ancak Şekil 2.34'te gösterildiği gibi artık uzun bir bozunma süresinin olduğu bir kuyruk darbesine dönüştürülür. Böylece üstel bozunma olarak cereyan eden bozunma süresi, $R_f C_f$ çarpımı ile tespit edilir.



Şekil 2.34 Yüke Duyarlı Ön Yükseltecin Çıkış Tepkisinin Kuyruk Darbesine Dönüştürülmesi

2.5.10.3.3 Kuyruk darbesinin Gauss darbesine dönüştürülmesi

Yüke duyarlı ön yükseltecin kuyruk darbe sinyali şeklindeki çıkışı sadece ölçülebilir çıktı üretimi için bir basamaktır. Genellikle kuyruk darbesinin devamında birkaç darbe daha kuyruk üzerine binmektedir ve bu da sinyalin sayısallaştırılması için çok pratik bir durum değildir. Bozulma süresinin hızlandırılması için genellikle yüke duyarlı ön yükselteçlerin çıkışı, giriş sinyalini simetrik çan eğrisine çeviren bir şekillendirici yükselteç basamağına bağlanmaktadır. Bu devre yaptığı filtrasyon sayesinde SNR oranında gelişme sağlanmaktadır. Bu devrenin çıkış sinyali üzerindeki sonuçları Şekil 2.35’de görülebilir.



Şekil 2.35 Kuyruk darbesinin Gauss darbesine dönüştürülmesi

Şekillendirme basamağı için önemli parametrelerden birisi de çıkış darbelerinin genişliğiyle orantılı olan şekillendirme zamanıdır. Bunun seçimi için göz önünde bulundurulması gereken faktörler:

- 1) Şekillendirme zamanı elektriksel gürültü minimum olacak şekilde seçilmelidir. Şekillendirme yükselteçleri bant geçiren süzgeçlerdir ve şekillendirme zamanı bu frekansla ilgilidir. Uygun süre deneysel olarak denemeler yapılarak bulunmalıdır.
- 2) Şekillendirme süresi dedektörden gelen tüm sinyali toplamaya yetecek kadar uzun seçilmelidir. En azından foton sinyalinin süresi kadar uzun seçilmelidir. Bazı sinyaller mikrosaniye mertebesinde sürmektedir.
- 3) Şekillendirme süresi dedektörün beklenen sayım oranını sağlayacak kadar kısa seçilmelidir.

2.5.11 Dedektör bileşenleri seçimi

Gama fotonları tarafından üretilen az miktarda yük nedeniyle bu tür tasarımlar çok düşük gürültülü bileşenler gerektirirler. Yük miktarının çok küçük olması, γ fotonlarını algılama eşiğinin düşürülmesi ve devredeki toplam gürültü miktarının en aza indirilmesi için düşük gürültülü bileşenlere ihtiyaç duyulur. Gama kaynağı darbesini algılayan ve devrenin en kritik bileşenlerinden biri olan dedektörün seçimi son derece önemlidir. Dedektörün hassasiyeti, tükenim bölgesinin boyutuna bağlıdır. Tükenim bölgesi ne kadar büyük olursa, tükenim bölgesine o kadar fazla foton çarpabilir ve daha iyi bir şarj ve dolayısıyla daha iyi bir algılama ile sonuçlanır. Bu da PIN diyotun gerçek boyutuna ve diyota uygulanan ters bias miktarına bağlıdır. Diyot ne kadar büyükse ve uygulanan ters bias ne kadar fazlaysa, algılamaya karşı o kadar hassas olacaktır. Gerilim arttıkça, tüketim bölgesi artar. Böylece iki plaka arasındaki mesafe artar ve daha iyi bir algılama sağlar. Ancak diyotun boyutunda ve uygulanabilecek ters bias miktarında birkaç sınırlama vardır. Yüksek kapasitans, daha geniş alan dedektörleri ile gelme eğilimindedir ve bu nedenle devrenin gürültü kazancını artırır. Kaçak akımlar, büyük bir ters sapma değeri ile devreye girecektir. Diyot kapasitansı çok büyükse, γ vuruşu algılanmak yerine soğurulur. Gerilim arttıkça, tükenim bölgesi artar. Böylece iki plaka arasındaki mesafe artar ve diyotun kapasitif değeri azalır. Düşük ters bias voltajlarında,

plakalar birbirine yakın olduğu için kapasitans değeri artar. Voltaj daha yüksek olduğunda, plakalar arası mesafe daha uzaktır ve kapasitans daha düşük olur.

2.6 Zırhlama

Zırhlama radyasyon tesislerinde personelin aldığı dozun önlenmesi için önemli ve etkin bir yöntemdir. I_0 fotonun başlangıç şiddeti, radyasyon enerjisi ile maddenin bir fonksiyonu olan μ ise maddenin azalma katsayısı olmak üzere bir fotonun mesafe ile üstel şekilde azalan enerjisi **Eşitlik 2.42**'de verildiği gibi

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad 2.42$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Belirli bir enerji seviyesi için, maddenin azalma katsayısı olan μ değeri, kullanılan maddenin atom numarasına bağlı olarak belirlenir. Genelde zırhlama için kurşun tercih edilmekle birlikte kalın zırh uygulamalarında kurşunun yanında yüksek Z 'ye sahip maddeler ile beton birlikte kullanılmaktadır. Zırh kalınlığının ölçümü için ışıma şiddetindeki düşüş kullanılabilmektedir.

Işınlama ve soğurulan doz, radyasyon şiddetiyle direkt olarak ilgili olmasından dolayı denklemler **Eşitlik 2.43** ve **2.44** ile ifade edilebilirler:

$$X = X_0 e^{-\mu x} \quad 2.43$$

$$D = D_0 e^{-\mu x} \quad 2.44$$

Işıma madde dışında ölçüldüğünden dolayı denklemler geçerli sayılabilirler. Dozimetrede, **Eşitlik 2.45** ile verildiği gibi:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu HVL} \quad 2.45$$

şiddeti yarıya düşüren kalınlık olan yarı değer kalınlığı (HVL : Half-value layer) **Eşitlik 2.46**'daki gibi hesaplanırken:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad 2.46$$

Şiddeti **Eşitlik 2.47** ile gösterildiği gibi onda birine düşüren

$$\frac{I_0}{10} = I_0 e^{-\mu TVL} \quad 2.47$$

kalınlık değeri olan onda bir değeri kalınlığı TVL parametresi ise **Eşitlik 2.48** ile ifade edilmektedir:

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad 2.48$$

Buna göre $TVL=3.323 HVL$ 'dir.

Yüksek enerjili fotonların madde içine girmeleri sonucu yüksek enerjili elektronlar oluşmaktadır ve bu elektronların hızlıca enerjilerini kaybetmeleri sonucu yüksek nüfuz etme özelliğine sahip olan Bremsstrahlung ışıması ortaya çıkmaktadır. Zırlama kalınlığı hesabında bu ışımanın da hesaba katılması gerekmektedir ve genellikle güvenlik için hesaplanan değerden daha fazla kalınlıkta malzeme kullanılmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

İyonize radyasyon dedektörü ve kaynak yön tayini sistemi muhtelif donanım ve yazılım bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Dedektör sistemini oluşturan donanımın başlıca kısımları aşağıda verilmiştir:

- dedektör probu
- elektronik kartlar
- HMI ünitesi
- metal şasedir.

Dedektör sisteminin yazılım kısmı ise:

- FPGA yazılımı
- HMI yazılımı bileşenlerinden oluşmaktadır.

3.1 Dedektör Probu

Dedektör probu, gelen iyonize edici radyasyonu elektriksel sinyallere çevirerek algılamaya yarayan yarayan sistemdir. Başlıca kurşun bir muhafaza ve PIN diyot dizilerinden oluşur. Dozimetri uygulamalarında kullanılacak radyasyon sensörleri arasında PIN diyotlar yüksek hassasiyetleri, doğrusallıkları, küçük boyutları, yüksek kuantum verimliliği, hızlı tepki süresi ve fotovoltaiik moda veya farklı uygulamalarda fotoiletkenliğe bağlı olarak ön gerilimli veya gerilimsiz modlarda kullanılabilmesi gibi avantajları ile genellikle çok tercih edilmektedir (Bueno vd. 2004).

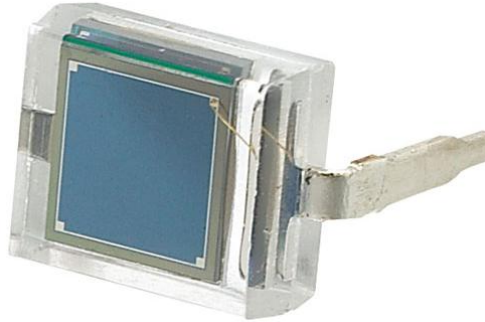
3.1.1 BPW 34 PIN diyot

Dedektör sensörü olarak yüksek foto ve radyan duyarlı BPW34 model silikon PIN tipi fotodiyotlar seçilmiştir. BPW 34; 5.4 mm uzunluğa, 4.3 mm genişliğe, 3,2 mm yüksekliğe ve 7.5 mm² radyan duyarlı alana sahip bir PIN diyottur. Radyasyona duyarlı diğer yarı iletken komponentlere göre düşük maliyetli ve temini kolay bir bileşenlerdir (Vishay Intertechnology Inc. 2021). Piyasadan opak ve pencereci olmak üzere iki türlü

BPW 34 temin edilmiştir. Silisyum dedektör için sayaç girişinde eşik yükü oluşturabilecek minimum radyasyon enerjisi elektron-deşik çiftibaşına $E_{rad}=3.65$ eV'tur. BPW34 için minimum dedekte edilebilecek seviye yaklaşık olarak $E_{min}=22.7$ keV olarak hesaplanır. BPW 34'ün bazı önemli teknik bilgileri aşağıda verilmiştir:

- Boyutları (uzunluk $\times$ genişlik $\times$ yükseklik): 5.4 mm $\times$ 4.3 mm $\times$ 3.2 mm
- Işımaya hassas yüzey alanı: 7.5 mm²
- Yüksek foto hassasiyete sahiptir
- Yüksek ışıma duyarlılığına sahiptir
- Görünür ve yakın kızılötesi bölgesi uygulamalar için uygundur
- Hızlı tepki süresine (2ns) sahiptir
- Kırılma voltajı 60 V'tur
- Karanlık akımı 2-30 nA arasındadır
- Kapasitans değeri 25-40 pF arasındadır

BPW34'ün dış görünüşü **Şekil 3.1**'de verilmiştir:



Şekil 3.1 BPW 34 PIN Diyot

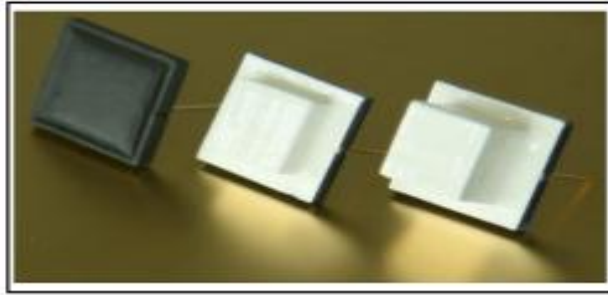
3.1.2 First Sensor X100-7 PIN diyot

Deneme amaçlı kullanılan bir diğer PIN diyot ise First Sensor firmasının ürünü olan X100-7'dir. Plastik sintilatör eklenmiş olan bu PIN diyota ait teknik bilgiler aşağıda verilmiştir (First Sensor AG, 2018):

- 100 mm² yüzey alanına sahip PIN dedektör
- CsI:TI sintilatör (8mm kalınlığında)

- Düşük kapasitans ve karanlık akımı değeri
- Yüksek şönt rezistansı
- Yüksek hassasiyetli
- Seramik paketli, 2 pinli

PIN diyotun dış görünüşü Şekil 3.2’de verilmiştir.



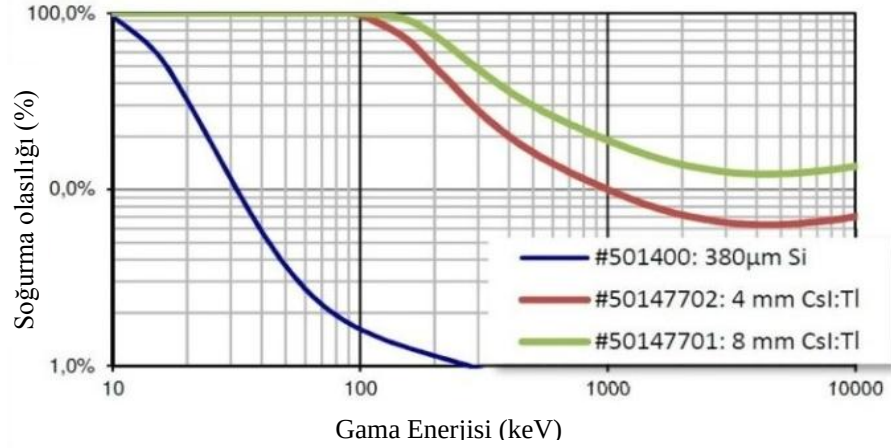
Şekil 3.2 First Sensor X100-7 PIN Diyot

X100-7 PIN Diyot çalışma aralıkları ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 X100-7 PIN Diyot çalışma aralıkları

Simge	Parametre	Min	Max	Birim
T_{STG}	Depolama Sıcaklığı	-40	65	°C
T_{OP}	Çalışma Sıcaklığı	-20	60	°C
V_{max}	Max Ters Voltaj		50	V
I_{TEPE}	Tepe DC Akımı		10	mA

Si, 4mm kalınlığında CsI:TI ve 8mm kalınlığında CsI:TI sintilatörlü PIN diyotlara ait γ enerjisine göre soğurma eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir. Buna göre soğurma olasılığı en yüksek olan PIN diyot modelinin 8mm CsI:TI sintilatöre sahip olan versiyonun olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3 Farklı modellerdeki X100-7 PIN Diyotların değişik enerjilerdeki γ radyasyonunu soğurma olasılıkları (23°)

X100-7 PIN diyot geniş dedeksiyon yüzeyi, verimi ve opak kaplaması ile çok verimli olsa da 100 Euro civarındaki fiyatı ile deneyler için yüksek maliyetli olacağı için ilk etapta prototip tasarımında tercih edilmemiş, onun yerine BPW 34 diyotlar kullanılmıştır.

Dedektör sisteminin yüzey alanının artması akı miktarını, dolayısı ile de yüzeyden geçen toplam ışıma miktarını arttıracak için geniş yüzeyli dedektörler ölçüm için daha avantajlıdır. Bu sebeple dedektörün algılayıcı yüzeyini arttırmak amacı ile dört adet BPW34 diyot paralel bağlanarak her bir dedektör dizisi için ışımaya hassas yüzey alanı $7.5 \text{ mm}^2 \times 4$ olarak artırılmış, böylece daha yüksek algılama performansı sağlanmıştır (Andelković ve Ristić 2013).

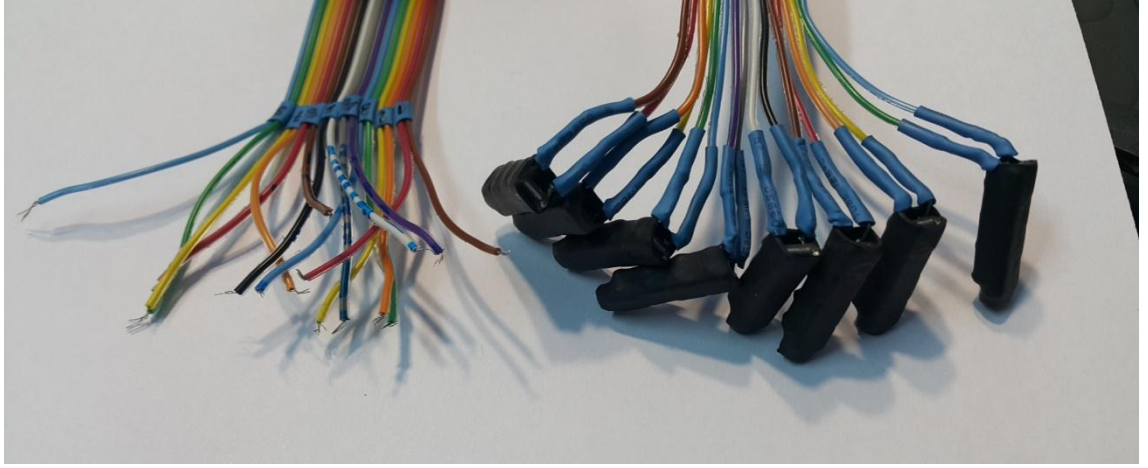
PIN diyotların yüzeyleri aynı hizada olacak şekilde hizalanması ve paralel şekilde lehimlenmeleri suretiyle 4 diyotlu sensör dizileri oluşturulmuştur. Bu sensör dizileri, prob üzerine 8 farklı yönde yerleştirilecek olan sensör birimlerini oluşturmaktadırlar. BPW34 PIN diyotlar, görünür bölgedeki ışığa karşı da duyarlı oldukları için iyonize edici radyasyon dışındaki çevresel ışınlara da tepki vermekte, bu da sensör çıkışında gürültü tespit edilmesine sebep olmaktadır. Oluşan bu gürültüyü engellemek amacı ile sensörlerin görünür ışığa karşı optik olarak izole edilmeleri gerekmektedir. Bu işlem için Şekil 3.4'ten anlaşılabileceği gibi elektrikte kabloların ek yerlerinin yalıtımı için de kullanılan opak makaron malzemesi kullanılmıştır. Sensör dizisi, uygun ebattaki ısı ile

daralan siyah makaron boruların içine yerleştirilmiş, ardından da ısı uygulanmış ve makaronun büzülerek dedektörün sarması ve optik izolasyonun gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.4 Makaron boruların içine yerleştirilmiş olan BPW34 diyot dizileri

Optik izolasyon filtreleme işlemi yaparak ışığa duyarlı PIN diyotları ışık gürültüsünden izole etmekle birlikte dedektör ile kaynak arasında fiziki bir engel de teşkil ettiği için alfa ışınlarının algılamasını önleme gibi bir dezavantaja da neden olmaktadır. PIN diyotlar paralel olarak bağlandıktan sonra uçlarına sinyali Düşük gürültülü yükselteç (LNA: Low Noise Amplifier) kartına taşıyacak sinyal kabloları lehimlenmiştir. Bağlantı kablolarının uzunluğunun artması sonucunda gürültü miktarının arttığı ve sinyal seviyesinin de düştüğü daha önceki çalışmalarda tecrübe edildiğinden sinyal kablolarının uzunluğu mümkün olduğunca kısa tutulmaya çalışılmış ve gürültüyü önlemek için ayrıca ekranlı sinyal kabloları kullanılmıştır. Aynı yöntem kullanılarak 4 adet ana yön ve 4 adet de ara yön olmak üzere toplam 8 farklı yöne bakacak şekilde toplam 8 adet özdeş sensör dizisi **Şekil 3.5** ve **Şekil 3.6**'daki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.5 Paralel PIN diyot dizisi ve renk kodlu sinyal kabloları

3.1.3 Dedektör kapasitansı ve fotovoltatik mod

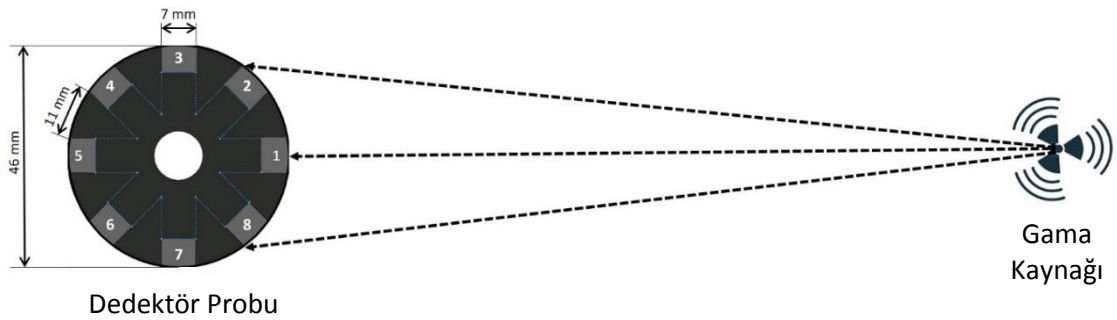
Fotodiyotun aktif alanı sabit olmasına rağmen, uygulanan ters öngerilim voltajı değiştirilerek tükenim bölgesinin genişliği değiştirilebilmektedir. Fotovoltatik mod, minimum kaçak akım sağlar ancak daha düşük tükenim bölgesi nedeniyle daha düşük hassasiyete sahiptir. Aksine, fotoiletken mod, uygulanan ön gerilim voltajıyla orantılı olarak tükenim bölgesindeki artış nedeniyle daha yüksek duyarlılığa sahiptir, ancak bu, ölçülebilir minimum doz hızı seviyesini sınırlayan kaçak akım değerini artırır. Ayrıca, daha geniş bir tükenim bölgesi, fotodiyotun bağlantı kapasitansını azaltır. Temel bir RC alçak geçiren filtre için, kapasitansın azaltılması, dedektörlerin hızlı aydınlatma değişimlerine yanıt verme yeteneğini en üst düzeye çıkaran daha geniş bant genişliğine izin veren kesme frekansını artırır. Bu avantajlarından dolayı tasarımda mevcut modlar arasından fotovoltatik modun kullanımı tercih edilmiştir.

Ancak artan sıcaklık kaçak akımı da artırmaktadır, yapılan çalışmalar PIN diyotların ortam oda sıcaklığında kullanılmaya uygun olduğunu göstermektedir. Paralel bağlantı dedektör alanını arttırdığından, karanlık akımı 2.1 pA'dan 8.4 pA'ya çıkarmak ve ayrıca bağlantı kapasitansını 79.9 pF'yi dört BPW 34 kapasitansının toplamına yükseltmek gibi dezavantajlara da sahiptir (Knoll 2010).

3.1.4 Prob mekanik yapısı

Gama ışını fotonu madde ile etkileştiğinde kısmi ya da tamamen enerjisini aktararak başlıca Compton saçılması, fotoelektrik soğurma ve çift oluşum gibi olası etkileşim mekanizmaları oluşabilmektedir. Gama ışınlarının yönlü bir şekilde algılanabilmesi için sensör olarak kullanılan fotodiyot dizisinin cephesi dışındaki yönlerden gelen ışınlar karşı izole edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla çevresinin yüksek Z'li, tercihen kurşun olan malzeme ile kuşatılması ve diğer yönlerden gelen ışınların bloklanması gerekmektedir.

Bu amaçla bir kurşun malzemeden oluşacak bir dedektör gövdesi tasarlanmıştır. Silindirik yapıdaki bu tasarımın üzerinde BPW34 dizilerinin içine gömülü şekilde yerleşebileceği, birbirinden 45°'lik farkla 8 farklı yöne konumlandırılmış, yüzey normalleri merkeze dik olacak şekilde yerleştirilmiş dedektör dizisi yuvaları bulunmaktadır. PIN diyot dizilerinin düzeni, γ ışını kaynakları hangi açısal pozisyonda olursa olsun aynı anda en fazla üç dedektör dizisi tarafından algılanabilecek şekilde ayarlanmıştır (Şekil 3.6). Diğer dedektör dizileri ise dedektör gövdesi ya da kendi yan duvarları tarafından bloklanarak γ ışınlarının bu dizilere ulaşması engellenmektedir.

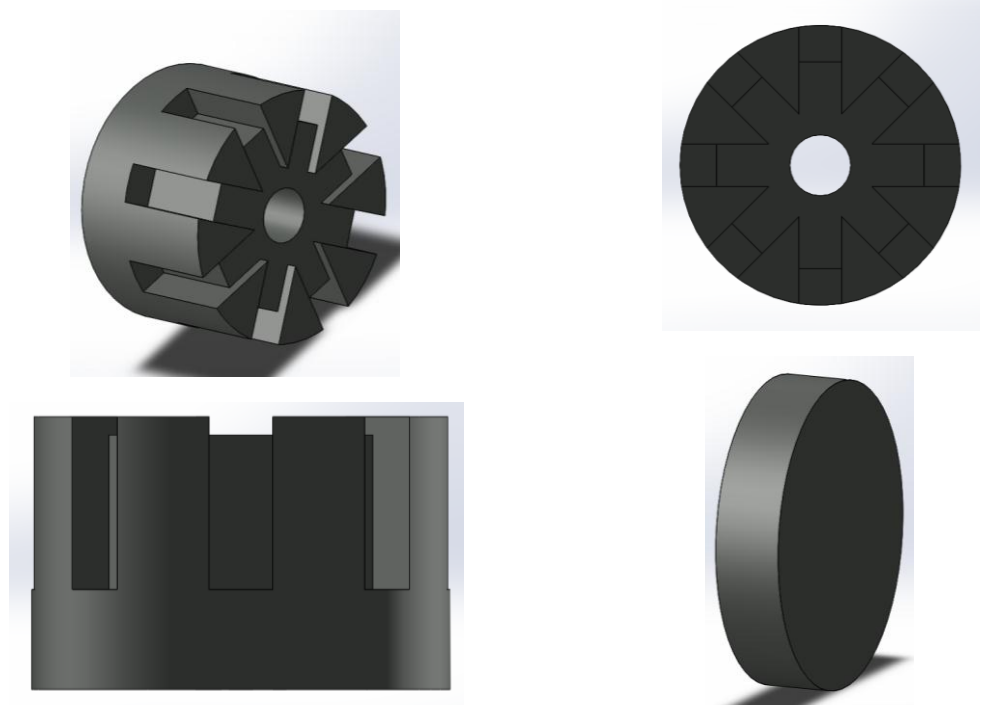


Şekil 3.6 Dedektör PIN diyot dizileri düzeni ve γ kaynağı görüş alanı

Dedektör gövdesinin görevi hem sensörlerin belirli yönlerde yerleşmesine ve o pozisyonda kalmalarına imkan sağlamak hem de dedektörlerin sadece cepheden gelen γ ışınlarıyla etkileşmeye girecekleri, arka tarafından ve yan taraflardan gelecek γ ışınlarıyla etkileşmelerini engelleyecek şekilde yönlü bir dedektör yuvası oluşturmaktır. Dedektörlerin yönlü olması için, dedektörün imal edileceği kurşun malzemenin azalma katsayısına göre hesaplamalar yapılmış ve elde edilen kalınlıklara göre dedektörler arası

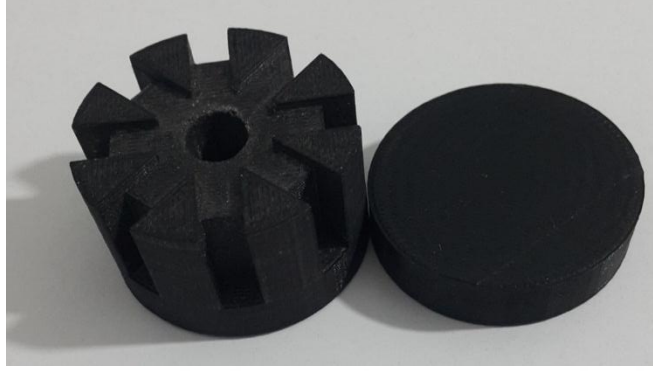
mesafeler, alt ve üst kalınlıkların ölçüleri belirlenmiştir. Dedektör yuvaları 7mm genişliğe sahiptir ve her bir dedektör dizisi birbirinden 11mm kalınlığında bir kurşun duvar ile izole edilmiştir. BPW-34 foto diyot dedektörünün açısal tepkisinin ölçümlerinin sonuçları, PIN diyotlarının 0°'ye normalize edilen açısal tepkisinin $\leq 30^\circ$ radyasyon geliş açıları için yaklaşık %20'den daha az değiştiğini göstermektedir (Alvarez-Romero vd. 1996). Bu ölçümler ve hesaplanan azalma dikkate alındığında, yönlü bir görüş açısı ve algılama sağlamak için sensör dizileri arasındaki 11 mm kalınlığındaki kurşun duvarın yeterli olduğu görülmüştür.

Ayrıca kabloların geçmesi için gerekli kanal boşlukları da tasarıma eklenmiştir. Dedektör gövdesinin ve üst kapağının 3 boyutlu çizimi Solidworks programı kullanılarak hazırlanmıştır. **Şekil 3.7'**de dedektör modelinin çizim resimleri verilmiştir.



Şekil 3.7 Dedektör gövdesinin ve üst kapağının Solidworks Programında 3 boyutlu çizimi

Elde edilen nihai çizim kullanılarak dedektör gövdesi ve kapak modeli 3 boyutlu yazıcıda plastik malzeme ile üretilmiştir. İmal edilen plastik modelin görüntüsü **Şekil 3.8**'da verilmiştir.



Şekil 3.8 3 boyutlu yazıcıdan plastik malzeme olarak çıkarılmış dedektör gövdesi ve kapak modeli

Elde edilen model kurşun dedektör gövdesi ve kapağı imalatı için referans olarak kalıp için kullanılmıştır. Kurşun yumuşak bir malzeme olduğu için tornada ya da Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol (CNC: Computer Numerical Control) tezgahında işlenmesi mümkün değildir. Bu sebeple imalat sadece kurşunun eritilip kalıba dökülmesi ile mümkün olmaktadır. Bu işlem ise kurşun buharının zehirli olması sebebi ile tehlikeli bir işlemdir. Bir metal döküm tesisinde plastik modeller kullanılarak bir döküm kalıbı hazırlanmış ve eritilen kurşunun bu kalıba dökümü ile aynı modelin kurşundan malzemedan olanı imal edilmiştir. Kurşun döküm yeterli hassasiyete sahip olmadığı için üretilen parçalar tekrar elde işlenmiş ve **Şekil 3.9**'da görüldüğü gibi tasarıma uygun hale getirilmiştir. Kurşunun yumuşak olması elde işleme için avantaj sağlamasına rağmen darbelere dayanıksız olması da dezavantaj sağlamaktadır. Bu sebeple kurşun bloğun iyi bir şekilde muhafaza edilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.9 Dedektör gövdesi

Gama ışınlarının dedektörden geçtikten sonra tekrar kurşun blokla etkileşime girme ihtimali vardır. Sonrasında oluşacak ikincil etkileşimler ve açığa çıkabilecek X ışınlarının tekrar dedektöre ulaşarak fazla sayıma yol açma ihtimali vardır. Bunu önlenmesi amacı ile dedektör bloğu üzerindeki dedektör yuvalarının iç kısımları ve ara duvarların yüzeylerine soğurucu kaplama yapılmıştır. Kaplama malzemesi olarak 0.5 mm kalınlığında kalay ile kaplanmış 0.5 mm kalınlığındaki bakır levha kullanılmış ve bu levha kurşun bloğun yüzeyine göre şekil verilerek yerleştirilmiştir (**Şekil 3.10**).



Şekil 3.10 Kurşun dedektör gövdesi içine yerleştirmek için şekillendirilmiş kalay ve bakır levha

Sonrasında yapılan kaplamanın sabit durması ve açılmaması için tüm dedektör bloğu **Şekil 3.11**'de olduğu gibi sıvı epoksi malzeme ile kaplanarak donması için 12 saat kadar bekletilmiştir. Bu şekilde daha sağlam bir yapı elde edilmiştir.



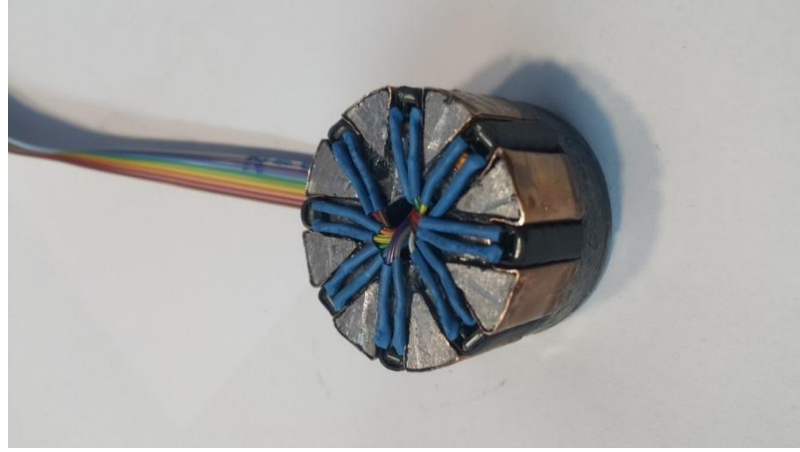
Şekil 3.11 Sıvı epoksi malzeme ile kaplanan dedektör bloğu

Dedektör gövdesi epoksi ile kaplandıktan sonra diğer bileşenlerin daha kolay yerleşebilmesi için tekrar elde işlenerek fazlalıklar alınmış ve yapı Şekil 3.12’deki haliyle montaja hazır hale getirilmiştir.



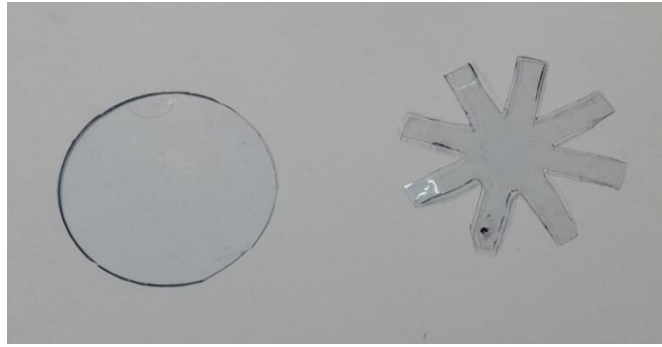
Şekil 3.12 Donma işleminden sonra fazlalıkları da alınmış olan montaja hazır dedektör gövdesi

Dedektörler numaralandırıldıktan sonra sırası ile kendilerine ait dedektör yuvalarına yerleştirilmişlerdir. Çok ince olan sinyal kablolarının etiketlenmeleri zor olacağı için alternatif olarak renkli kablo kullanılmış ve her kanala ait kablo kendi kanal numarasına ait sayıya göre direnç renk kodlarına uygun şekilde rengi belirlenmiştir. PIN diyot ve sinyal kablo bağlantıları, kurşun blok ile olabilecek kısa devrelere karşı makaron ile izole edilmişlerdir. Son hali Şekil 3.13’deki gibi olan sistemde sinyal kabloları birleştirilerek dedektör bloğunun orta kısmına açılmış olan kablo kanalından geçirilmiş ve bloğun alt kısmından dışarı çıkarılmıştır.



Şekil 3.13 Sinyal kabloları birleştirilen dedektör bloğu

Üst kapağın montajında gövde ile kapak arasında boşluğun mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Her ne kadar kablolar için gövdede kanal açılmış olsa da montaj esnasında kabloların ezilebilme olasılığı mevcuttur. Ek güvenlik önlemi olarak, kabloların kurşundan yapılan dedektör üst kapağı ile kısa devreye girmelerini önlemek için kapağın altına ve kapakla dedektör gövdesi arasına **Şekil 3.14**'de gösterilen şeffaf plastikten yalıtım malzemesi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14 Kapağın altına ve kapakla dedektör gövdesi arasına yerleştirilecek olan şeffaf plastikten üretilmiş yalıtım malzemesi

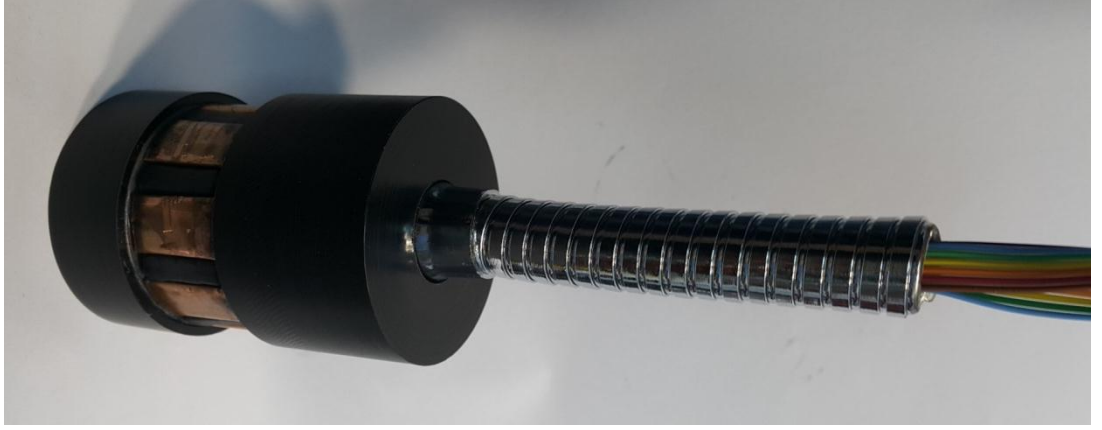
Yalıtım yapıldıktan sonra üst kapak dedektör gövdesine kılavuzla vida yuvaları açılmıştır. İki parça birbirine vidalanarak monte edilmiştir. Üst kapak yalıtılmış olduğundan oradan gelecek gürültünün elimine edilmesi için üst kapaktan cihaz şasesine bir topraklama hattı bağlanmıştır. Montaj öncesi hali **Şekil 3.15**'deki verilmiştir.



Şekil 3.15 Üst kapak dedektör gövdesine kılavuzla açılan vidalar

Kurşun dedektör bloğunun altına flex bir çelik boru yerleştirilmiştir ve sensörlerden gelen sinyal kabloları bu borunun içerisinden geçirilmiştir. Topraklama kablosuyla şaseye bağlanan bu metal boru ile sinyal kablolarının elektromanyetik yalıtımı sağlanmıştır. Probu taşıyan bu borunun diğer bir görevi de dedektör düzleminin istenilen açıda durmasının ayarlanmasına imkân vermesidir. Flex borunun diğer ucu, ana gövdeye sabitlenmiş bir metal rakordan cihaza girmektedir. Bu rakor gevşetilerek flex borunun uzunluğu ayarlanabilmekte ve ardından rakor sıkılarak boyu sabitlenmektedir. Böylece prob ile ana gövde arasındaki mesafe ayarlanabilir hale getirilmiştir.

Kursun blok ile flex borunun bir arada durabilmesi ve muhafaza edilmesi için bir plastik türü olan derlin malzemesinden oluşan kütük bloklar tornada işlenerek bağlantı ve izolasyon parçaları imal edilmiş ve tüm parçalar bir araya getirilerek Şekil 3.16'da gösterildiği gibi monte edilmişlerdir.



Şekil 3.16 Kurşun blok ile flex borunun birleştirilmiş hali

Tasarımda her bir PIN diyot dizisi, kurşun blok üzerinde bulunan, PIN diyot dizileri için yönlü bir görüş açısının oluşmasını sağlayan, birbirlerinden 11 mm kalınlığında ayırma duvarları ile izole edilmiş yuvalara gömülüdür. Bu duvarlar yandan gelen ışınları bloklayarak sensörlerin sadece kendi yüzey normallerine göre cephesinden gelen ışınları algılamalarını sağlamaktadır.

Soğurma malzemesi olarak kurşun seçilmiştir. İyi geometriye sahip bir soğurma malzemesi için, iletilen foton sayısı I ile soğurucu malzeme olmayan I_0 sayısı arasındaki ilişki **Eşitlik 3.1** ile verilir:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad 3.1$$

Burada μ , azalma katsayısı ve t , soğurucu malzemenin kalınlığıdır. Kötü bir geometri durumu için denklem **Eşitlik 3.2** ile verildiği gibi değiştirilir:

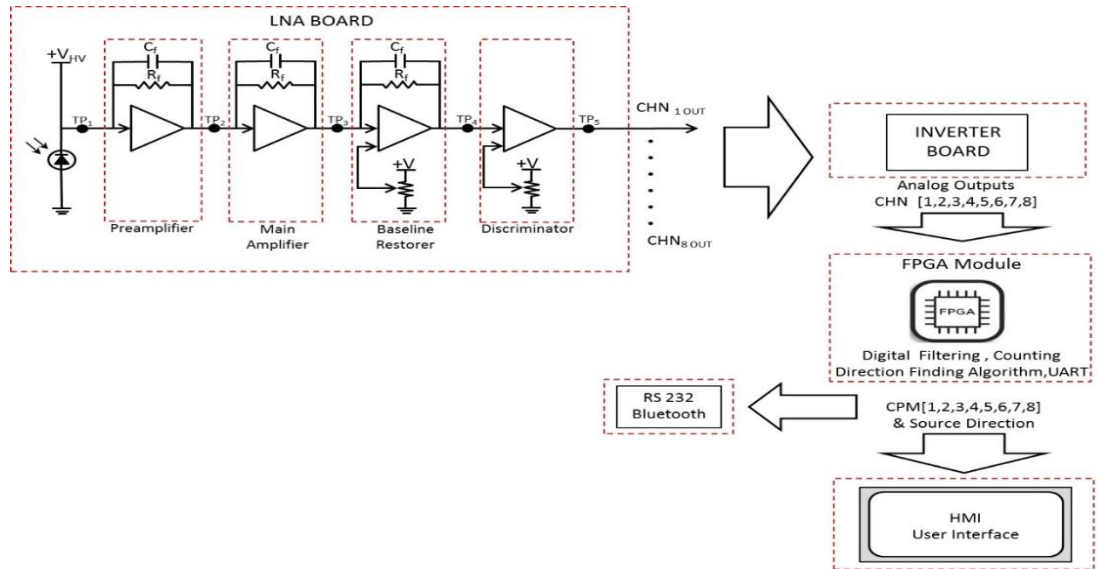
$$\frac{I}{I_0} = B(t, E_\gamma) e^{-\mu t} \quad 3.2$$

Burada, $B(t, E_\gamma)$ bir çarpma düzeltmesi sağlayan yığılma faktörüdür. $t=11$ mm kalınlığındaki kurşun zırhlama malzemesi için yapılan hesaplama göre $E_\gamma = 661,6$ keV enerjili ^{137}Cs kaynağı için yığılma faktörü de dahil olmak üzere azalma $I/I_0 \approx \%70$ olarak bulunur.

3.2 Elektronik Kartlar

Dedektör sistemi sinyal işleme, ölçüm, güç gibi amaçlar için kullanılan muhtelif elektronik kart bileşenleri içermektedir. Sistemdeki başlıca elektronik kartlar;

- 8 sensör dizisinden gelen sinyallerin işlenmesi için kanal başına birer adet kullanılan LNA dedektör kartları,
- güç sistemi kartları (yüksek gerilim kaynağı kartı, dijital voltaj göstergesi ve ayarlanabilir dedektör besleme gerilimi kartı),
- sinyal invertör kartı ve
- FPGA kartı ünitelerinden oluşmaktadır.

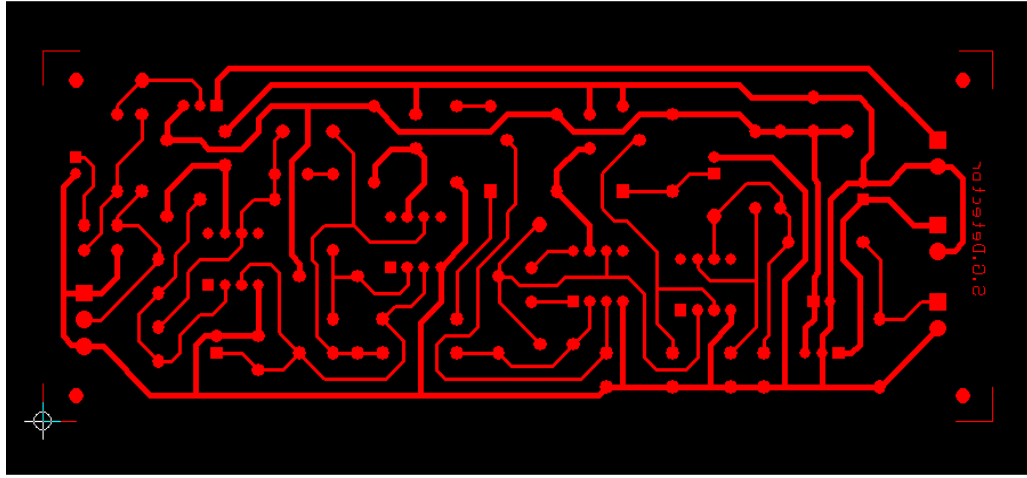


Şekil 3.17 Sistem blok şeması

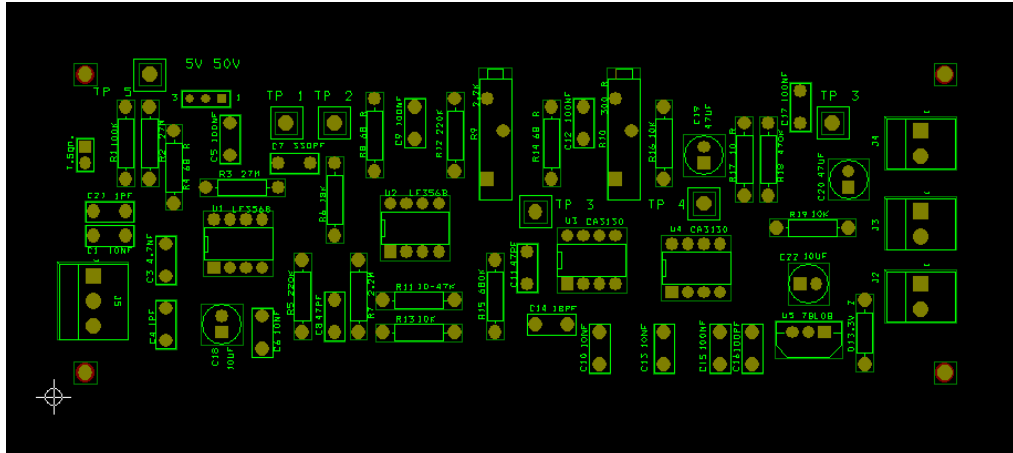
3.2.1 LNA dedektör kartları

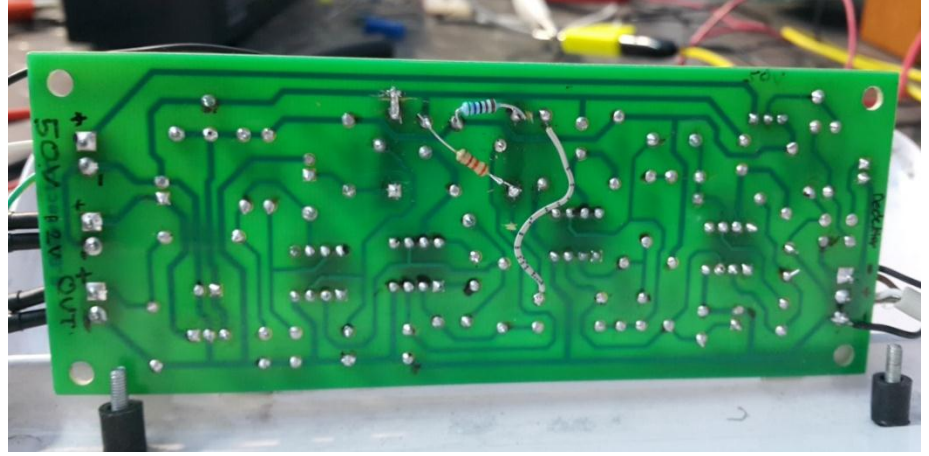
LNA dedektör kartı, daha önce bir çalışmada kullanılmış olan tasarımın baz alınarak geliştirildiği düşük gürültülü bir yükselteç devresi sistemidir (Özgen 1992). LNA kartı prototipi, montaj ve modifikasyon kolaylığı açısından daha uygun olması sebebi ile DIP kılıflı komponentlere göre tasarlanmıştır. İlerdeki çalışmalarda yüzey montajlı komponentler kullanıldığında bu tasarımdan çok daha küçük ebatlarda, kompakt bir elektronik kartı üretmek mümkündür. Kart üzerinde dedektörün bağlandığı kısımda PIN diyot dizisinin sinyal kablolarının bağlandığı dedektör (+), dedektör (-) ve toprak

girişlerinin bağlandığı üçlü klamens grubu bulunmaktadır. Kartın diğer ucunda ise diyot dizisinin yüksek voltaj beslemesinin bağlandığı HV(+), HV(-) girişleri, LNA kartının besleme uçları olan 12V (+), 12V (-) girişleri ve işlenmiş sinyalin bağlandığı çıkış (+), çıkış (-) terminal klemensleri bulunmaktadır. Bu doktora tezinde üretilen düşük gürültülü yükselteç kartı baskı devre şeması, bu şemanın ön yüzü, basılan kartın devre elemanları lehimlenmiş haliyle arka yüzü ve ön yüzü sırasıyla Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.

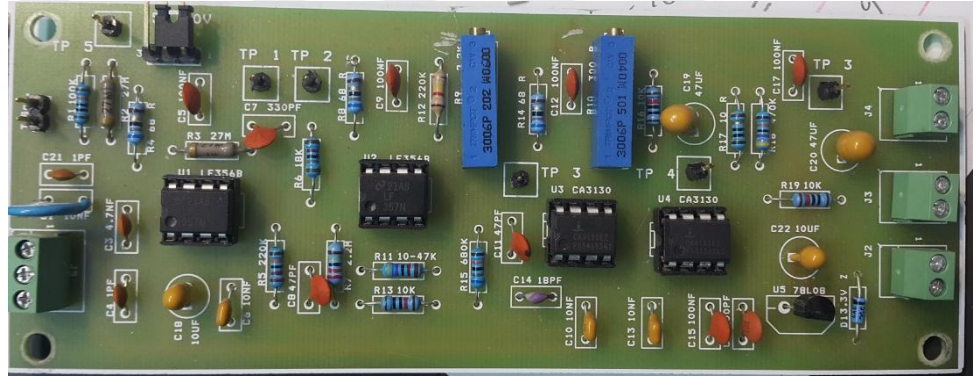


Şekil 3.18 Düşük gürültülü yükselteç kartı baskı devre şeması

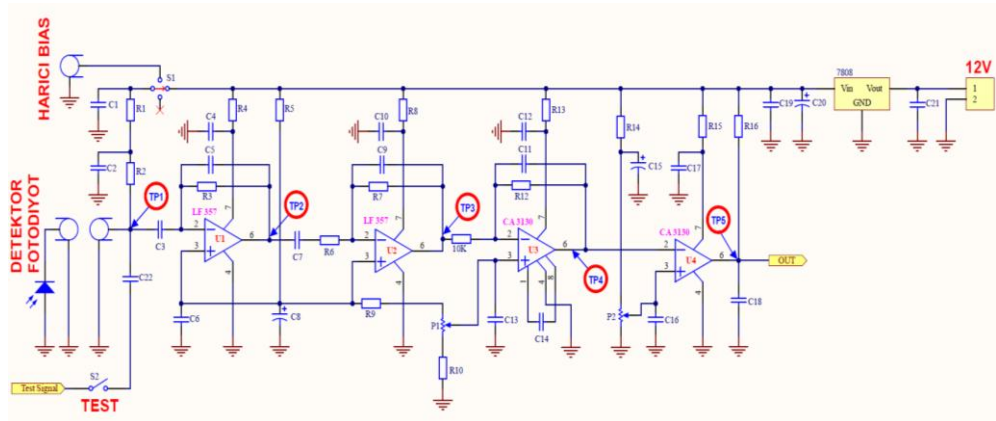




Şekil 3.20 Düşük gürültülü yükselteç kartı arka yüzü

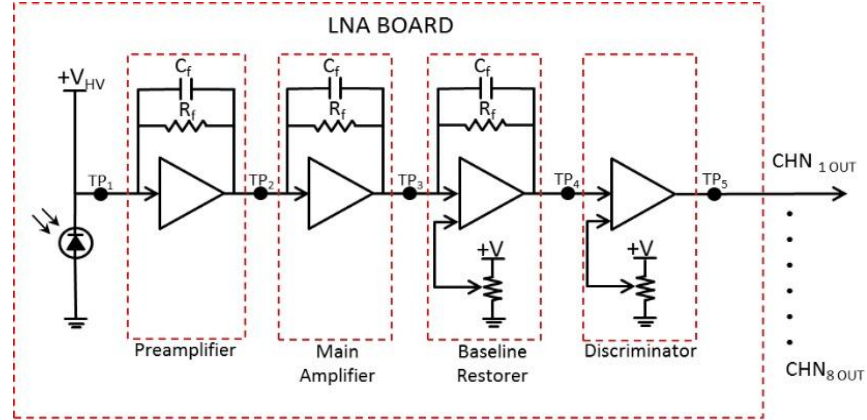


Şekil 3.21 Dizgileme işlemi sonrası düşük gürültülü yükselteç kartının ön yüzü



Şekil 3.22 Düşük gürültülü yükselteç kartı devre şeması

LNA kartı ön yükselteç, ana yükselteç, BLR ve diskriminatör blokları olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Düşük gürültülü yükselteç kartı sistem şeması

LNA kartlarının ön yükselteç ve ana yükselteç kısımlarında LF357 işlemsel yükselteci, BLR ve diskriminatör bloklarında ise CA3130 işlemsel yükselteci komponentleri kullanılmıştır. Düşük gürültülü yükselteç devrelerinde kullanılacak işlemsel yükselteçlerin belirli özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. İdeal bir işlemsel yükselteçte, açık çevrim kazancı seviyesi sonsuzdur ve sonsuz akım sürebilmesi için çıkış direncinin sıfır olması gerekmektedir. Her gerilimde çalışabilmesi için gerilim kaldırma kapasitesinin sonsuz olması gerekmektedir. Gürültüsüz çalışmalıdır ve bant genişliği sonsuz olmalıdır. İki giriş arası ve girişler ile toprak arası direncinin de sonsuz olması gerekmektedir. Kullanılan CA3130 CMOS ve bipolar bir Op-Amp transistördür. DIP-8 kılıfta olup içinde 1 adet yükselteç birimi bulunduran bir Op-Amp entegresidir. Yüksek bant aralığına sahiptir. 15MHz bant genişliğinde çalışmaktadır böylece hızlı anahtarlama yapabilir. CMOS yapısında olduğu için düşük güç tüketimi vardır. Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) kullanıldığı için giriş empedansı yüksektir. 9V/ μ s voltaj tepki hızına sahiptir. Genellikle hızlı örnekleme tutma güçlendirici, geniş bant yükseltici, tek aşamalı tam dalga hassas doğrultucu, voltaj takipçisi, voltaj regülatörü, frekans jeneratörü, gürültü dedektörü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Intersil Co. 2005).

LF357 JFET giriş işlemsel yükselteçleri düşük bias, ofset akımı ve gerilim değerlerinde kullanılabilen düşük kaymaya sahip yükselteçlerdir. Bu Op-amplar yüksek dönüş hızına, geniş bir bant genişliğine, hızlı yerleşme süresine, voltaj ve akımda düşük gürültüsü seviyesine ve yine düşük seviyede 1/f gürültü köşesine sahiptirler. Kullanım

alanları yüksek hızlı entegratörler, logaritmik yükselteç devreleri, yüksek hızlı DAC ve ADC sistemleri, örnekleme ve tutma devreleri, yüksek empedans tamponları, fotosel yükselticiler gibi uygulamalardır. Kullanılan yükselteçlere ait teknik bilgiler **Çizelge 3.2**'de verilmiştir (National Semiconductor Corporation 2001).

Çizelge 3.2 Kullanılan yükselteçlere ait teknik bilgiler

	<u>CA3130</u>	<u>LF357</u>
Besleme gerilimi	16V	±18V
Diferansiyel giriş voltajı	8V	±30V
Giriş voltaj aralığı	-0.5-8V	±16V
Çıkış voltaj aralığı	15V	±13 V
Giriş Akımı	0.5-30pA	30pA
Çıkış akımı	12-25mA	5-10mA
Maksimum çalışma frekansı	15 MHz	20 MHz
Tepki hızı	30 V/μs	50 V/μs
Giriş ofset akımı	0.5-30pA	3pA
Giriş empedansı	$1.5 \times 10^{12} \Omega$	$10^{12} \Omega$
Ortak Mod Reddetme Oranı (CMMR: Common-Mode Rejection Ratio)	90 dB	100 dB
DC voltaj kazancı	110 dB	106 dB
%0.01'e Yerleşme Süresi	1.2 μs	1.5 μs
Giriş kapasitansı	4.3 pF	3 pF

LNA kartı bloklarının işlevleri ve bu blokları ait ölçümler şu şekildedir:

3.2.1.1 LNA kartı ön yükselteç bloğu

LNA kartının ön yükseltici bölümü, yükü voltaja dönüştürücü yapısına sahip yüke hassas bir ön yükselteçtir ve devre şemasında U1 ile gösterilmiştir. PIN dedektöre gelen yüksek enerjili ışınların yarıiletkende oluşturduğu yükleri voltaj sinyallerine çevirmekte ve bu sinyalleri mV seviyelerinde voltaj darbelerine yükseltmektedir. Yüğü voltaja dönüştürme işlemi esnasında, darbelerin dalga biçiminin korunması önemlidir (Iniewski

2011). CSA’da çıkış voltajı (V_{out}) giriş yüküyle orantılıdır ve giriş akımına (I_{in}) bağımlılığı **Eşitlik 3.3** ile verilir:

$$V_{out} \sim q_{in} = \int I_{in}(t) dt \quad 3.3$$

Devreye bağlanan bir geri besleme kondansatörü C_f ve buna paralel bağlı bir geri besleme direnci R_f , bir geri besleme empedansı Z_f oluştururlar. CSA’nın kazancı (g_{signal}) şu şekilde verilir:

$$g_{signal} = \frac{V_{out}}{I_{in}} = -Z_{in} = -X_{C_f} || R_f = -\frac{1}{\frac{1}{R_f} + j\omega C_f} \quad 3.4$$

Devrede C_5 ile gösterilen geri besleme kondansatörü C_f ve R_3 ile verilen geri besleme direnci R_f ’nin bozunma zaman sabiti ($\tau_{bozunma}$) ile ilişkisi **Eşitlik 3.5** ile verilir:

$$\tau_{bozunma} = R_f C_f \quad 3.5$$

Bu, doğru bir yük–orantılı voltaj sinyalinin doğru şekilde elde edebilmek için ihtiyaç duyulan ve süreyi verir. Dedektör çıkışındaki sinyalin yükselmesi ve alçalması kısa bir süre içerisinde oluşacağı için, bu fonksiyonu sağlayacak yükselteç bloğunun yükselme süresinin çok hızlı olması, düşük iç gürültüye ve doğrusal bir tepkiye sahip olması gerekmektedir. Devrede R_4 ve C_4 filtreleme işlemi yapmaktadır. Devrede bulunan kuplaj kapasitörü C_3 yüksek besleme geriliminden akımın yükselteçe geçmesini engeller. C_3 kısa devre olsa bile R_2 direnci sayesinde nano amper mertebelerine kadar düşürülerek zarar görmesini engellemektedir.

3.2.1.2 LNA kartı yükselteç bloğu

Ön yükselteçten çıkan sinyaller ikinci sinyal işleme bloğu olan ve şemada U_2 ile gösterilen LNA kartının ana yükselteç kısmına iletilirler. Yükselteç bloğu, darbeleri yükseltmeye ek olarak, türev alma ve entegrasyon fonksiyonlarını da gerçekleştirir ve çıkış sinyalinin dalga biçimini değiştirir. Bu işlemler ile sensör sinyalleri filtrelenerek

gürültüden arındırılırlar. Bu blok sayesinde çıkış sinyalinin alçalma süresinde de azalma sağlanır. Devrede C_9 geri besleme kondansatörü ve R_7 geri besleme direncidirler. R_8 ve C_{10} komponentleri ise filtreleme işlemini gerçekleştirirler.

3.2.1.3 LNA kartı BLR bloğu

CA3130 işlemsel yükselteci kullanılarak oluşturulan ve devre şemasında U_3 ile gösterilen bloğun amacı, yükselteç bloğunun çıkışı olan TP_3 noktasında gözlemlenen sinyalin DC bileşenini, toprak seviyesine indirilmesi işlemini BLR gerçekleştirmektir. Devrede C_{11} geri besleme kondansatörü ve R_{12} geri besleme direnci olarak kullanılmaktadır. C_{12} ve R_{13} yine filtreleme işlemi gerçekleştirmektedir. Bu blok içinde kullanılan P_2 ayarlı potansiyometresi sayesinde, bloğun çıkışı olan TP_4 noktasındaki gözlenen sinyallerden referans voltajının üzerindeki değere sahip olanları biraz daha yükseltmektedir.

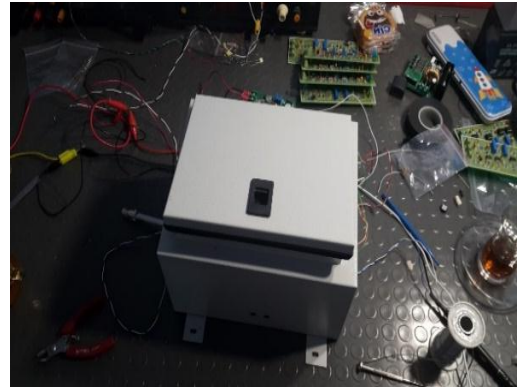
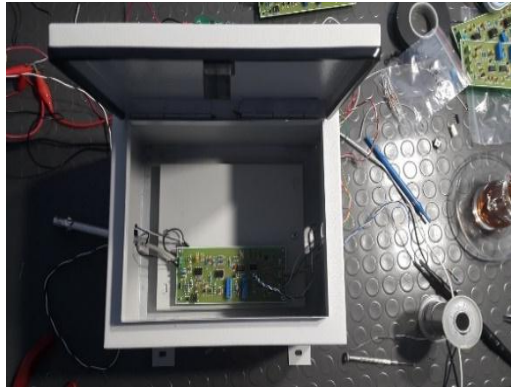
3.2.1.4 LNA kartı diskriminatör bloğu

Dördüncü sinyal işleme bloğu olan ve devre şemasında U_4 ile gösterilen diskriminatör bloğu yine CA3130 işlemsel yükselteci komponentini içermektedir. Karşılaştırma devresi olarak çalışan bu blokta kullanılan P_2 ayarlı potansiyometresi ile ayarlanan voltaj ayırım seviyesinin üstündeki sinyaller çıkışa aktarılmakta, bu seviyenin altında sinyaller gürültü olarak kabul edilerek reddedilmektedir. Bu sayede blok, sinyal ayırıcı bölüm olarak işlev görmektedir.

3.2.1.5 LNA analog ölçümleri

LNA kartının çalışma performansı ve karakteristiklerinin belirlenebilmesi amacı ile kurulan bir deney düzeneği ile LNA kartı üzerinde analog ölçümler gerçekleştirilmiştir. LNA kartlarının kazanç oranları yüksek olduğu için ana sinyal ile birlikte ışık ve elektromanyetik sinyaller başta olmak üzere diğer tüm kaynaklardan gelen gürültüleri de beraberinde yükseltmektedir. Bunun sonucu olarak da hedeflenen dedektör sinyalleri gürültü sinyalleri içerisinde kaybolmaktadır. Gürültüyü minimum seviyelere indirmek için birçok çalışma ve denemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda bu kartların topraklamalarının iyi yapılması ve mümkün olduğunca ışıktan ve elektromanyetik

sinyallerden izole edilmeleri gerektiği görülmüştür. Bu sebeple LNA test kartlarının test düzeneği için Faraday kafesi görevini görecek, **Şekil 3.24**'de görüldüğü gibi sac malzemeden yapılmış olan kapaklı bir pano kutusu kullanılmıştır. LNA kartı bu kutu içerisine vidalanarak sabitlenmiştir. Ölçümler esnasında BPW34 PIN diyot kullanılmıştır. PIN diyotların uçlarına sinyal kabloları lehimlenmiştir. Gürültü seviyesinin azaltılması için sinyal kabloları alüminyum bir borunun içerisinden geçirilmiş ve ardından da alüminyum boru ilave bir kablo ile şaseye bağlanarak sinyal kablolarının ekranlanması sağlanmıştır. PIN diyotların ışığa hassasiyetlerinden dolayı opak bir malzeme ile optik izolasyonlarının sağlanması gerekmektedir. Bu işlem için esnek ve opak bir malzeme olan eriyen bant malzemesi kullanılmıştır. Bu sayede gürültü sinyallerinde önemli bir azalma gözlenmiştir. Dedektör kartının beslemesinde 12 V DC gerilim kullanılmaktadır. Besleme gerilimi ilk başta ayarlanabilir DC güç kaynağı ile verilmiştir. Her ne kadar güç kaynağının çıkışı DC olsa da hala şebeke gürültüsünü barındığı ve çıkışta gürültüye sebep olduğu fark edilmiştir. Bu sebeple çalışma esnasında 12V, 7Ah kapasitesinde bir akü kullanılarak bu gürültü kaynağı da elimine edilmiştir. Dedektör kartının bir diğer besleme voltajı da PIN diyotların ters beslemesinde kullanılan DC yüksek voltaj kaynağıdır. Yüksek voltajın elde edilmesi için 12V'u 120 V'a kadar yükseltebilen ayarlanabilir DC-DC yükseltici yüksek voltaj kartı kullanılmıştır. Yapılan denemelerde LNA ile bu kartın yan yana pozisyonda bulunduklarında LNA kartının bu karttan etkilendiği ve gürültüye sebep olduğu gözlemlenmiştir. Deney esnasında bu kart da metal kutu dışına çıkartılarak bağlantıların kutu dışındaki deliklerden geçirilen kablolar ile yapılması sağlanmıştır.



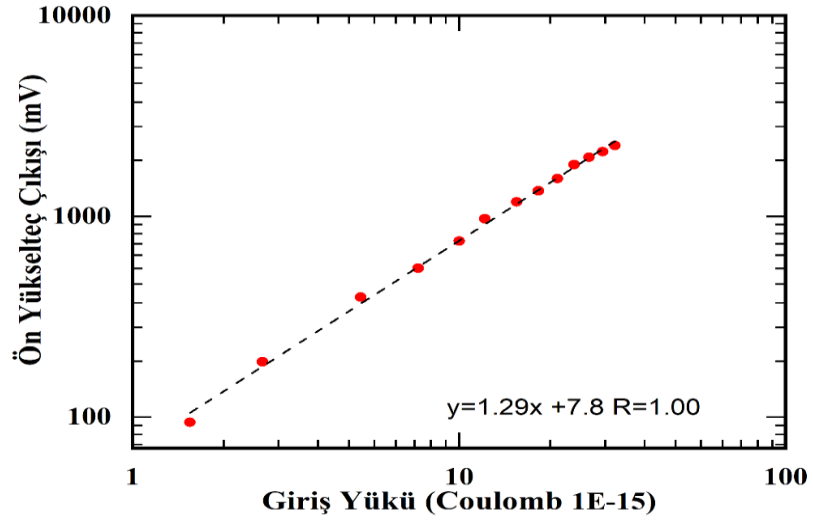
Şekil 3.24 LNA test kartlarının test düzeneği için Faraday kafesi görevini görecek, sac malzemeden yapılmış olan kapaklı pano kutusu

Deney düzeneğinin gürültüden arındırılması işleminden sonra LNA kartı üzerinde bazı analog sinyal ölçümleri alınmıştır. Sinyaller, HAMEG marka 2524 model dört kanallı 250 MHz dijital osiloskop ile ölçülmüştür. Sinyal jeneratörü olarak GW INSTEK marka SFG-2004 model cihaz kullanılmıştır.

3.2.1.6 Ön yükselteç bloğunun basamak cevabının gözlemlenmesi

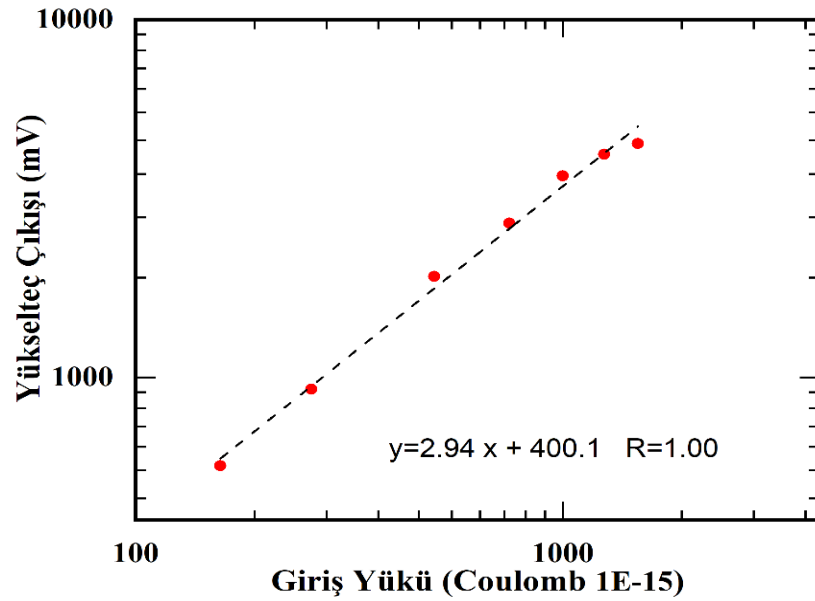
Dedektörden gelen darbeler hızlı şekilde yükselmekte ve yavaş bir biçimde üstel olarak azalarak sönümlenmektedir. Yükselme hızı 50 ns'den daha az bir süredir. Ön yükselteç basamak cevabının incelenmesi için test noktası olan TP₁ noktasına kare dalga uygulanarak test noktası TP₂ noktasından çıkış sinyali gözlemlenmiştir. Burada sinyal jeneratörünün ürettiği kare dalgalar osiloskopta incelenmiş ve dijital osiloskop ile kayıt edilmiştir. Yapılan ölçümlerde yükselme zamanının $t_r < 10$ ns'den daha az olduğu görülmüştür ve çıkış darbesine ait yükselme zamanı da 216 ns olarak ölçülmüştür.

1pF'lık kondansatöre 1 Ω ' luk direnç bağlanmıştır ve farklı gerilimler altında kondansatör üzerinde depolanan yüklerin, TP₁ noktasına uygulanarak U₁ işlemsel yükselteci ile oluşturulan ön yükselteç girişine karşı TP₂ test noktasından ölçülen çıkışın voltaj grafiği elde edilmiştir. Ön yükseltecin yüke karşı çıkış genliklerinin ölçülmesi için test sinyali girişine 1 pF değerindeki kondansatör üzerinden farklı genliklerde kare dalgalar uygulanmıştır. 1 pF'lık kondansatör, 1V, 2V, 3V, 4V ve 5 V değerindeki DC gerilimler ile doldurulmuş ve üzerinde biriken yük miktarları hesaplanmıştır. 1 pF kondansatör ve yükselteç girişi üzerinden test noktasına uygulanan artan voltajlı farklı darbelerle karşı çıkışı ölçülmüş ve giriş yük miktarına karşı çıkış genliğinin logaritmik değerlerine ait grafiği **Şekil 3.25**'te verilmiştir. Kırmızı noktalar ilgili giriş yükünün ön yükselteç çıkış voltajının logaritmik değerlerini ve kesikli çizgi ise en az kare yasasına göre çizilmiş doğruyu göstermektedir.



Şekil 3.25 Ön yükseltecin giriş yüküne karşı çıkış darbe genliği grafiği.

1pF'lık kondansatöre 1Ω' luk direnç bağlanmıştır ve kondansatöre yine sırası ile 1V, 2V, 3V, 4V ve 5 V seviyesinde kare dalga uygulanarak DC gerilimler ile kondansatör şarj edilmiştir. Bu defa TP1 test noktasına uygulanan giriş sinyalinin çıkışı U₂ işlemsel yükselteci ile oluşturulan ana yükseltecin çıkış noktası olan TP₃ test noktasından ölçülmüş ve çıkışın voltaj değerleri elde edilmiştir. Ana yükselteç çıkış voltajının girişe uygulanan yüke karşı logaritmik grafiği Şekil 3.26'da verilmiştir.

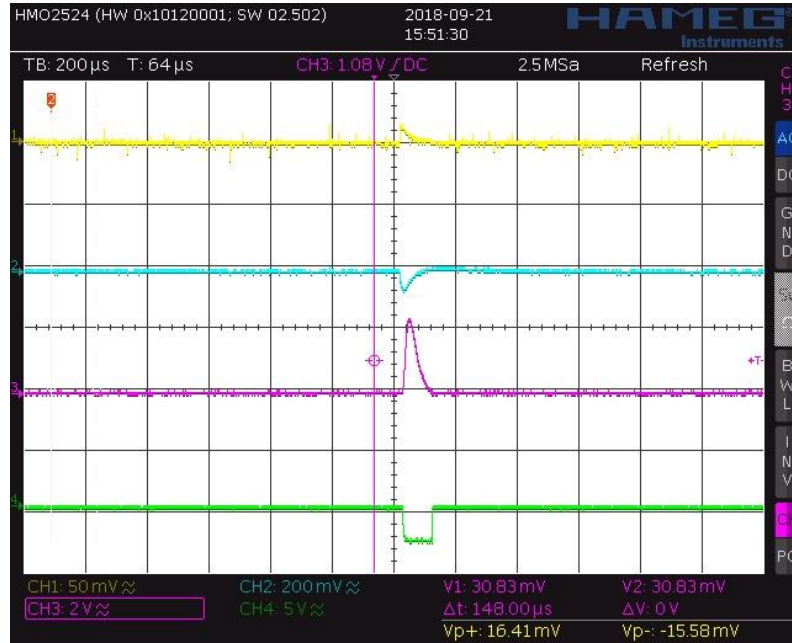


Şekil 3.26 Yükselteç kademe şarjından voltaja dönüştürme grafiği

Ana yükselteç bloğunun çıkışı TP₃ noktasından U₃ ile gösterilen BLR bloğuna ulaşırlar. Bu blokta sinyallerdeki DC voltaj bileşeni toprak seviyesine indirilir ve P₁ potansiyometresi kullanılarak ayarlanan karşılaştırma voltajının üzerindeki sinyaller filtrelenerek bu basamakta da yükseltilirler. Ayrıca bu bloğa ulaştığında negatif yönlü olan ön yükselteç sinyalleri ters çevrilerek pozitif tarafa taşınırlar ve zaman ekseninde daha dar bir forma ulaşırlar.

TP₄ test noktasındaki darbeler U₄ işlemsel yükselteci ile oluşturulmuş diskriminatör bloğuna giriş olarak aktarılırlar. P₂ ayarlı potansiyometresi ile diskriminatör voltaj seviyesi ayarlanır ve bu seviyenin altındaki sinyaller bloklanarak filtrelenirken bu seviyenin üzerindeki darbeler yükseltilerek TP₅ test noktasından yine genlik ekseninde negatif yöne dönmüş şekilde, lojik seviyede sinyaller olarak çıkarlar.

LNA'nın ön yükselticisi, ana yükselticisi, BLR ve diskriminatör bloklarına ait çıkışlarının TP₂, TP₃, TP₄ ve TP₅ noktalarından ölçülen dalga biçimlerinin kaydedilen osiloskop ekran görüntüsü sırasıyla **Şekil 3.27**'de verilmiştir



Şekil 3.27 Yükselteç kademe şarjından voltaja dönüştürme. Bir γ etkileşimi için LNA'nın ön yükselteç, ana yükselteç, taban çizgisi düzeltici, diskriminatör bloklarının çıkış dalga formları

LNA kartının birim zamanda maksimum sayabileceği giriş sinyalinin frekansını ölçmek için girişe sinyal jeneratörü ile kare dalga uygulanmış, çıkıştaki dalga formu bozulana kadar frekans arttırılmıştır. Yapılan ölçümde çıkış formunu bozmadan maksimum işleyebileceği maksimum giriş sinyali frekansının 78 kHz olduğu tespit edilmiştir.

3.2.1.7 LNA gama kaynak testi

Dedektör verimi, uygulanan dedektör voltajının artışıyla orantılı olarak artmaktadır. Bu avantajı ile birlikte dedektördeki gürültüyü de arttırmakta ve hatalı algılamalara neden olmaktadır. Dedektöre için farklı seviyelerde dedektör besleme voltajı uygulanmış, gürültü ve verimlilik açısından optimum 80 V DC değerinin uygun olduğu ölçülmüştür. LNA kartına 12 V DC kart besleme voltajı 80 V DC dedektör besleme voltajı uygulandıktan sonra PIN diyotu ¹³⁷Cs γ kaynağına maruz bırakılmıştır. Gama ışınlarının LNA sinyal işleme bloklarının çıkışlarında oluşturduğu sinyaller dijital osiloskop ile gözlemlenmişlerdir. TP4 noktasına ulaşan sinyallerin darbe genişlikleri yaklaşık 40µs olarak ölçülmüştür. Dedektörün bu süre içerisinde başka bir sinyale tepki vermeyeceği, yani dedektör ölü zamanı olduğu kabul edilirse, dedektörün birim zamanda 25.000 darbeyi sayabileceği varsayılabilir.

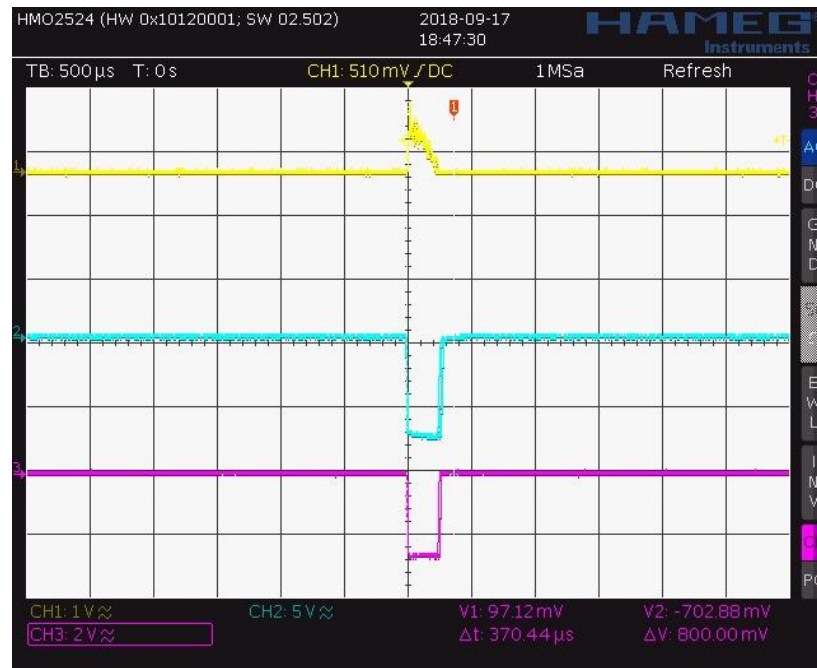
Radyasyonsuz bir ortamda, BLRbloğundaki ayarlı potansiyometre P₁'in bir ayar tornavidasıyla ayarlanması ve ölçümün en net olduğu seviyenin osiloskop ekranından eş zamanlı olarak gözlenmesi işlemi ile BLR kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. BLR çıkışındaki gürültü seviyesi yaklaşık olarak ±46 mV olarak ölçülmüştür. BLR çıkış sinyali ise yaklaşık TTL (5 V) seviyesinde olduğu için **Eşitlik** 3.6 ile erilen sinyalin gürültüye oranı (SNR) formülü uygulandığında, SNR değeri yaklaşık 20.36dB olarak bulunmuştur.

$$SNR = 10\log(S/N) \quad 3.6$$

Bir sonraki basamak olan diskriminatör bloğunun karşılaştırma eşik seviyesi ise buna bağlı olarak P₂ potansiyometresi kullanılarak yaklaşık ±48 mV değerine ayarlanmıştır. Diskriminatör bloğunun SNR değeri bu gürültü seviyesi ve 5 V sinyal seviyesi için hesaplandığında 20.177 dB olarak bulunmuştur. Kalibrasyonlar, ölçümlerin maksimum olduğu ve γ kaynağı kaldırıldığında darbe sinyali çıkışının olmadığı optimum çalışma

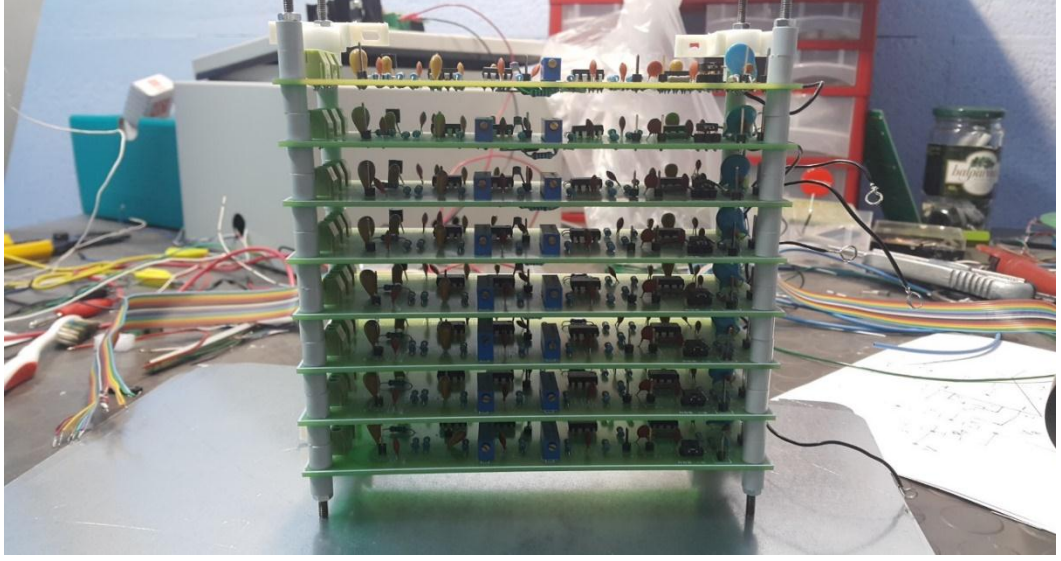
noktaları ayarlanarak yapılmıştır. Aynı seride üretilmiş olmalarına rağmen işlemsel yükselteçlerdeki küçük kazanç farklılıkları ve diğer komponentlerdeki toleranslar sebebi ile ölçülen değerlerde küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu işlem her LNA kartı için ^{137}Cs γ kaynağı ile ayrı ayrı tekrar edilmiş, tüm LNA kartları P_1 ve P_2 potansiyometreleri kullanılarak analog olarak kalibre edilmişlerdir.

^{137}Cs test kaynağına maruz bırakılan BPW34 dedektör bağlı bir LNA kartının ana yükselteç (sarı çizgi), BLR (yeşil çizgi), diskriminatör bloklarının çıkış sinyalleri (mor çizgi) Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.28 ^{137}Cs test kaynağı için LNA ana yükselteç, taban çizgisi düzeltici, diskriminatör bloklarının çıkış sinyalleri

Kalibre edilen kartlar dört adet uzun vidalı mil ve spacer parçalar ile kaskat şekilde üst üste dizilerek 8 kanallı LNA bloğu elde edilmiştir (Şekil 3.29).

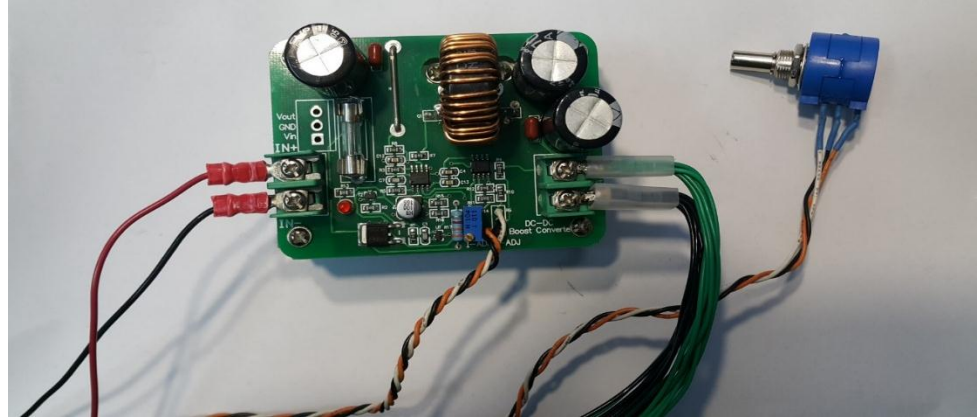


Şekil 3.29 Üst üste dizilerek monte edilmiş 8 kanallı LNA bloğu

3.2.2 Dedektör güç sistemi kartları

Yapılan çalışmalarda dedektör sisteminin yükseltme oranının yüksek olması sebebi ile besleme esnasında oluşan çok küçük gürültülerin bile çok yüksek oranda çıkışta gürültü olarak görüldüğü tecrübe edilmiştir. Bu sebeple sistemde doğrultulmuş gerilim yerine doğrudan DC kaynak kullanmak daha uygun bulunmuştur. Ayrıca sistemin taşınabilir olması için de güç kaynağının kablosuz olması gerekmektedir. Bu sebeple taşınabilirlik ve gürültüsüz çalışma imkanı veren 12 V DC akü kullanılmıştır. Akülerin kapasitesi arttıkça ebatları ve ağırlıkları da artmaktadır. Bu sebeple denemeler esnasında 12 V 7 Ah bir akü kullanılmış, sistemin içine de saha kullanımı için nispeten hafif ve küçük ebatlara sahip olan bir 12V 1.3 Ah kapasitesine sahip bir akü entegre edilmiştir. Sistem için maksimum akım değeri 12 V akü kullanılırken 247 mA olarak ölçülmüştür. Ayrıca yapılan ölçümlerde her bir LNA kartının çektiği akımın yaklaşık 12.8 mA olduğu ölçülmüştür. Batarya ayrıca, LNA kartının dedektör besleme terminallerine uygulanmak üzere 12V'u 80 V'a çevirmek için kullanılan DC-DC yükseltici yüksek voltaj kartını da beslemektedir. Farklı voltaj seviyelerinde besleme voltajları uygulanmış ve kazanç-gürültü açısından optimum seviye 80 Volt olarak seçilmiştir. Yapılan ölçümlerde besleme voltajının 60V'luk kısmının direnç üzerinde harcandığı, kalan 20 V'luk kısmının ise PIN diyotun beslemesi için harcandığı görülmüştür. Dedektör besleme voltajı, Şekil 3.30'da görüleceği gibi cihazın ön panelinde bulunan

bir voltaj kontrol potansiyometresi ile ayarlanmaktadır ve uygulanan voltaj seviyesi ölçülerek yine dedektörün ön tarafında bulunan yedi segmentli gösterge ile 0.1 V hassasiyetle görüntülenmektedir. Bu opsiyon, farklı ön gerilim voltaj seviyelerine sahip çeşitli PIN diyot dedektörlerini kullanma ve dedektör besleme voltajının verimlilik-ölçüm gürültüsü ilişkisi üzerindeki etkisini gözlemlene imkanı sunmaktadır.

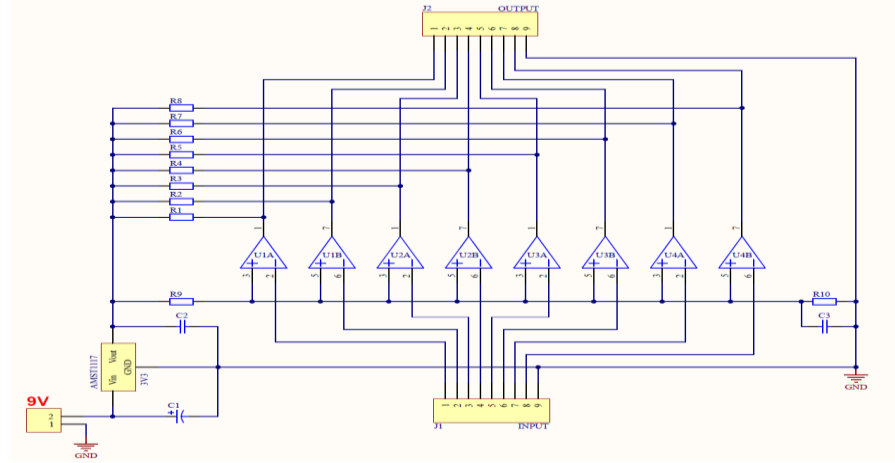


Şekil 3.30 Ayarlanabilir yüksek voltaj güç kartı

3.2.3 Sinyal inverter kartı

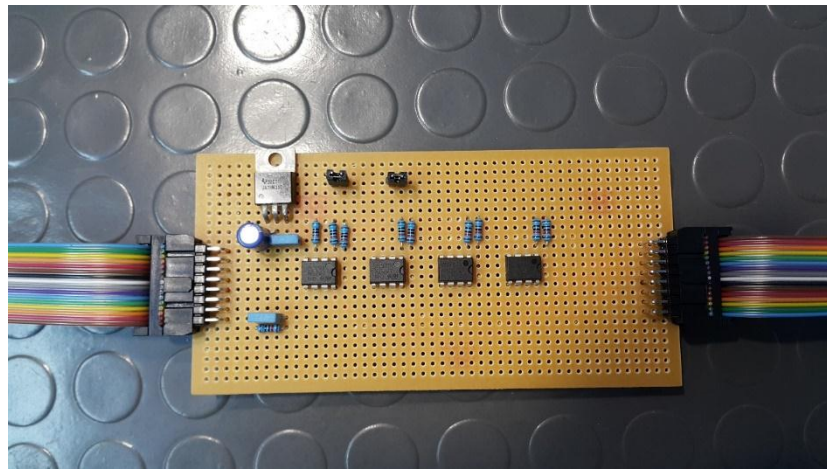
Bu dedektör tasarımı için seçilen FPGA sistemi sadece pozitif bölgede, 0V-3.3 V voltaj aralığında çalışmaktadır ve giriş çıkış pinleri de bu aralıkta sinyalleri kabul etmektedir. Gelen γ ışınının PIN diyot ile etkileşmesi sonucunda yapılan ölçümlerde LNA'ın çıkışında negatif bölgede darbeler olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlerde bu darbelerin genliklerinin de -5V DC seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bu darbelerin sayımında kullanılacak olan darbe sayıcı devreleri eş zamanlı çalışacak şekilde SPARTAN 3E FPGA işlemcisinin içerisine gömülü yazılım ile yerleştirilmiştir. LNA'ın çıkış seviyesi ile SPARTAN 3E FPGA işlemcinin giriş voltaj seviyeleri arasındaki uyumsuzluğun giderilmesi için ilave bir elektronik kart tasarımı yapılması gerekmiştir. Kullanılan kart ile negatif olan darbeler, dalga formu değişmeden pozitif kısma taşınmaktadır. Ayrıca kullanılan 3.3V regülatör ile 5 V seviyesindeki çıkışlar, FPGA'nın giriş aralığı olan 3.3 V seviyesine ölçeklendirilmiştir. Kart üzerinde ayrıca 12V 'u 5 V a çeviren harici bir regülatör kullanılarak yapılmış bir voltaj regülatör bloğu da eklenmiş, bu bloğun çıkışı da entegreler ve 3.3V regülatörün beslemesinde

kullanılmıştır. 3.3V regülatöre 10 μ F ve 100nF kondansatörler bağlanarak besleme voltajı üzerinde filtreleme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 İnvörtör kartı devre şeması

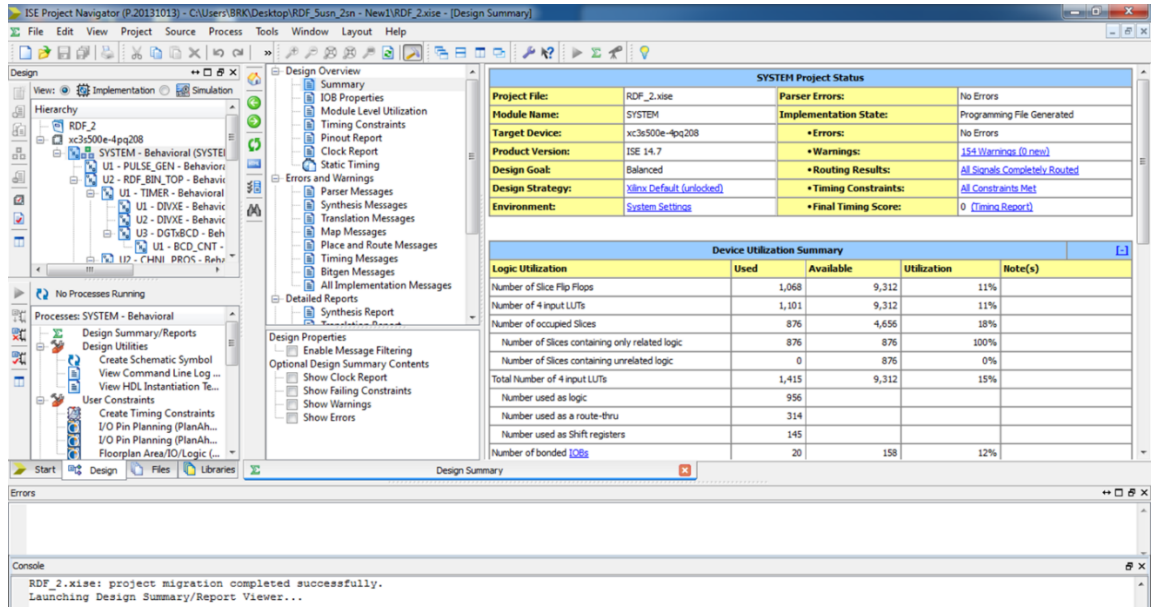
8 adet LNA kartından gelen çıkış sinyal kabloları, kanal sayılarının kolay bulunabilmesi için Şekil 3.32'deki gibi renk kodlarına göre adreslenmiş ve invertör kartın giriş kısmındaki sokete bağlanmıştır. Çıkışlar ise aynı renk kodları kullanılarak adreslenmiş ve çıkış portuna bağlanmıştır. İnvörtör işlemi için içerisinde 2 adet invertör bloğu bulunan 74LS240 invertör/tampon entegresinden toplam 4 adet kullanılmıştır. Ayrıca çıkış voltajını ölçmek için devrede 3.3V'luk zener diyotlar ve dirençler kullanılmıştır. Kartın çıkışındaki sinyaller ribbon kablo ile FPGA'in seçilen giriş portlarına taşınmıştır. FPGA portlarına gelen bu sinyallerden sonra dijital elektronik kısmı başlamaktadır



Şekil 3.32 İnvörtör kartı ön yüzü

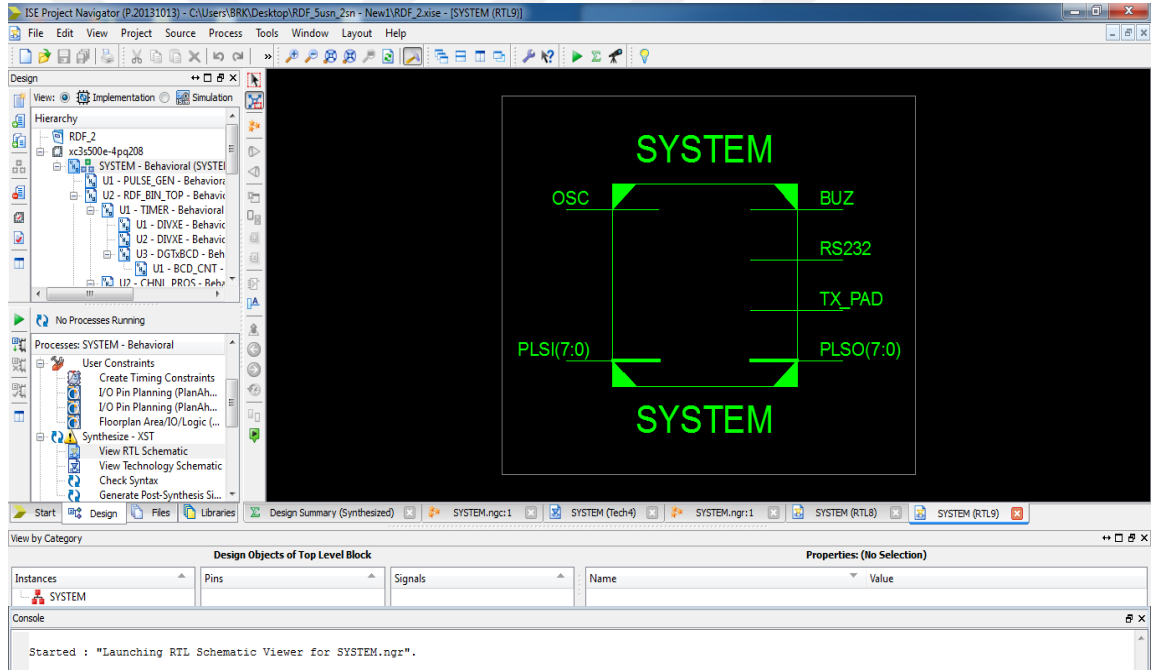
3.3 FPGA birimi

Sistemin çalışma prensibi, γ sayıcı temelli 8 adet radyasyon dedektörünün eşzamanlı olarak ölçüm almalarına dayanmaktadır. Yüksek aktivite ortamında, dedektör çıkış darbelerinde artış gözlenir. Ayrıca darbe genişliğinin dar olması nedeniyle dedektörlerin sayıcı kısımlarının yüksek frekansta ve yüksek hassasiyetle çalışabilmeleri gerekmektedir. Böyle bir dedektör yapısı, 8 kanalın eş zamanlı olarak sayımı için 8 adet işlemciye ve alınan ölçümleri değerlendirerek açığı hesaplamak için bir ana işlemciye ihtiyaç duyar. Sistemin bu gereksinimlerini karşılamak için paralel işlem yapabilme kapasitesine sahip XILINX Spartan 3E FPGA yongası kullanılmıştır. Kullanılan yonga 500K kapıya sahiptir. FPGA içerisinde her sayma kanalı, işlem ve fonksiyon için kapılardan oluşan modüller ayrı ayrı şekilde fiziki olarak oluşturulurlar. Böylece her bir blok birbirinden bağımsız ve eşzamanlı olarak tek bir FPGA çipi içerisinde çalışırlar. Sistem kodu bir FPGA ve PLD programlamada kullanılan VHDL dilinde yazılmıştır. Yazılım platformu olarak XILINX firmasına ait ISE programı kullanılmıştır. **Şekil 3.33**'te cihazda çalışan programa ait ISE programı ekran görüntüsü bulunmaktadır. Aygıt kullanım özetinden de görüldüğü üzere tüm program yaklaşık olarak yonganın %11'lik kısmını kullanmaktadır.



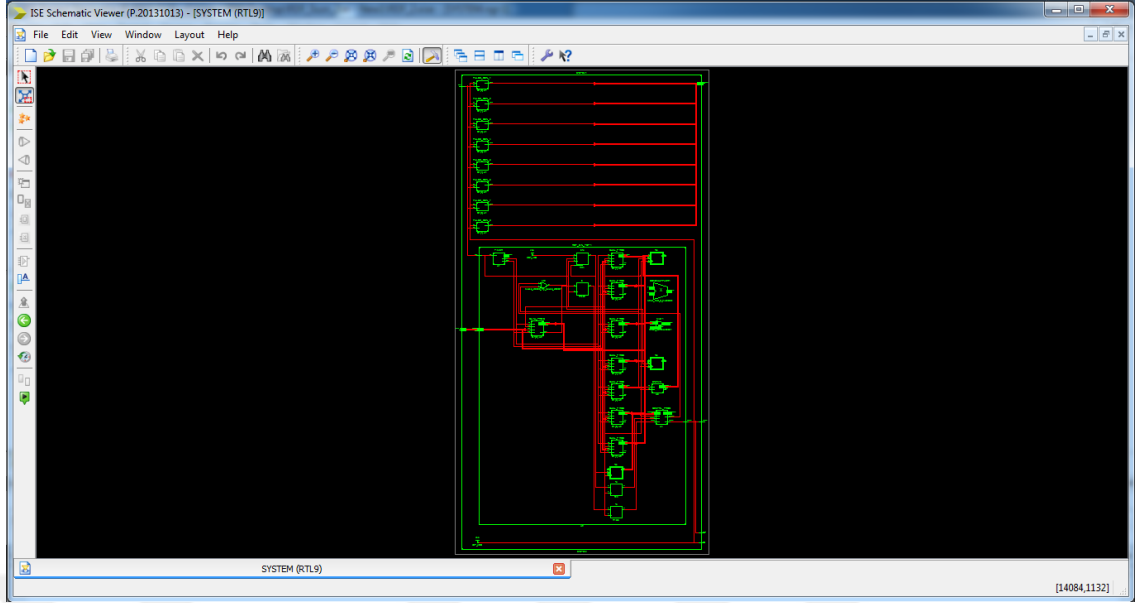
Şekil 3.33 Yazılım platformu olarak kullanılan XILINX/ISE programının ara yüzü.

Sistem, FPGA içerisinde gömülü olan 8 adet bağımsız yapıda, paralel ve eşzamanlı olarak çalışan sayaç bloğuna sahiptir ve sayım sonuçları her dakika hesaplanarak güncellenirler. FPGA 50 MHz saat frekansına sahiptir. Tasarımda örnekleme periyodu 2us olarak ayarlanmıştır. Ölçümler esnasında FPGA’ın giriş portuna içlerinde büyük kısmı gürültü olmak üzere birçok sinyal ulaşır ve bunların arasında γ darbesi olanların ayırt edebilmek ve seçmek için VHDL dilinde filtreleme, metastabilite (ara kararlılık), sıçrama önleme (debouncing), aşırı örneklemenin önlenmesi ve yükselen kenar algılama blokları dahil olmak üzere birçok fonksiyonu içeren bir sinyal koşullayıcı bloğu yazılmıştır. SYSTEM ana bloğu altında sistemin blok gösterimi olan RTL şemasının ISE Schematic Viewer programı ekran görüntüsü aşağıda Şekil 3.34’te verilmiştir.



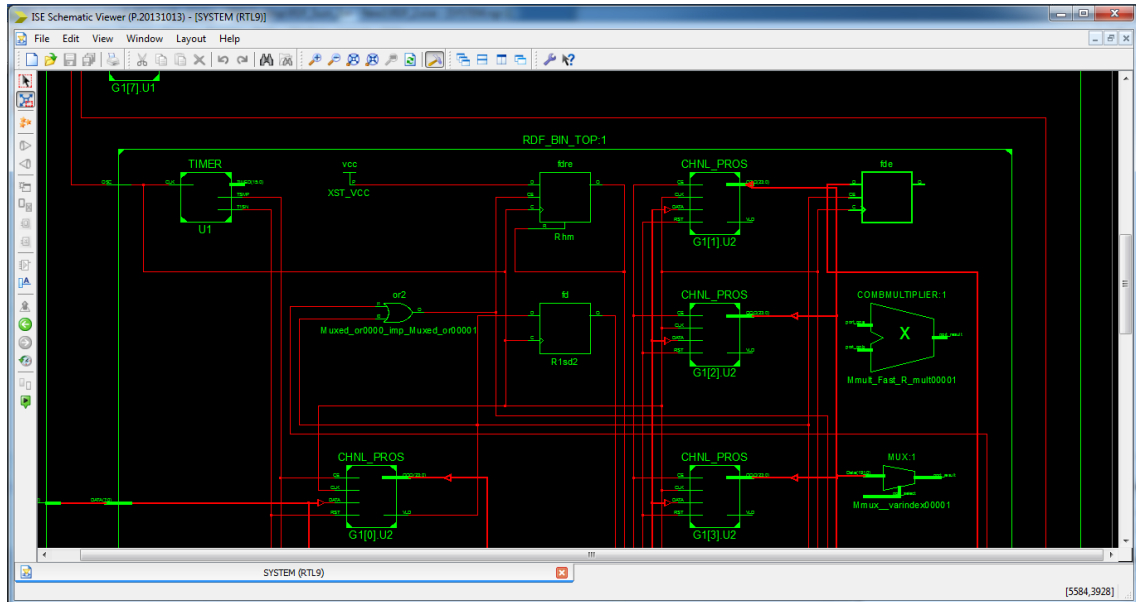
Şekil 3.34 SYSTEM ana program bloğu ISE Schematic Viewer programı ekran görüntüsü

RTL gösteriminde her bloğun içerisinde kendi alt blokları bulunmaktadır ve her blok elemanın giriş ve çıkış sinyalleri gösterilmektedir. SYSTEM ana bloğunun alt blokları Şekil 3.35’te verilmiştir.



Şekil 3.35 SYSTEM ana bloğunun alt bloklarının RTL şematik gösterimi ekran görüntüsü

Şekil 3.36'de ise RDF_BIN_TOP1 isimli bloğun RTL şematiğine ait ekran görüntüsü verilmiştir. Şemadan görüldüğü üzere tüm sistem ana bir zamanlama bloğu ile kontrol edilmektedir ve yonga içerisinde her kanal için ayrı bir fiziki blok oluşturulmuştur.



Şekil 3.36 RDF_BIN_TOP1 isimli bloğun RTL şematiği ekran görüntüsü

Dijital lojik devreleri meta-kararlılık TDC (Zamanı Dijitale Çevirme-Time to digital converter) devre blokları, D-flip-flop'ları (DFF: D-type Flip Flop Counter), invertör, NAND ve XOR gibi temel mantık kapılarını içermektedir. Asenkron saat ve veri sinyalleri ile çalışan DFF'ları içeren dijital sıralı devrelerde, metastabilite koşulları karşılandığında yarı kararlı davranışlar görünmeye başlayabilir. DFF'larda kurulma ve tutma süreleri için gerekli isterler sağlanmadığı takdirde, elektronik gürültü DFF'nin çıkış durumlarını değiştirir ve bu değişim de γ sayıcının hatalı okuma yapmasına neden olur. Bununla birlikte metastabilite, karşılaştırıcıların, analog giriş sinyallerini bir çıkışa dönüştürdükleri analog ve dijital devreler arasındaki geçiş bölgesinde de görülebilmektedir. Bir karşılaştırıcıyı izleyen dijital devreler için çıkışı 1 veya 0 olarak yorumlayabileceği bir minimum VL sinyal seviyesi mevcuttur. Karşılaştırıcı kazancı A0 ise, eşik seviyesinin VL/A0 aralığı içinde bulunan giriş sinyalleri kararsız çıkışlar üretilmesine sebep olurlar (Iniewski 2011).

3.3.1 Signal conditioning bloğu

Örnekleme hızı, analog sinyallerin ADC çevrimi esnasında kullanılan örnekleme frekansı ya da sıklığıdır. Nyquist teoremine göre analog sinyalin en yüksek frekans değeri f , örnekleme frekansı da f_s olarak adlandırıldığında $f_s > 2f$ eşitsizliğinin sağlanması gerekmektedir. Genel olarak f_s değeri $2f$ olarak seçilse de %5 oranında emniyet payı bırakılması önerilmektedir. Buna göre örnekleme hızının yarı değeri Nyquist frekansı ismini alır. Burada örnekleme süresi 400 ns alınmıştır.

Ölçüm esnasında ilk adımda, giriş sinyalinin durumu gözlemlenir ve sinyal örnekleme işlemi yapılır. Gelen darbe, filtreleme basamakları ile içerisinde bulunan gürültülerden arındırılır.

Saatin yükselen kenarındaki sinyalin mantık seviyesi kurulum zamanına (T_{setup}) çok yakın bir zamanda değişirse, flip flopun Q çıkışı, metastabilite tutma süresi (T_{mh}) için yarı kararlı duruma gider ve bu esnada kurulum süresi ihlali olayı meydana gelir. Çıkış değeri mantık 0 ile mantık 1 seviyeleri arasındadır. Metastabiliteyi çözmek için örnekleme işlemi esnasında arka arkaya iki adet flip flop kullanılmıştır. Sinyal bir periyot süresince geciktirilir ve böylece gerekli T_{hm} süresi aşılar. İki flip flop artarda kullanıldığı bu yöntem, dual ranking yöntemi olarak isimlendirilmektedir.

Sinyal örneklemedeki bir diğer sorun ise çınlamadır (bouncing). Çınlama gürültüden veya sinyalin yükselip alçalmasından kaynaklı olabilmektedir. Genelde butonlardaki durum değişikliklerinde gözlenen bu olayda kontak esnasında birçok yükselip alçalan sinyal gözlemlenebilir ve bu darbeler sinyalin ölçümünde aksaklıklara sebep olabilirler. Şekilde verilen sıçramalar genellikle 20 ms içinde yerleşmektedirler. Debouncing devresinin amacı, anahtar ve sinyal seviye geçişleriyle ilgili aksaklıkları filtrelemektir. FPGA sistemlerinde genellikle gecikmeli ve erken algılama şeklinde iki farklı devre yapısı kullanılmaktadır. Gecikmeli algılama şemasında, devre, giriş dalga biçimi 20 ms için kararlı olana kadar bir çıkış üretir. Erken algılama şemasında, devre bir geçişten hemen sonra yanıt verir ancak sonraki 20 ms için sonraki değişiklikleri yok sayar (Chu 2017)

Sinyal üzerinde oluşan bu spikelerin giderilmesi için gelen sinyalin zamanda sürekliliği kontrol edilir. Cihazda γ darbesi için ölçülen darbe genişliği yaklaşık $40\mu s$ seviyesindedir. Gelen sinyaller arasında bu değerden daha kısa süreli sinyaller var ise bunlar girişte reddedilmelidir. Bu değere eşit veya daha büyük süreli sinyaller γ sinyalleri olarak değerlendirilir. Çınlamanın önlenmesi işlemi için hazırlanan debouncing bloğunda gelen ardışık 3 örnekleme sinyali, 3 adet ardışık flip flop a kayıt edilir ve karşılaştırma işlemi yapılır. Yapılan karşılaştırmada arka arkaya 3 tane 0 gelirse çıkış 0, arka arkaya 3 tane 1 gelirse çıkış 1 yapılır. Böylece giriş sinyali kısa sürede değişim gösteren spike'lerden arındırılmış (debouncing) olur.

Örnekleme işleminde karşılaşılan bir diğer sorun ise aşırı örnekleme (over sampling) problemidir. Bunun çözülmesi için ilk etapta örnekleme zamanı $2T$ olarak seçilir. Ardından ölçülen γ darbesi süresi olan $40\mu s$ değerine göre örnekleme frekansı azaltılır ya da örnekleme süresi artırılır. Bu işlem esnasında minimum darbe süresinin en az $2T$ örnekleme süresi kadar olması gerektiği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılması gereken bir diğer işlem ise yükselen kenarı tespit etmektir. Debouncing bloğunun son çıkışı, kademeli bir flip flop tarafından geciktirilir ve sinyalin kendisi ile geciktirilmiş sinyalin çıkışı, 1 ters ve 1 ters olmayan girişli 2 girişli AND Kapısından oluşan bir AND2B1 kapısı sisteminden geçirilir. Çıkış, bir sonraki flip flop a bağlanır. Yani yükselen kenar tespiti için gelen işaret 1 saat periyodu boyunca geciktirilir ve

kendisi ile gecikmişi karşılaştırılır. Gelen sinyalin kendisi 1, gecikmişi 0 ise işaret yukselmiş demektir. 40 μ s suresinden uzun sureli her sinyal için, 20 ns sureli mantıksal bir yuksek darbesi uretilir. Belirli bir sure içindeki çıkış darbeleri sayaç blokları ile sayılır sayımlar zaman etiketi ile kayıt edilirler.

Yazılımda tüm fonksiyon ve komponent kodları tekrar kullanılabilir olmaları ve yazılımın kolay değiştirilebilmesi için modüler bir yapıda hazırlanmıştır. Tüm sistem, parametreleri değişen şartlara göre modifiye edilebilir jenerik yapıda olan birçok alt modülün birleşiminden oluşmaktadır. Bu modüllerden ilki olan RDF_BIN_TOP modülü, sistemin top level olarak ifade edilen ve diğer modülleri kontrol eden en st seviyedeki programıdır. Tüm alt modül kodları bu bloğun altında çalışmaktadır. Sistem 8 tane kanaldan gelen darbelerin *cpm* değerlerini ve hesaplanan aı değerini ayrı ayrı hesap edip sonuçları veri paketi halinde seri olarak UART protokolü ile 9600 Baudrate'de HMI ekranına seri veri aktarımı sağlanmaktadır. *cpm* için ölçüm süresi 60 s olarak ayarlanmıştır. Sistemin ana saat darbe sinyali üreticisi olan FPGA'in osilatör frekansı 50 MHz'dir.

Bloğun iç yapısında Timer Bloğu, Channel Process bloğu Sn2Min Bloğu, Central process bloğu isimli alt bloklar yer almaktadır. Counter Bloğu, bir saniye boyunca gelen darbe sayısını saymaya yarayan bloktur. CPM bloğu ise 60 saniye boyunca alınan sayımları toplayan ve dakika başına sayım oranını hesaplayan bloktur. Timer bloğunda zamanlama için referans zaman sinyalleri üretilmektedir. Bu sinyaller örnekleme frekansı ve 1 s işaretidir. Örnekleme frekansı, sistemin çalışma frekansı olan 50MHz değerinin 100'e bölünmesi ile elde edilir. Böylece 500 KHz frekansında Tsmp rnekleme frekansı üretilmiş olur. 1 sn sinyali ise 500 KHz frekansının 500.000 'e bölünmesi ile elde edilmiştir.

Tasarımda lm kanallarına gelen sinyallerin sayılmasını ve işlemesini sağlayan Channell Process bloğu isimli yazılım bloğu bulunmaktadır. Channell Process bloğu, gelen işaretin yukselen kenarını yakalamaya yarayan sign-cond isimli bloğu içermektedir.

Binx_Cnt Bloğu 18 bit olarak yapılandırılmış bir ikili sayaç bloğudur. Sayıcı, her gelen darbenin yükselen kenarında 1 artar ve 1 saniye sinyali geldiğinde toplam sayım değerini çıktı olarak gönderir. Ardından sayım değerinin tutulduğu sayaç değişkeninin değerini sıfırlar. Saniyede bir oluşan bu sayım değerleri Mov_Bin bloğuna aktarılırlar.

Mov_Bin bloğu, kendisine gelen 18 bitlik bu sayılardan son gelen 60 tanesini depolamaya yarayan bir kayıt bloğudur. Sonrasında İlk Giren İlk Çıkar (FIFO: First-In First-Out) mantığı ile en eski sayımı listeden çıkartır ve kendisine gelen en yeni sayımı listeye ekler. Böylece *cpm* değeri, hareketli pencere tekniği ve *cps* değerlerinin FIFO veri tamponunun saklanmasıyla hesaplanır. Sayılan *cps* değerleri her saniye güncellenir. Bu işlemden sonra kayıtlı son 60 adet sayımı toplar ve bu sayım değerini güncel *cpm* değeri olarak dışarı aktarır. Bu *cpm* değeri hesaplama işlemi her saniye tekrarlanır ve yeni *cpm* değerleri ekrana gönderilir.

Sistem belleği, sistem ilk açıldığında boş olduğu için başlangıçta 60 s süre dolmadıkça *cpm* değerini verememektedir. İlk 60 s dolduktan sonra o ana kadarki değerlerin toplamını verir. Sistem açıldıktan sonra bir dakika sürenin dolmasını beklemeden hızlı bir ölçüm değeri verebilmesi için, kümülatif sayım değerleri, o saniyeye ait bir katsayı ile çarpılarak dakika değerine normalize edilirler. Hızlı ölçüm yapılması için kullanılan Sn2Min bloğu, sistemin ilk açıldığı başlangıç anından itibaren süreyi 59 s dolana kadar saymaktadır. Ardından zaman katsayılarının bulunduğu coefficient table bloğuna adres bilgisi göndermektedir. Buradaki çizelgeden saniye değeri ile adreslenen hex formatındaki normalizasyon katsayı ile o zamana kadar ölçülen kümülatif sayım değeri çarpılarak anlık *cpm* değeri elde edilir. Bu işlem 59. saniyenin sonuna kadar sürmektedir. Katsayı ile çarpma işlemi ilk bir dakika dolana kadar devam etmekte, ardından bu sonra katsayıyı sürekli 1 olarak işleme alınmaktadır.

FPGA’de bölme işlemi yapmak nispeten zor olduğu için bölme işlemi yerine bir katsayı ile çarpma işlemi kullanılmıştır. Örneğin 13. saniye için çarpılacak katsayı $60/13=4.61538$ ‘dir. Ondalık sayı ile işlem ikilik sistemde nispeten zor olduğu için onun yerine için bu sayı 10 bitlik sayı için $2^{10}=1024$ ile çarpılır. İşlemin sonucu yaklaşık olarak $4.61538 \times 1024 \approx 4726$ ‘dır. Bu işlemde 1024’e bölünebilen sayılar seçilmektedir. 4726’nın ikili sayı sisteminde karşılığı 1001001110110, hex karşılığı ise x’12762’dir. *cpm* değeri ikilik sistemde bu sayı ile çarpılır. Ardından tekrar daha önce çarpılmış olan

1024 'e bölünerek, yani son 10 biti atılarak o saniyeye ait katsayı ile çarpılmış değer elde edilir. Böylece de 13 saniyelik toplam sayım, dakika değeri olan *cpm* değerine normalize edilmiş olmaktadır. Bu sayede sistem açılıştan itibaren *cpm* değerlerini dakika süresi dolmadan ölçebilmektedir.

Kalibrasyon esnasında her bir dedektör kanalına 15 mm mesafeden ^{137}Cs kaynağı ile radyasyon uygulanmıştır. Her kanalın sayımları ölçülerek kayıt edilmiş, elde edilen ölçüm değerlerine göre tüm kanallar aynı kaynağı aynı mesafeden eşit sayacak şekilde ölçüm katsayıları hesaplanarak belirlenmiştir. Bu sayılar CORR_TBL isimli bir veri bloğuna kaydedilmiştir. Central Processor bloğu sırası ile bütün kanalları tarayarak her bir kanalın *cpm* değerlerini, CORR_TBL bloğundaki çizelgeden ilgili kalibrasyon katsayıları ile çarpmaktadır. Ardından bu sayılar BCD 'ye dönüştürülür. Sonrasında bu sayılar seri haberleşme bloğu olan PKG_SND bloğu tarafından UART haberleşme protokolü bloğu ile HMI sisteminin seri giriş portuna HMI'nın istediği formatta seri veri paketleri halinde gönderilirler.

Sistemde *cpm* değerlerinin yanı sıra istenirse saniyedeki sayımlar da yani *cps* değerleri de ölçülebilir ve görüntülenebilir. Ölçümler, radyasyon kaynağının muntazam olmayan ışıma sayılarına bağlı olarak dalgalanır. Bu dalgalanmaların önlenmesi ve açtıkları değerlerini daha güvenilir bir şekilde tespit edilebilmesi için *cpm* cinsinden sayımlar alınır.

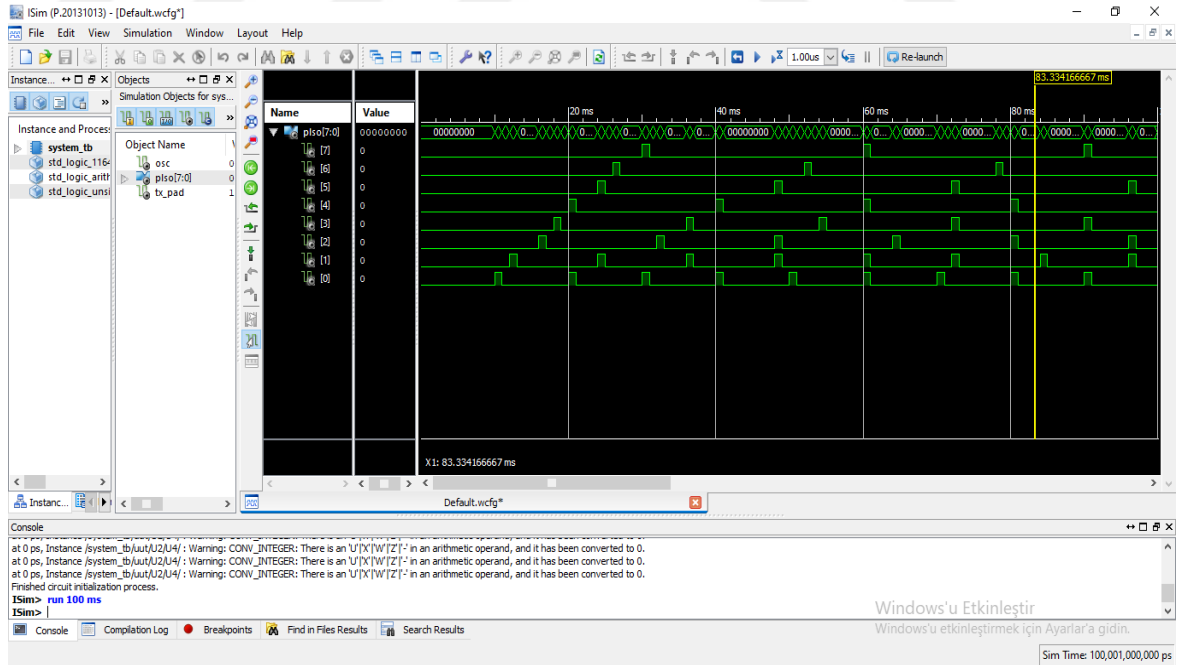
Kanallara ait değerlerin gösteriminde k sırasıyla kanal indeksi ve $k = [1,2,3,\dots,8]$ olmak üzere ölçüm kanalları CH_k olarak ve kanallara ait ölçüm değerleri cpm_k ifade edilmiştir. İlk dizi 45° 'ye yerleştirilmiştir ve diğerleri de sırasıyla birbirlerinden açılal olarak 45° uzağa yerleştirilmiştir. Burada her kanaldaki sensör dizisinin yönü, dizi indeks değeri 45° ile çarpılarak hesaplanabilir. Her dakika *cpm* değerleri güncellenir ve *cpm* sonuçları dizisi değerlendirilir. Bu ölçümler dizisinden aralarındaki maksimum sayım değerinin ait olduğu kanalın indeksi belirlenir. Kaynak Yönü (DOS: Direction of Source), maksimum ölçümün tespit edildiği kanalın indeks değeri "k" ile **Eşitlik 3.7** ile verilen denklemde 45° ile çarpılarak hesaplanabilir:

$$\text{DOS} = k \times 45^\circ \quad 3.7$$

Örneğin CH₃ kanalından maksimum sayım alınmışsa sonuç, indis değeri olan k=3 sayısı ile 45° çarpılarak $DOS=3 \times 45^\circ = 135^\circ$ şeklinde hesaplanabilir. Bununla birlikte, bu yaklaşım 45° çözünürlük sağlar, *cpm* ölçümleri üzerinde bazı hesaplama algoritmaları uygulanarak açısız çözünürlük artırılabilir.

3.3.2 FPGA test bloğu

Yazılım sisteminin test edilebilmesi için pils periyodu 33Hz’den 100Hz’e kadar kademeli olarak artan farklı frekanslarda kare dalga üreten bir test bloğu yazılmıştır. Üretilen pilslerin genişlikleri 100µs’dır. FPGA’nın 8 ayrı çıkış pinine adreslenen test bloğunun çıkış sinyalleri bu çıkışlara aktarılmıştır. Bu pinler sinyal kaynağı olarak kullanılarak sayım yapacak olan pinlere giriş olarak kablo ile bağlanmış, yazılım geliştirme esnasında sayım ve ölçüm zamanlaması denemelerinde, deneyler esnasında dedektör sinyallerinin simüle edilmesinde test amaçlı olarak kullanılmışlardır. Hazırlanan test sinyali yazılımı, simülasyon programı olan testbench yazılımı ile ISE içerisinde bulunan Isim simülasyon programında test edilmiştir. Kanalların çıkış sinyallerine ait ekran görüntüsü Şekil 3.37’de verilmiştir.

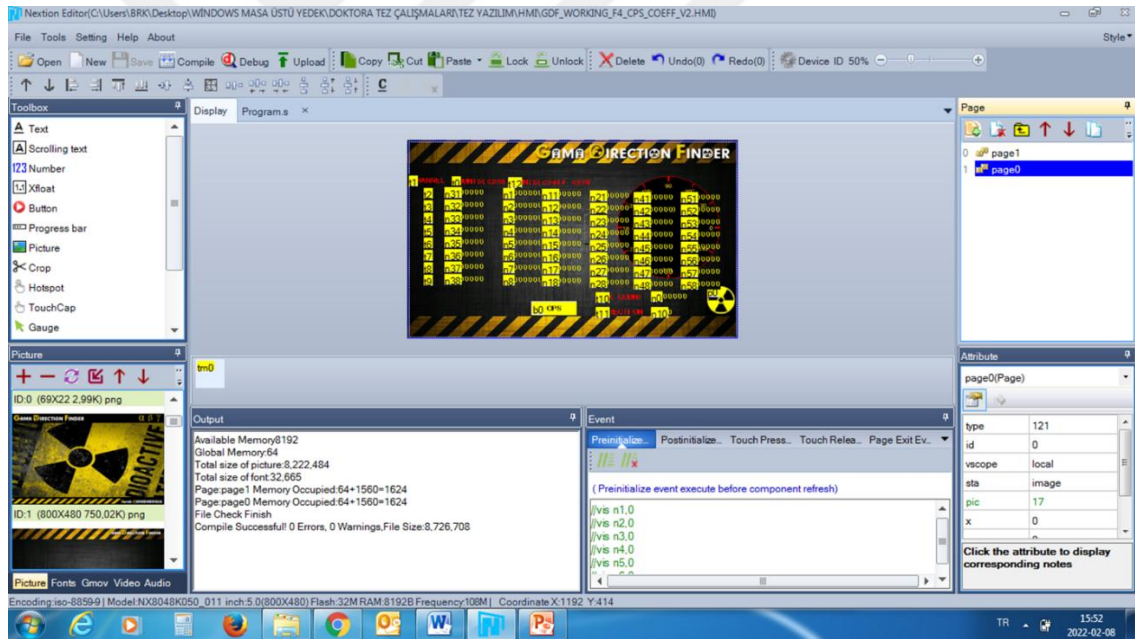


Şekil 3.37 Test sinyali yazılımı Isim simülasyon programı çıkış sinyalleri ekran görüntüsü

3.4 HMI Birimi

FPGA ünitesinden seri olarak iletilen *cpm* ve algılanan kaynak yön değerlerinin görüntülenmesi için kullanıcı ara yüzü olarak dokunmatik ekran özelliğine de sahip 5" NEXTION ENHANCED HMI kullanılmaktadır. Bu cihaz TFT 800×480 dokunmatik ekran, 32MB Flash, 8192 Bayt RAM, 1024 Byte EEPROM, gömülü RTC, gömülü GPIO ve 65k renk özelliklerine sahiptir.

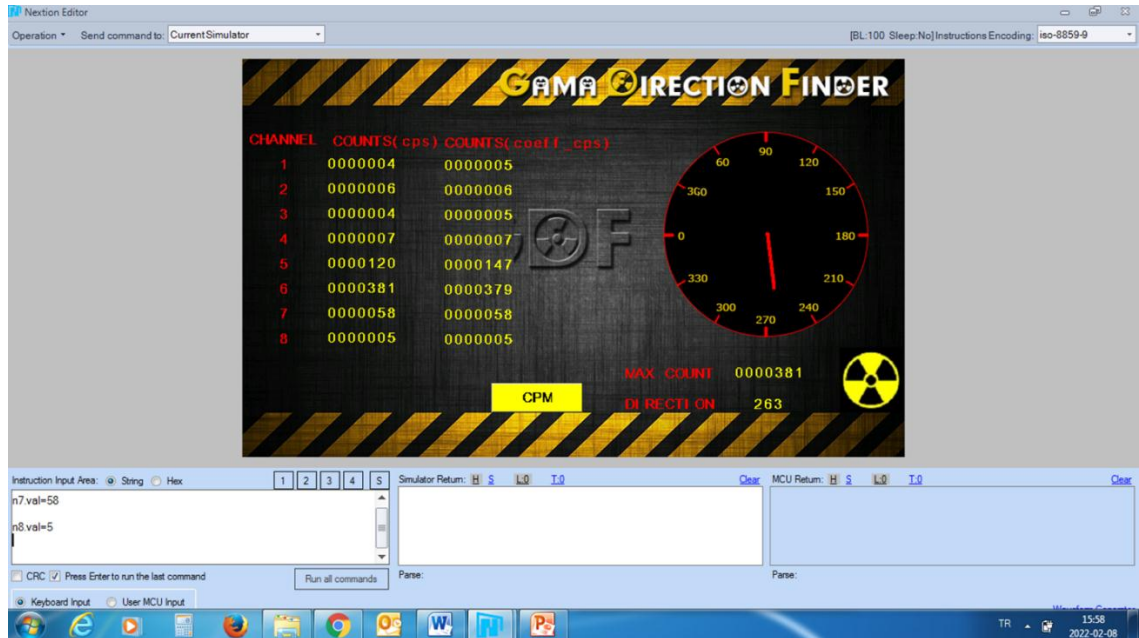
Sonuçların gözlemlenmesi için, *cpm* değerleri ve tespit edilen kaynak yönü seri olarak bu dokunmatik ekrana aktarılır. HMI cihazının Nextion Editor isimli bir ara yüz tasarım programı ve kendine ait programlama komut seti bulunmaktadır. Cihazın ara yüzü bu program kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 3.38’de Nextion Editor yazılımının ara yüz tasarımı için ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.38 Nextion Editor programı ve cihaz ara yüzü tasarımı ekran görüntüsü

NEXTION HMI ‘ın UART kısmında veri aktarımı için 3 baytlık 0xFF 0xFF 0xFF eki ile sonlanan ASCII formatında komutları kabul etmektedir. FPGA tarafından alınan ölçümler bu formata uygun paketlenerek HMI ‘a seri olarak aktarılmıştır. Örneğin n. Kanalin ölçümü hex formatında 6 basamak sayımı gösterecek şekilde “nChnl.val=XXXXXXXXXXXX” dizisi olarak aktarılmaktadır. İşlem bitince de yine hex

formda X20 komutu gönderilmektedir. Alınan veriler burada tekrar parçalara ayrılarak sırasına göre *cpm* sayımını gösteren textbox gibi ilgili komponentlere aktarılmış ve ekranda gösterilmişlerdir. Cihazda *cpm* ve *cps* seçim butonları ile sayımların hangi formda gösterileceği seçilebilmekte ve seçilen formata göre uygun sayfa yüklenmektedir. Sayfada 8 kanal da listelenmekte ve aldıkları ölçüm değerleri saniyelik olarak güncellenerek kullanıcıya gösterilmektedir. Ara yüzde, sayımların deney esnasında gözlenebilmesi için dedektör kanallarının o anda saydıkları değer olan COUNTS ölçüm sütunu ve katsayılarla çarpılmış değerler olan COUNTS (coef_cps) sayım sütunu bulunmaktadır. Ayrıca kanallar arasında maksimum sayım değere sahip kanala ait sayımın gösterildiği MAX COUNT ve kaynak ışınlarının sensörlerin sıfır açısına göre hesaplanan ve ölçülen geliş açısı değerinin sayısal olarak verildiği DIRECTION veri haneleri mevcuttur. Ölçülen açı değeri eş zamanlı olarak ara yüzde bulunan 360 derecelik bir skala objesindeki ibre ile de analog olarak gösterilmektedir. Şekil 3.39'da Nextion Editor programında hazırlanmış olan ara yüz ve yazılımın simülasyonu verilmektedir. Harici olarak komut satırından girilen sayım değerlerine göre kalibrasyon katsayılarına göre sayımlar normalize edilmiş, ardından da açı değeri hesaplanarak gösterilmiştir.



Şekil 3.39 Cihaz ara yüzü Nextion Editor simülasyon programı ekran görüntüsü

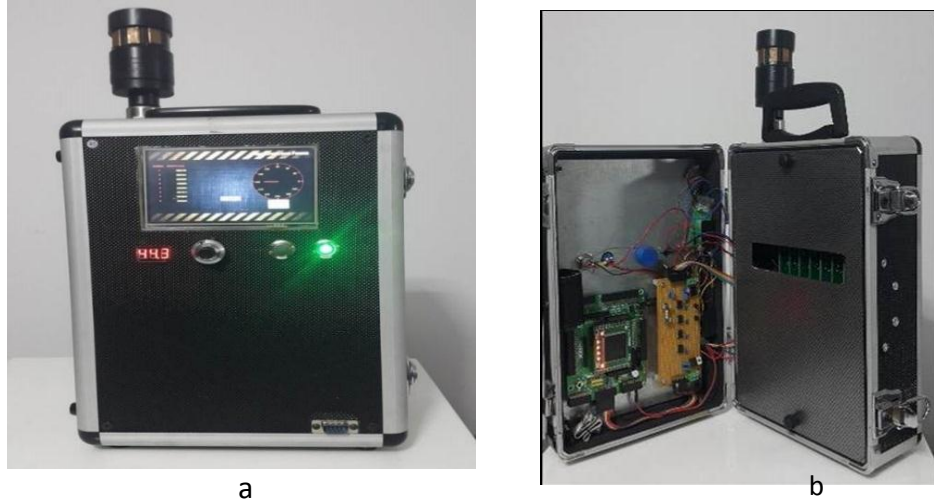
3.5 Metal Şase

Ölçümün çok hassas olması ve dedektör sinyal seviyelerinin çok düşük olması nedeniyle sistem $32 \times 23 \times 15.5$ cm boyutlarında alüminyum bir alet çantasına yerleştirilmiştir. Komple metal olan bu şasi bir nevi Faraday kafesi görevi görmektedir ve sayesinde elektromanyetik gürültü topraklanarak azaltılmaktadır (**Şekil 3.40**).



Şekil 3.40 Dedektör ünitesi tüm dedektörlerin tertibatı

Her ne kadar çanta yüzerleri alüminyum plakalardan oluşsa da yapılan ölçümlerde bazı plakaların diğerlerine temas etmediği görülmüş, bu plakalar ayrıca kablolar ile şaseye tekrar bağlanarak metal kutuda süreklilik sağlanmıştır. Sistemin çanta içerisine monte edilmesi ve cihazın güç, işlemci ve LNA bölümleri arasındaki elektromanyetik gürültü girişimini yalıtım için metal montaj levhaları tasarlanmıştır. Yapılan çizimler kullanılarak lazer kesim ve büküm işlemleri ile üretilen levhalar boş olan çantanın içerisine yerleştirilmişlerdir. Tüm dedektör tertibatı ve iç görünümü sırasıyla **Şekil 3.41.a** ve **Şekil 3.41.b**'de verilmiştir



Şekil 3.41 (a) Dedektör ünitesi; (b) Dedektörün iç görünümü

Levhalar üzerine LNA bloğunun kolayca sabitlenebilmesi ve dışarı alınabilmesi için plastik montaj elemanları yerleştirilmiştir. Cihazın alt kısmına yüksek voltaj kartı ve akü yerleştirilmiştir. Yüksek voltaj kartı ile LNA kartları arasına yerleştirilen ilave parça yüksek voltaj kartından gelen gürültünün elimine edilmesine yardımcı olmuştur. Yapılan ölçümlerde analog kısım ile kapak üzerine yerleştirilmiş olan dijital kartlar arasında kapak kapatıldığında girişim olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple analog kısım üzerine, analog ve dijital bloklar arasındaki elektromanyetik paraziti önlemeye yardımcı olacak ilave bir metal kapak yerleştirilmiştir. Bu kapak üzerine açılan üzerinde kanal numaralarını da gösteren bir pencere sayesinde de kalibrasyon esnasında LNA kartlarının BLR ve komparatör kısımlarının trimpotlarına ulaşılabilmesi ve kapak açıkken de gürültünün engellenmesi sağlanmıştır.

Sistemin kapak kısmına yerleştirilen diğer bir metal levhaya ise FPGA kartı ve invertör kartı, dedektör voltajı ayarlama potansiyometresi ve RS232 çevirici kartı monte edilmiştir. Levhanın arka kısmında ise, kapağın ön kısmında yerleri kesilerek açılmış olan HMI, dedektör voltaj göstergesi, ledli açma-kapama butonu ve reset butonu ile kablolu ya da bluetooth modül ile kablosuz veri aktarımına imkan veren RS232 bağlantı portu bulunmaktadır. Portatif ünitenin toplam ağırlığı 3185 gram olarak ölçülmüştür. Elektronik sistem bileşenleri görüntüsü Şekil 3.42’de verilmiştir:



Şekil 3.42 Elektronik sistem bileşenleri

3.6 Kalibrasyon İşlemi

Hesaplamalar, sayma verimleri birbiriyle aynı olan özdeş sensörlerden alınan cpm değerlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu koşulu sağlamak için öncelikle radyasyon kaynağı olmayan bir ortamda, sensörlerin arka plan ölçümleri yapılmıştır. Bu işlemden sonra sensörler 2 cm mesafeden aynı ^{137}Cs kaynağına maruz bırakılmışlar ve sayım ölçümleri 15 dakika boyunca kaydedilmiştir. Sensörlerin ortalama sayımları hesaplanmış ve her kanalın arka plan sayısı cpm değerlerinden çıkarılmıştır. Her kanalın sayımları kaydedildikten sonra ortalama cpm değerleri (cpm_{avg}) hesaplanmıştır. Her sensörün bu ortalama değer üzerindeki oranları hesaplanarak **Eşitlik 3.8** ve 3.9 ile verilen bir dizi kalibrasyon katsayısı (C_{coef}) hesaplanmıştır:

$$Cpm_{avg} = \sum_1^k Cpm_k , \quad k = [1,2,3, \dots, 8] \quad 3.8$$

$$Coef_k = \frac{Cpm_k}{Cpm_{avg}} \quad 3.9$$

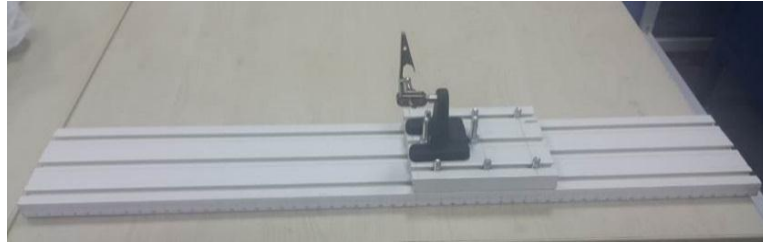
Katsayılar, gerçek ölçümler olan cpm_{act} ile çarpılarak ve her sensör için düzeltilmiş cpm değerleri (cpm_{cor}) elde edilmiştir. Bu düzeltilmiş sayım değerleri üzerinden yön hesaplama algoritması uygulanmıştır ve kaynak konumunun yönü dedektör sistemi tarafından belirlenmesi sağlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışması kapsamında tasarlanan ve imal edilen dedektör cihazının fonksiyonları ve işlevleri laboratuvar ortamında farklı enerji ve aktivite değerlerine sahip nokta kaynaklarla test edilmiştir. Dedektör hem açı bulma hem de mesafeye göre sayım alma performansı konularında muhtelif testlere tabi tutulmuş, çalışma aralıkları ve karakteristikleri belirlenmiştir.

4.1 Dedektör Testleri

Dedektörün performansı ve çalışması bazı γ kaynakları ile test edilmiştir. Deneyler Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde yapılmıştır. Ölçümler için, radyasyon kaynağının takılı olduğu kaynak tutucu aparat ve üzerinde bulunduğu pozisyonun mesafe değerinin okunmasını sağlayan bir uzunluk skalası bulunan, kaynağın üzerinde serbestçe kayarak istenilen mesafede konumlandırılmasını sağlayan bir raydan oluşan el yapımı bir ölçüm mekanizması kullanılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Kayar raylı kaynak tutucu mekanizması

Bu sistem ile farklı radyoaktif kaynaklar ve kaynak konumu açısal ölçümleri için *cpm* ve mesafe ölçümleri yapılmıştır. Dedektörün kartları ve sensörlerin test edilmesi için farklı enerji ve aktivitelere sahip iyonize edici radyasyon kaynakları kullanılmış, belirli mesafelere yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sayımların doğru değerlendirilebilmesi için ilk önce ölçüm alınacak ortamdaki arka plan (background) doğal radyasyon sayımları gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlere ait değerler, ortalama değer ve standart sapma değerleri **Çizelge 4.1** ve **Çizelge 4.2**'de verilmiştir.

Dedektör, 661.6 keV enerjili γ kaynağı olan 3.7 MBq aktiviteli ^{137}Cs kaynağına 2 cm mesafeye yerleştirilmiştir ve 30 dakika boyunca ölçümler alınmıştır. CH₁ Kanalına ait örnek ölçüm değerleri

Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Tüm dedektör kanalları sırayla 661.6 keV enerjili γ kaynağı olan 3.7 MBq aktiviteli ^{137}Cs kaynağına 2 cm mesafeye yerleştirilmiştir ve 30 dakika boyunca ölçümler alınmıştır. Tüm kanallara ait 2 cm mesafede bulunan 3.7 MBq ^{137}Cs kaynağına ait 30 dakikalık sayım ortalamaları ve standart sapma çizelgesi **Çizelge 4.4**'te verilmiştir.

Çizelge 4.1 CH₄ kanalına ait arka plan ölçümleri

i	S_i	$S_i - \bar{S}$	$S_i - \bar{S} / \sigma$	R	i	S_i	$S_i - \bar{N}$	$S_i - \bar{S} / \sigma$	R
1	0	-0.4	-0.632	-1	16	0	-0.4	-0.632	-1
2	0	-0.4	-0.632	-1	17	0	-0.4	-0.632	-1
3	1	0.6	0.949	1	18	0	-0.4	-0.632	-1
4	0	-0.4	-0.632	-1	19	1	0.6	0.949	1
5	0	-0.4	-0.632	-1	20	0	-0.4	-0.632	-1
6	1	0.6	0.949	1	21	0	-0.4	-0.632	-1
7	0	-0.4	-0.632	-1	22	1	0.6	0.949	1
8	0	-0.4	-0.632	-1	23	0	-0.4	-0.632	-1
9	0	-0.4	-0.632	-1	24	3	2.6	4.111	4
10	0	-0.4	-0.632	-1	25	0	-0.4	-0.632	-1
11	2	1.6	2.530	3	26	0	-0.4	-0.632	-1
12	0	-0.4	-0.632	-1	27	0	-0.4	-0.632	-1
13	0	-0.4	-0.632	-1	28	1	0.6	0.949	1
14	2	1.6	2.530	3	29	0	-0.4	-0.632	-1
15	0	-0.4	-0.632	-1	30	0	-0.4	-0.632	-1
$\bar{S} = 0,4 \quad \sigma = 0.6325$									

Çizelge 4.2 Tüm kanallara ait arka plan ölçüm ortalamaları ve standart sapma çizelgesi

i	CH_i	$\bar{S}_i$	$\sigma_i = \sqrt{\bar{S}_i}$
1	CH_1	0.367	0.606
2	CH_2	0.267	0.516
3	CH_3	0.400	0.632
4	CH_4	0.400	0.632
5	CH_5	0.500	0.707
6	CH_6	0.367	0.606
7	CH_7	0.333	0.577
8	CH_8	0.333	0.577

Çizelge 4.3 CH_4 'e ait 2 cm mesafede bulunan 3.7 MBq ^{137}Cs kaynağına ait 30 dakikalık cpm ölçüm çizelgesi

i	S_i	$S_i - \bar{S}$	$S_i - \bar{S} / \sigma$	R	i	S_i	$S_i - \bar{S}$	$S_i - \bar{S} / \sigma$	R
1	2560	89.367	1.793	2	16	2557	86.367	1.732	2
2	2407	-63.633	-1.276	-1	17	2490	19.367	0.388	0
3	2528	57.367	1.151	1	18	2478	7.367	0.148	0
4	2518	47.367	0.950	1	19	2504	33.367	0.669	1
5	2555	84.367	1.692	2	20	2536	65.367	1.311	1
6	2429	-41.633	-0.835	-1	21	2421	-49.633	-0.996	-1
7	2443	-27.633	-0.554	-1	22	2419	-51.633	-1.036	-1
8	2415	-55.633	-1.116	-1	23	2540	69.367	1.391	1
9	2543	72.367	1.452	1	24	2428	-42.633	-0.855	-1
10	2395	-75.633	-1.517	-2	25	2524	53.367	1.071	1
11	2546	75.367	1.512	2	26	2411	-59.633	-1.196	-1
12	2449	-21.633	-0.434	0	27	2405	-65.633	-1.317	-1
13	2509	38.367	0.770	1	28	2512	41.367	0.830	1
14	2531	60.367	1.211	1	29	2562	91.367	1.833	2
15	2556	85.367	1.712	2	30	2481	10.367	0.208	0
$\bar{S} = 2491.10 \sigma = 49.91$									

Çizelge 4.4 Tüm kanallara ait 2 cm mesafede bulunan 3.7 MBq ^{137}Cs kaynağına ait 30 dakikalık sayım ortalamaları ve standart sapma çizelgesi

i	$\bar{S}_i$	$\sigma_i = \sqrt{\bar{S}_i}$
1	2475.1	49.75
2	2194.77	46.85
3	2454.07	49.54
4	2337.00	48.34
5	2798.87	52.90
6	2444.07	49.44
7	2406.63	49.06
8	2306.00	48.02

4.2 Çeşitli Radyoaktif Kaynaklar İçin Cpm-Mesafe Ölçümleri

Dedektörün ölçüm performansının test edilmesi için dedektör çeşitli iyonize edici radyasyon kaynakları ile test edilmiştir. Uzun süreli testler esnasında aşırı doza maruz kalma ve buna bağlı oluşabilecek sağlık problemleri sebebi ile mümkün olduğunca düşük aktiviteli nokta kaynaklar kullanılmaya çalışılmıştır. Dedektörün farklı enerjideki radyoaktif kaynakları ölçmedeki performansının gözlemlenebilmesi için düşük, orta ve yüksek olmak üzere çeşitli enerjilere sahip radyoaktif kaynaklar (^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co) kullanılmıştır. Kullanılan kaynaklar Şekil 4.2’de verilmiştir:



Şekil 4.2 Radyoaktif kaynaklar (^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co)

Radyasyon güvenliği için düşük aktiviteli seçilen ve γ kaynağı olarak faydalanılan laboratuvar nokta kaynaklarının aktivite değerleri ve γ ışını enerjiler Çizelge 4.5’de listelenmiştir.

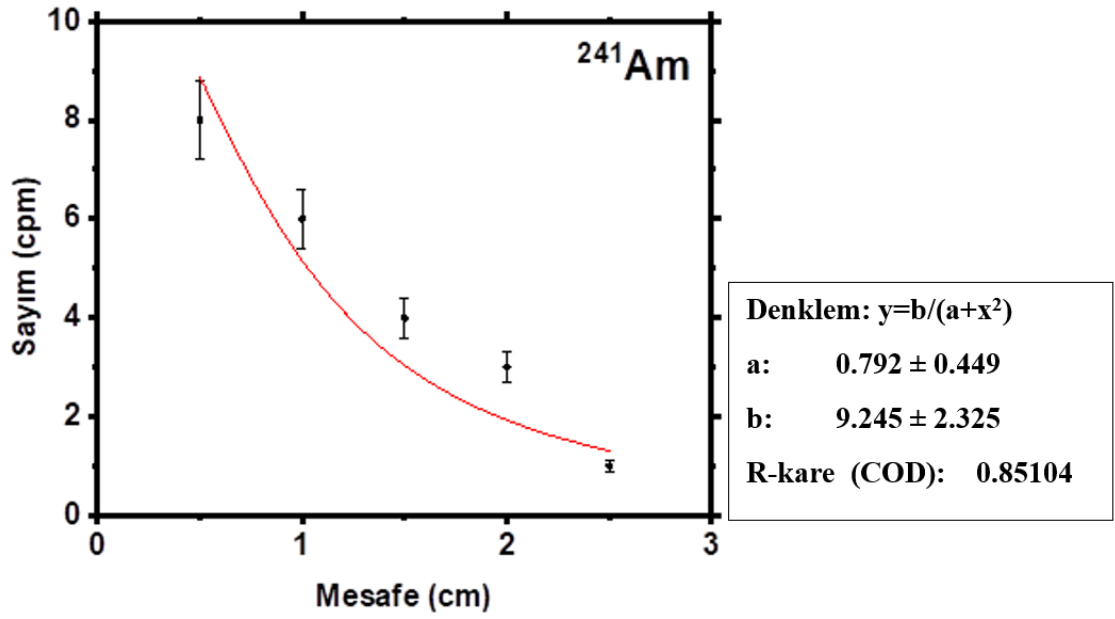
Çizelge 4.5 Gama ışını test kaynaklarının aktivitesi ve γ ışını enerjisi

Kaynak Adı	^{241}Am	^{137}Cs	^{60}Co
Aktivite	9.761 μCi	3.7 MBq	1 μCi
Enerji	59.54 (keV)	661 (keV)	1173 (keV) - 1332 (keV)

Dedektörlerin enerji ölçüm aralığını belirlemek için en yüksek γ ışını enerjisine sahip ^{60}Co kaynağı ve en düşük γ ışını enerjisine sahip ^{241}Am kaynağı seçilmiştir. Her test kaynağı dedektörün önüne yerleştirilerek 5 dakikalık süreler boyunca ölçümler alınmış ve ortalama *cpm* ölçümleri kaydedilmiştir. Kayar raylı kaynak tutucu mekanizmasına yerleştirilen γ radyasyon kaynaklarının konumu 1 cm'lik adımlarla hareket ettirilerek aynı ölçüm prosedürü her pozisyon için tekrarlanmış ve mesafeye karşı *cpm* ölçümleri alınarak sonuçlar kaydedilmiştir. Ölçümler esnasında mesafe arttıkça sayımların azaldığı gözlemlenmiştir. Ölçüm mesafesi mesafenin yanı sıra kaynakların aktivitelere ve dedektör yüzey alanına bağlı olarak da değişmektedir. Kaynak aktivitesinin yükselmesi ölçüm menziline de arttıracaktır. Artan mesafeye göre ölçülen *cpm* değerlerinin, **Eşitlik 4.1** ile verilen ters kare yasasına (Ahmed 2007) göre kaynak mesafesinin karesi ile ters orantılı olarak azaldığı ve bu yasaya uyduğu görülmüştür:

$$\Phi \propto \frac{1}{r^2} \quad 4.1$$

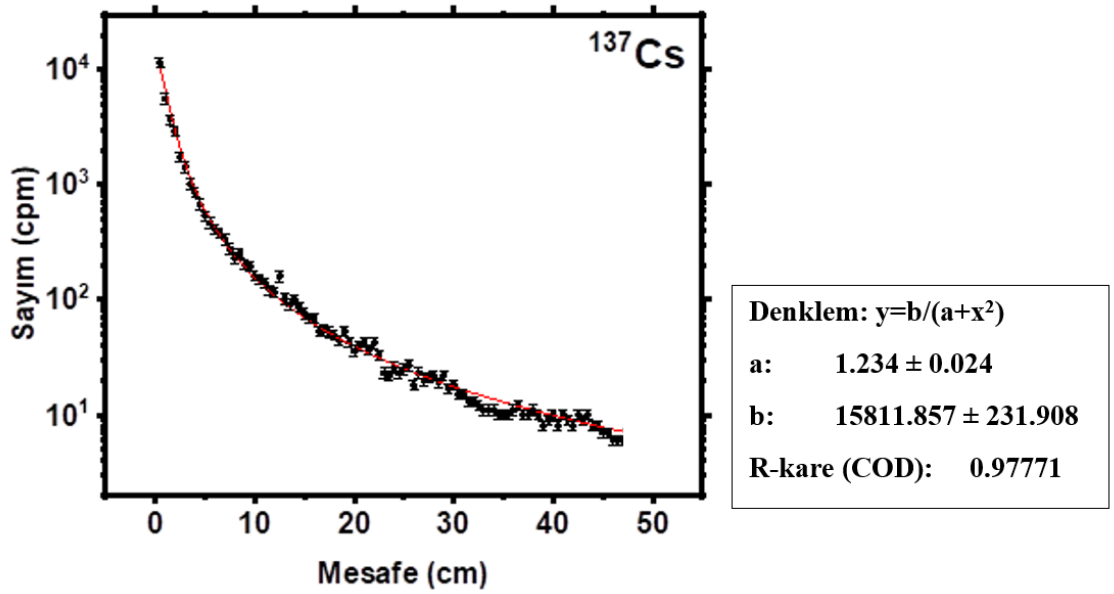
Burada Φ radyasyon akısını ifade etmektedir ve r radyasyon test kaynağı ile radyasyon akısının hesaplanacağı nokta arasındaki mesafe değerini ifade etmektedir. 9.761 μCi aktiviteli ^{241}Am nokta kaynağı ile yapılan deneylerde ölçülen *cpm* değerlerinin mesafeye karşı değişim grafiği **Şekil 4.3**'te verilmiştir:



Şekil 4.3 ^{241}Am radyasyon kaynağının *cpm* değerlerinin mesafeye göre değişimi

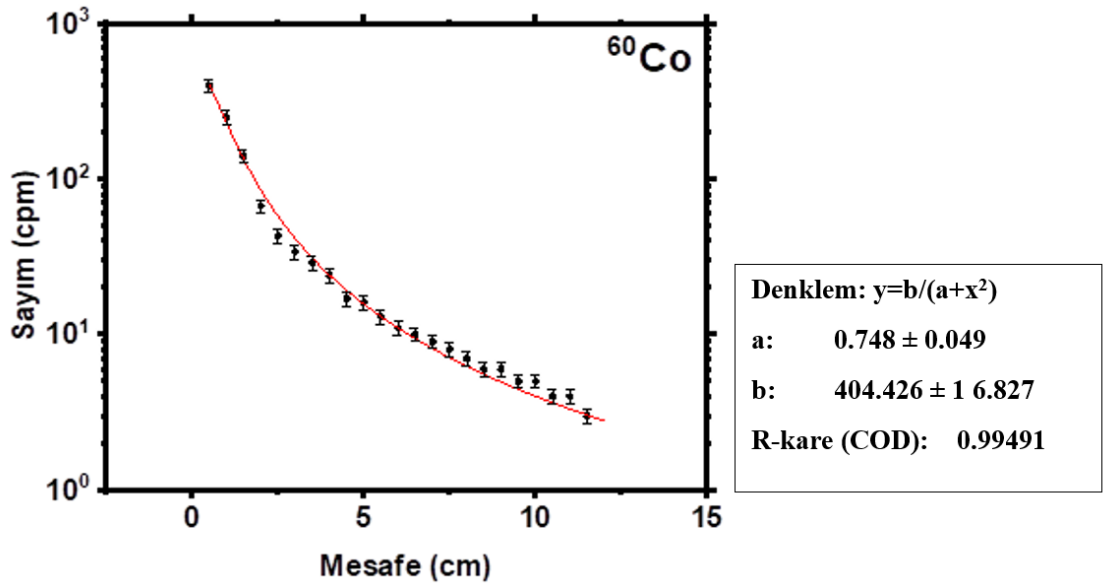
^{241}Am nokta kaynağı ölçümleri, kaynağın düşük aktiviteli ve düşük enerjili olmasından dolayı kısa bir mesafe ölçüm aralığındadır. ^{241}Am aynı zamanda alfa da yaymaktadır fakat dedektöre uygulanan optik izolasyon malzemesi alfanın ulaşmasını engelleyeceği için yapılan sayımlar kaynağın yaydığı 59.54 keV enerjili γ ışınlarına aittir. Bu ölçümlere göre dedektör 59.54 keV gibi düşük enerjili γ ışınlarını da ölçebilmektedir.

3.7 MBq aktiviteye sahip ^{137}Cs nokta kaynağı ile yapılan ölçümlerde, kaynağın nispeten yüksek aktivitesi ve 661 keV enerjisinden dolayı dedektörün aldığı sayımlar ve ölçüm menzili daha yüksek çıkmıştır. ^{137}Cs nokta kaynağı ile yapılan deneylerde ölçülen logaritmik *cpm* değerlerinin mesafeye karşı değişim grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir:



Şekil 4.4 ^{137}Cs radyasyon kaynağının *cpm* değerlerinin, mesafeye göre grafiği

1 μCi aktiviteye ve 1173 keV ve 1332 keV enerjiye sahip ^{60}Co nokta kaynağı ile yapılan deneylerde, kullanılan kaynaklar arasında en düşük aktiviteye sahip olmasına rağmen yine de ^{241}Am nokta kaynağı ölçümlerine kıyasla çok daha uzun menzilde ölçümler alınmıştır. Bunun da yüksek olan enerjisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. ^{60}Co nokta kaynağı ile yapılan testlerde ölçülen logaritmik *cpm* değerlerinin mesafeye karşı değişim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.



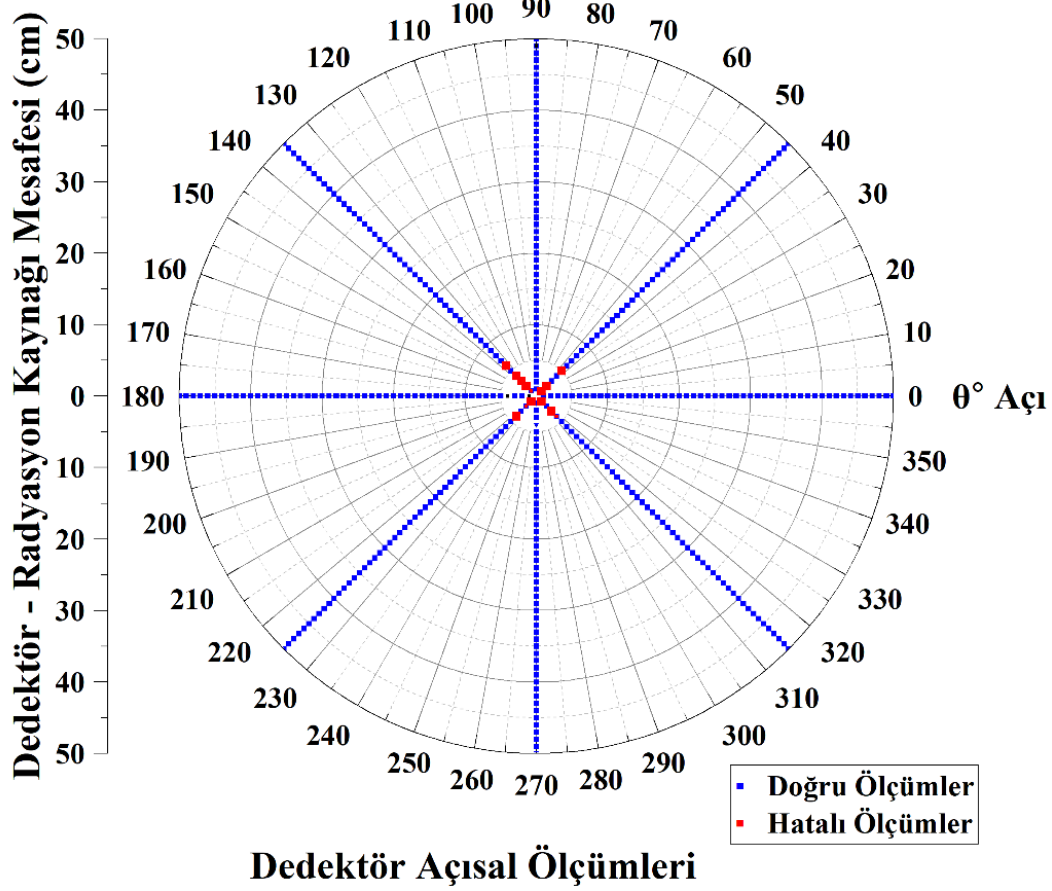
Şekil 4.5 ^{60}Co radyasyon kaynağının *cpm* değerlerinin, mesafeye göre değişimi

Test sonuçları sistemin 59.54 keV ile 1332 keV aralığındaki γ ışınlarını algılayabildiğini ve gama dedektörü ve gama sayıcı ünitesi olarak çalıştığını göstermektedir. *cpm* değerleri ters kare kanunu nedeniyle γ ışını testi kaynak konum mesafesinin karesiyle ters orantılı olarak azalmıştır. Alınan mesafeye göre sayım değerleri genelleştirilmiş ters kare denkleminde $y=b/(a+x^2)$ ($\propto 1/x^2$) göre fit edilmiştir ve denklemin eğrisi de grafiğe eklenmiştir. **Şekil 4.3**, **Şekil 4.4** ve **Şekil 4.5**'te görüleceği üzere sayım değerleri, ters kare denklemi olan bu grafiğe uyumlu çıkmıştır. Daha yüksek aktiviteye sahip kaynaklar kullanıldığı takdirde dedektör ölçüm menzili de artan γ radyasyonu ile artış gösterecektir.

4.3 Kaynak Konum Açısı Ölçümleri

Gama kaynağının bulunduğu yönün tespiti amacıyla kaynaklar dedektöre göre belirli pozisyonlara yerleştirilmiştir. Kaynakların ölçüm açılarına dedektöre göre doğru yerleştirilmesi amacı ile silindirik yapıdaki dedektör probu 360° iletki ölçeğinin merkezine yerleştirilmiş ve iletki proba sabitlenmiştir. Açı ölçümleri için kaynak tutucuda bulunan radyasyon kaynağının yönü açı ölçer yardımı ile ayarlanmış, kaynak 0°'den başlayarak 360°'ye gelene kadar 10°'lik adımlarla artan açı değerlerindeki pozisyonlara yerleştirilmiştir. Her açı adımı için 5 dakikalık ölçümler alınmış, dedektörün *cpm* sayımı ve radyasyon kaynağı açısı değerleri kayıt altına alınmıştır. Kaynak tutucuda bulunan radyasyon kaynağı, kayar ray mekanizması ile 1 cm'lik adımlarla probun merkezinden uzaklaştırılmış ve her adımda bu ölçüm prosedürü 0 cm ila 50 cm mesafe değerleri için uygulanmıştır. Toplamda 36 kaynak açı pozisyonu her kaynak açı değeri için 50 farklı ortalama mesafe ölçümü olmak üzere 1800 dedektör açı ölçüm değeri ve 1800 maksimum *cpm* ölçüm değeri ölçülmüştür. Her açı konumu için, kayan radyasyon kaynağı tutucusu iletki üzerindeki açı ölçeğine göre ölçüm açısına hizalanmış ve konumlandırılmıştır. Ölçümler esnasında sistem sekiz adet dedektörden gelen sinyallerin hepsini aynı anda ölçmekte ve en yüksek *cpm* değerlerine sahip dedektörü tespit etmektedir. Daha sonra maksimum sayım alınan dedektörün indeksini kullanarak geliş açısı tespit etmektedir. Bulunan açı değeri sayısal olarak HMI ekranına yazılmakta ve ayrıca kullanıcı ara yüzünün analog skalasındaki ibre ile de yönü ölçeğinde gösterilmektedir. Farklı açılara ve mesafelere yerleştirilen kaynağın

dedektör tarafından ölçülen açı değerlerine göre sonuçlar mesafeye karşı 360° ölçeğinde çizilmiştir ve ölçüm grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Kaynak açısı ve mesafesine göre dedektör açısal ölçümleri grafiği

- i. Grafikte test edilen sistemin performansını detaylı olarak incelemek için 360° ölçekte 10° ölçüm aralıkları için açısal ölçümler mesafeye karşı çizilmiştir. $\pm 22.5^\circ$ ölçüm aralığı dışındaki ölçümler yanlış ölçüm olarak değerlendirilmiş ve kırmızı etiketle gösterilmişlerdir. Aralık içindeki ölçümler ise doğru ölçüm olarak değerlendirilmiş ve mavi etiketle gösterilmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ve çizilen grafiğe göre dedektörün ^{137}Cs radyasyon kaynağının yerleştirildiği açıyı başarılı bir şekilde tespit ettiği söylenebilir. Sistemin açı algılama performansı kabul edilebilir sınırlar içinde olmasına rağmen bazı ölçümlerde sapmalar tespit edilmiştir. Sonuçların çoğu $\pm 22.5^\circ$ aralığındadır. 1800 açı ölçümünün 14’ü bu aralığın dışında bulunmuştur ve bu sonuçlara göre başarısı %99,22’dir. Hatalı olan

bu ölçümlerin genelde merkeze daha yakın konumlarda yapılan ölçümlerde olduğu görülmüştür. Ölçüm yapılan kaynak yüksek aktiviteye sahiptir ve kaynak sensörlere daha yakın olduğunda γ akısı yüksek olmaktadır. Gama kaynağı, diskin merkezinde bulunan bir alüminyum silindirin ucunda yer almaktadır ve bu yapıyı gerekli ölçüm açısına yönlendirmek ve merkeze odaklamak zor bir işlemdir. Kaynak her ölçüm adımında tekrar merkeze ve ölçüm açısına hizalanmıştır, ancak nokta kaynağın yerleştirilmesi sırasında yapılan en küçük açısal sapmalar bile 5 cm'ye kadar yakın konumlarda daha yüksek akı nedeniyle hesaplamalarda daha büyük sayım farklılıklarına, dolayısı ile de açısal ölçüm farklılığına sebep olmaktadır. Alınan yanlış ölçümler büyük oranda bu hizalama hatasından kaynaklanmaktadır.

- ii. Grafiğe göre 20° , 110° , 160° , 250° , 290° , 340° açısal ölçüm değerlerinden bazılarının kaynak açısal konumlarından saptığı görülmektedir. Dedektörler yönlü görüş açısına sahiptirler ve komşu dedektörlerin görüş açılarının kesişim değerleri olan 67.5° , 112.5° , 157.5° , 202.5° , 247.5° , 292.5° ve 337.5° açılara yakın açılarda yüksek *cpm* değerleri nedeniyle hatalı ölçümler meydana gelebilmektedir. Bu kesişim açılara yakın açısal konumlardaki ve dedektör merkezine yakın kaynak konumlarda alınan yanlış ölçümlerin nedeni bu olabilir.
- iii. Sensörün gördüğü katı açı, kaynak dedektörden uzaklaştıkça azalmakta ve keskinleşmektedir. Bunun sonucunda kaynak dedektörden uzaklaştıkça dedektörün açı tahmin performansının arttığı gözlemlenmiştir.
- iv. 45° içindeki yön tespiti işlemi bittikten sonra dedektör, kaynak konum açısı ile hizalanana ve maksimum *cpm* sayısına ulaşana kadar döndürülürse daha hassas bir açı değeri belirlenebilmektedir. Bu teknik uygulanarak açısal algılama performansı iyileşme sağlanarak daha iyi bir yön bilgisi elde edilebilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, hem iyonize edici γ kaynağının varlığını tespit edebilen ve gama sayıcı olarak çalışabilen, hem de radyasyon kaynağının yönünü sayısal olarak tahmin edebilen ve aynı zamanda yön açısını bir ölçekte gösterebilen BPW34 PIN diyotların algılayıcı olarak kullanıldığı yarı iletken algılayıcı tabanlı, paralel işlem gerçekleştirme kapasitesine sahip tek bir FPGA yongası üzerinde çalışan çok sensörlü, taşınabilir, el yapımı bir iyonize edici radyasyon dedektör sistemi tasarlanmış, prototipi üretilmiş ve radyoaktif kaynaklarla test edilmiştir. Yapılan ölçümlerde cihazın en düşük enerjiye sahip ^{241}Am 'den en yüksek enerjiye sahip ^{60}Co 'ya kadar geniş bir γ ışını enerji aralığında ölçüm yapabildiği gözlemlenmiştir. Bununla beraber sistem, bir gama sayacı olarak çalışmakta ve bünyesindeki sekiz ayrı gama sayacı dedektör ile eş zamanlı olarak kullanıcı seçimine göre *cpm* veya *cps* birimindeki ölçümlerini alarak cihazın kapağına monte edilmiş olan dokunmatik ekranlı HMI ünitesindeki kullanıcı ara yüzünde bu değerleri göstermektedir. Kaynağın yönü için tespit edilen açı değeri 360° 'lik bir skalada da ibre ile gösterilmektedir. Cihazda güç kaynağı olarak 12 V'luk akü kullanılmıştır ve harcadığı maksimum akım değerinin 247 mA mertebesinde olduğu ölçülmüştür. Sistem mimarisi, bozulan komponent ve kartların kolaylıkla değiştirilebileceği modüler bir yapıda hazırlanmıştır.

Dedektör, ^{137}Cs kaynağı kullanılarak 0° ila 360° arasında 10° 'ar derece aralıklarla değişen açılardaki pozisyonlar ve 0 cm ila 50 cm arasında birer cm'lik adımlarla değişen farklı mesafeler için test edilmiştir. Toplamda 1800 adet açı ve 1800 adet γ sayım değeri ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda cihazın, radyasyon kaynağının bulunduğu yönü $\pm 22.5^\circ$ ölçüm aralığında %99,22 başarımla ölçebildiği tespit edilmiştir. Dedektör 9.761 μCi aktiviteli ve 59.54 keV enerjili ^{241}Am kaynağı, 3.7 MBq aktiviteli ve 661.6 keV enerjili ^{137}Cs kaynağı ve 1 μCi aktiviteli 1173 ve 1332 keV enerjiye sahip ^{60}Co kaynakları ile test edilmiştir. Yapılan ölçümlerde dedektörün bir gama sayıcı olarak çalışabildiği ve ters kare kanununa uygun olarak sayım aldığı görülmüştür.

PIN diyotlar için kullanılan ayarlanabilir bias gerilimi sayesinde sistem optimum bias gerilimi değerine ayarlanabilmiştir ve ileride farklı modellerde PIN diyotların da

entegre edilmesine imkan sağlanmıştır. Her kanalın kendine ait LNA kartında bulunan diskriminatör ve BLR seviye ayar trimpotları sayesinde gereken ayarlar yapılarak maksimum verimde ve hassasiyetle beraber , minimum gürültü seviyesinde ölçümler alınabilir.

Prob ünitesi sekiz farklı açıda yerleştirilmiş ve gelen iyonize edici ışınları yönlü şekilde algılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Algılayıcı olarak yarı iletken bir komponent olan BPW34 PIN diyotlar kullanılmıştır. GM sayıcıların ya da foto çoğaltıcıların çalışması için yüksek voltaj kaynağına, yüksek saflıkta germanyum dedektörlerin çalışması için ise soğutma sistemine ihtiyacı vardır. Bu sistemde bunlar gibi ilave sistemlere gerek duymaması, düşük güç tüketimi ve basit mimarisi ile bu cihazı daha pratik ve kullanışlı hale getirmektedir.

Cihazın probu benzer işlevlerdeki sistemlere göre boyut olarak çok daha küçük şekilde ve ortamdaki bir iyonize edici radyasyon kaynağının, dedektör dizilerinden eş zamanlı olarak maksimum üç tanesi tarafından dedekte edilebilecek biçimde tasarlanmıştır. Yapılan ölçümlerde dedektör dizilerinin arasındaki duvar kalınlıklarının da diğer taraflardan gelen γ radyasyonlarını soğurarak yönlü bir algılama sağlayacak yeterli kalınlığa sahip olduğu ve prob yuvasının beklenen işlevi gerçekleştirdiği görülmüştür. Probun flex hortum bağlantısı yardımıyla ölçümler esnasında probun yüksekliği değiştirilebilmiş, eğimi de ayarlanabilmiştir.

Cihazda ana işlemci olarak dedektördeki gama sayıcıların sayma işlemleri, algoritma hesaplamaları, sinyal işleme blokları, haberleşme gibi birçok işlemi eş zamanlı olarak işleyebilen, VHDL dilinde yazılmış bir yazılımın içerisinde çalıştığı, paralel veri işleme özelliğine sahip FPGA yongası kullanılarak tüm işlemler tek yonga üzerinde gerçekleştirilmiştir. VHDL yazılım algoritmasında, ölçümler esnasında karşılaşılan salınımların minimize edilmesi ve ölçümlerin doğru değerlere daha yakın çıkması için kayan pencere tekniği kullanılmıştır. Yazılıma dahil edilen erken sonuç verme özelliği sayesinde, bir dakikanın dolmasını beklenmesine gerek kalmadan, ilk açıldığı andan itibaren bir dakika süre dolana kadar normalize edilmiş *cpm* veya *cps* değerlerini hesaplayarak vermektedir. FPGA içerisinde ayrıca test amaçlı kullanılabilecek, farklı

frekanslarda dedektör sinyali üreten sekiz kanallı bir sinyal üreteç bloğu da bulunmaktadır.

Kapsamlı bir sistemin ilk adımı olan bu çalışmanın devamında sistemin geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla cihaz başlangıçta prototip tasarımı olması ve gerekli modifikasyonların yapılabilmesi için nispeten büyük tasarlanmıştır. Bu haliyle bile cihaz hala hafif, elde taşınabilir ve kompakt bir el dedektör ünitesidir. İlerleyen aşamalarda istenirse çok katlı kartlar ve yüzey montajlı elemanlar kullanılarak mevcut boyutların yarısından daha az ebatlarda ve daha hafif olarak üretilebilir. Düşük güç tüketimi, taşınabilir tasarımı ve hafifliği ile sahada ölçüm yapan saha araştırmacıları tarafından el dedektörü olarak kullanılabilen bir sistemdir. Yine sahada araştırma ve ölçüm amaçlı hava ve kara araçlarına , ölçüm robotlarına, insansız araçlara entegre edilerek iyonize edici radyasyon kaynağının tespitinde dedektör olarak kullanılabilen ve kaynağın pozisyonunun açısal değerini sayısal olarak robota ya da araca vererek doğrudan kaynağa yönlendirilebilmesi için yardımcı olabilecek bir sistemdir. Sistem güvenlik amaçlı olarak geçiş noktalarında kullanılabilir. Üzerinde bulunan seri veri portu kullanılarak veya bu porta kablosuz haberleşme modülü bağlanarak araştırmacıların yüksek radyasyona maruz kalma nedeniyle yaklaşmadığı veya uzun süre kalamadığı yüksek aktiviteli, riskli alanlarda kablolu ya da kablosuz şekilde uzaktan veri aktarımına imkan vermektedir. Önerilen dedektör ünitesi, her bir sensör dizisine gelen ışınları eş zamanlı olarak sayabilen çok sensörlü bir sistemdir. Sistemin açısal çözünürlüğü, ölçülen sayısal *cpm* değerlerine muhtelif hesaplama algoritmaları uygulanarak geliştirilebilir. Daha büyük algılama yüzeyi olan sintilatör kristali bağlanmış PIN diyotları kullanılarak dedektör sisteminin hem ölçüm menzili hem de sayım verimliliği geliştirilebilir. Sistemin çalışması GM gama sayma yöntemine dayanmaktadır ancak düşük gürültülü yükselteç bloğunun çıkışına uygun bir ADC eklendikten sonra sistem izotop tanımlayıcı olarak da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S. N. (2007). *Physics and engineering of radiation detection*. Academic Press.
- Akkoyun, S. (2013). A method for determination of gamma-ray direction in space. *Acta Astronautica*, 87, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.02.012>
- Alvarez-Romero, J. T., Khoury, H. J., Hazin, C. A., & Austerlitz, C. (1996). Angular response of a commercial photodiode in secondary standard fields of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta radiation. *Radiation protection dosimetry*, 66(1-4), 451-453. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031776>
- Anđelković, M. S., & Ristić, G. S. (2013). Feasibility study of a current mode gamma radiation dosimeter based on a commercial PIN photodiode and a custom made auto-ranging electrometer. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 28(1), 73-83. <https://doi.org/10.2298/NTRP1301073A>
- Ankara Üniversitesi (2020). Radyasyon Fizikinde Kullanılan Tanım ve Birimler. Web Sitesi: <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=10856> . Erişim Tarihi:12.01.2020
- Becker, E. M., & Farsoni, A. T. (2016). A multi-panel direction-sensitive gamma-ray detector for low-altitude radiological searches. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 836, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.011>
- Bor, D. (2001). Radyasyon Deteksiyon ve Ölçüm Yöntemleri Ders Notları, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- Bueno, C. C., Gonçalves, J. A. C., de Magalhaes, R. R., & Santos, M. D. S. (2004). Response of PIN diodes as room temperature photon detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 61(6), 1343-1347. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.064>
- Bukartas, A., Finck, R., Wallin, J., & Rääf, C. L. (2019). A Bayesian method to localize lost gamma sources. *Applied Radiation and Isotopes*, 145, 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.008>
- Chu, P. P. (2017). *FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx MicroBlaze MCS SoC*. John Wiley & Sons.
- Cremat Inc. (2022). Charge sensitive preamplifiers explained. Web Sitesi: <https://www.cremat.com/why-use-csps/> Erişim Tarihi: 31.01.2022
- Çuhadaroglu, B., & İlk, H. G. (2021). Design and implementation of a low cost, high performance ionizing radiation source detection and source direction finding system. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3 Physical Sciences and Engineering*, 63(2), 93-117

- Deleplanque, M. A., Lee, I. Y., Vetter, K., Schmid, G. J., Stephens, F. S., Clark, R. M., ... & Macchiavelli, A. O. (1999). GRETA: utilizing new concepts in γ -ray detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 430(2-3), 292-310. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00187-4)
- Detection Technology, Inc. (2000). Detection of X-ray and Gamma-ray Photons Using Silicon Diodes. Web Sitesi: [http://ew.lens.unifi.it/datasheets/X-ray_Si_Photo\[d6\].pdf](http://ew.lens.unifi.it/datasheets/X-ray_Si_Photo[d6].pdf) . Erişim Tarihi: 31.01.2022
- Dung, T. Q., Thanh, N. D., Tuyen, L. A., Son, L. T., & Phuc, P. T. (2009). Evaluation of a gamma technique for the assay of radioactive waste drums using two measurements from opposing directions. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1), 164-169. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.08.008>
- Emirhan, E. & Özben, C. Ş. (2022). PIN Photodiode Based X and γ Ray Detectors. Web Sitesi: <http://docplayer.net/56602283-Pin-photodiode-based-x-and-g-ray-detectors.html> . erişim Tarihi: 31.01.2022
- First Sensor AG (2018) First Sensor PIN PD Data Sheet Web Sitesi: https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/X100-7_THD_3001447_3001448.pdf Erişim tarihi: 25.02.2022
- FitzGerald, J. G. (2015). A rotating scatter mask for inexpensive gamma-ray imaging in orphan source search: Simulation results. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 62(1), 340-348. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2379332>
- Fujimoto, K. (2006). A simple gamma ray direction finder. *Health physics*, 91(1), 29-35. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000196113.49929.be>
- Fujimoto, K., & Noda, Y. (2005). Gamma ray direction finder. In *Radioactivity in the Environment* (Vol. 7, pp. 118-125). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07012-3](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07012-3)
- Gabrlik, P., & Lazna, T. (2018). Simulation of gamma radiation mapping using an unmanned aerial system. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6), 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.163>
- Gerl J., Korten W. (Eds.) (2001), AGATA technical proposal, GSI Report, Darmstadt.
- Hindi, M. M., Klynn, L., & Demroff, H. (2008, May). Gamma Vector Camera: A Gamma Ray and Neutron Directional Detector. In *2008 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security* (pp. 492-497). IEEE. <https://doi.org/10.1109/THS.2008.4534502>
- Holland, D. E., Bevins, J. E., Burggraf, L. W., & O'Day, B. E. (2018). Rotating scatter mask optimization for gamma source direction identification. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 901, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.05.037>
- Iniewski, K. (2011). *Electronics for radiation detection*. CRC Press.

- International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna (Austria) 1995. IAEA-TECDOC-804 Methods to identify and locate spent radiation sources. Web Sitesi: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_804_prn.pdf . Erişim Tarihi: 24.05.2021
- Intersil LLC, 2005. Web Sitesi: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/ca3130-ca3130a-datasheet> Erişim Tarihi: 14.02.2022
- Karafasoulis, K., Zachariadou, K., Seferlis, S., Kaissas, I., Lambropoulos, C., Loukas, D., & Potiriadis, C. (2011, December). Simulated Performance of Algorithms for the Localization of Radioactive Sources from a Position Sensitive Radiation Detecting System (COCAE). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1412, No. 1, pp. 377-384). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3665338>
- Keim, R. (2020). Understanding Photovoltaic and Photoconductive Modes of Photodiode Operation. Web Sitesi: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-photovoltaic-and-photoconductive-modes-of-photodiode-operation/> Erişim tarihi: 31.01.2022
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Kroeger, R. A., Gehrels, N., Johnson, W. N., Kurfess, J. D., Philips, B. P., & Tueller, J. (1999a). Charge spreading and position sensitivity in a segmented planar germanium detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 422(1-3), 206-210. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01095-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01095-X)
- Kroeger, R. A., Johnson III, W. N., Kinzer, R. L., Kurfess, J. D., Inderhees, S. E., Philips, B. F., ... & Graham, B. (1995, September). Spatial resolution and imaging of gamma rays with germanium strip detectors. In *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VI* (Vol. 2518, pp. 236-243). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.218379>
- Kroeger, R. A., Johnson, W. N., Kurfess, J. D., & Philips, B. F. (1999b). Gamma ray polarimetry using a position sensitive germanium detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 436(1-2), 165-169. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00615-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00615-4)
- Kurfess, J. D., Johnson, W. N., Kroeger, R. A., Philips, B. F., & Wulf, E. A. (2003). Development and applications of position-sensitive solid-state gamma ray detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 505(1-2), 256-264. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01064-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01064-7)
- Martin, J. E. (2013). Radyasyon ve radyasyondan korunma fiziği. (Çev. Tanır A.G., Bölükdemir M.H. ve Koç, K.). Palme Yayıncılık, Ankara. (Orjinal yayın tarihi, 2006)

- Milechina, L., & Cederwall, B. (2004). Performance considerations for γ -ray tracking detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 525(1-2), 208-212. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.03.047>
- National Semiconductor Corporation, 2001. Web Sitesi:
<http://www.mit.edu/~6.301/LF155.pdf> Erişim tarihi: 31.01.2022
- Olesen, R. J., O'Day, B. E., Holland, D. E., Burggraf, L. W., & Bevins, J. E. (2020). Characterization of novel rotating scatter mask designs for gamma direction identification. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 954, 161232. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.067>
- Özgen, S. (1992). *Radyasyon sayacı geliştirilmesi ve çeşitli ortamlarda radyasyon ölçümü*. Yüksek lisans tezi (basılmış). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü Anabilim Dalı, 44, Elazığ.
- Schemm, N., Balkır, S., Hoffman, M. W., & Bauer, M. (2011, October). A directional gamma ray detector using a single chip computational sensor. In *SENSORS, 2011 IEEE* (pp. 1760-1763). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127024>
- Shirakawa, Y. (2007). Development of a direction finding gamma-ray detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 263(1), 58-62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.056>
- Shirakawa, Y., Yamano, T., & Kobayashi, Y. (2009, November). Remote sensing of nuclear accidents using a direction finding detector. In *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* (pp. 1917-1922). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2009.5414850>
- Spieler, H. (2003). Front- End Electronics and Signal Processing. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 674, No. 1, pp. 76-100). American Institute of Physics.
- Tajima, H., Kamae, T., Madejski, G., Mitani, T., Nakazawa, K., Tanaka, T., ... & Tashiro, M. (2004, October). Design and performance of soft gamma-ray detector for NeXT mission. In *IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004*. (Vol. 1, pp. 314-321). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.862776>
- Vetter, K., Burks, M., & Mihailescu, L. (2004). Gamma-ray imaging with position-sensitive HPGe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 525(1-2), 322-327. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.03.087>
- Vishay Intertechnology Inc. (2021). Silicon PIN Photodiode BPW34, BPW34S. Websitesi: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>. Erişim Tarihi: 23.02.2021

Wahl, C. G., & He, Z. (2011). Gamma-ray point-source detection in unknown background using 3D-position-sensitive semiconductor detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(3), 605-613. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2113355>

