

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİBRİT RPC (RESISTIVE PLATE CHAMBER) DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ
VE TESTLERİ**

MEHMET TOSUN

**NÜKLEER ARAŞTIRMALAR VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
HIZLANDIRICI VE DEDEKTÖR TEKNOLOJİLERİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Tarih:31.08.2022

İmza:

Ad Soyad: Mehmet TOSUN

XXXXXX

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİBRİT RPC (RESISTIVE PLATE CHAMBER) DEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ VE TESTLERİ

Mehmet TOSUN

Ankara Üniversitesi

Nükleer Bilimler Enstitüsü

Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Hatice YILDIZ

Eş Danışman: Doç. Dr. Burak BİLKİ

RPC (Resistive Plate Chambers) dedektörleri büyük çaplı deneylerin özellikle müon sistemlerinin vazgeçilmez bileşenleridir ve günümüzde dünya genelinde aktif olarak büyük çaplı deneylerde kullanılmaktadırlar. RPC dedektörlerinin büyük çaplı deneylerde kullanılmasının temel nedenleri; üretimlerinin kolay olması, üretim maliyetlerinin düşük olması, yüksek verimliliğe sahip olmaları ve sinyal üretiminin ve sinyal okuma sisteminin basit olmasıdır. Günümüz RPC dedektörlerinde Freon (R134a) ve SF₆ (Sülfür hekzaflorür) gibi yüksek küresel ısınma faktörü içeren gazlar kullanılmaktadır. Bu gazların kullanımı yakın gelecekte ya kısıtlanacak ya da tamamen yasaklanacaktır. Mevcut gazlarla dedektör verimliliği % 90 üzerinde olan RPC dedektörlerinin bu özelliklerini sürdürebilmeleri için gaz türünde oluşacak olumsuzlukları telafi etmek gerekir. Dünya çapında alternatif RPC gazı üretimiyle ilgili pek çok araştırma grubu faaliyet yürütmektedir.

Bu tez kapsamında, RPC gaz türünde oluşacak olumsuzlukları telafi etmek amacıyla, elektron çoklamasının bir kısmını gaz katmandan doğrudan gaz katmanı içerisinde olan anot yüzey üzerine kaplanan ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemeye kaydırarak hibrit RPC üretilmiştir. RPC anot yüzeyi üzerine ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemeler kaplanarak, RPC performansını iyileştirme ve daha da ötesinde, yeni bir RPC türü – hibrit RPC – geliştirme prensibi ilk kez bu tez kapsamında yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Bu hibrit RPC dedektörleri ile yapılan test çalışmaları neticesinde üretilen hibrit RPC dedektörlerinin yüksek verimlilikte çalıştığı kanıtlanmıştır.

Eylül 2022, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: RPC, dirençli levha odaları, hibrit-RPC, elektron çoklama, sinyal okuma sistemi

ABSTRACT

Master's Thesis

PRODUCTION AND TESTING OF HYBRID RPC (RESISTIVE PLATE CHAMBER) DETECTORS

Mehmet TOSUN

Ankara University
Institute of Nuclear Sciences
Department of Nuclear Research and Technologies
Accelerator and Detector Technologies Master's Degree Program

Supervisor: Prof. Dr. Hatice YILDIZ
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak BİLİKİ

RPC (Resistive Plate Chambers) detectors are integral components of large-scale experiments, particularly the muon systems, and are actively used in the current large-scale experiments around the world. The main reasons for using RPC detectors in large-scale experiments are; simple production procedures, low production costs, high efficiency, and simple signal generation and readout. Gases with a high global warming factor such as Freon (R134a) and SF₆ (Sulfur hexafluoride) are used in today's RPC detectors. The use of these gases will either be restricted or banned completely in the near future. In order for RPC detectors, whose detector efficiency is over 90% with existing gases, to maintain these features, it is necessary to compensate for the negativities that will occur in the gas type. Many research groups are active in the production of alternative RPC gas mixtures around the world.

Within the scope of this thesis, hybrid RPC was produced by transferring part of the electron multiplication from the gas layer to a thin film of high secondary electron emission yield material applied on the anode plane which is directly inside the gas layer, in order to compensate for the negativities that will occur in the RPC gas type. By coating materials with high secondary electron multiplication ability on the RPC anode surface, the principle of improving RPC performance and furthermore, the development of a new type of RPC - hybrid RPC - has been validated for the first time in this thesis. As a result of the test studies with these hybrid RPC detectors, it has been proven that the developed hybrid RPC detectors work with high efficiency.

September 2022, 70 pages

Keywords: RPC, Resistive Plate Chambers, hybrid-RPC, electron multiplication, signal readout

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu bana öneren ve tez çalışmam boyunca benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, güler yüzleri ve destek veren sözleriyle çalışma azmimi destekleyen saygıdeğer Doç. Dr. Burak BİLKİ ve Prof. Dr. Hatice YILDIZ hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca eğitim ve öğretim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen değerli aileme de teşekkür etmeyi borç bilirim.

Bu tez çalışması Tübitak Lider Araştırmacılar Programı 118C224 No'lu Development of Novel Radiation Detector Technologies and Data Analysis Algorithms projesi kapsamında yapılmıştır.

Mehmet TOSUN

2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Radyasyon ve Radyasyon Türleri.....	4
2.2 Parçacıkların Genel Özellikleri.....	5
2.2.1 Fotonlar	6
2.2.1.1 Fotonların özellikleri.....	7
2.2.2 Elektronlar.....	7
2.2.2.1 Elektronların özellikleri	8
2.2.3 Pozitronlar	8
2.2.3.1 Pozitronların özellikleri.....	8
2.2.4 Müonlar.....	9
2.2.4.1 Müonların özellikleri.....	9
2.3 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi ve Temel Kavramlar.....	9
2.3.1 Ters kare kanunu	10
2.3.2 Tesir kesiti.....	10
2.3.3 Ortalama serbest yol	11
2.4 Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri.....	12
2.4.1 Dedektör hassasiyeti.....	12
2.4.2 Dedektör yanıtı	13
2.4.3 Dedektörün enerji çözünürlüğü.....	14
2.4.4 Dedektör verimliliği	15
2.4.5 Dedektörün tepki süresi ve ölü zaman (Dead time)	16
2.5 Gazlı Dedektörler	18

2.5.1 Gazlı dedektörlerin gelişimi	18
2.5.2 Gazlı dedektörlerin çalışma prensipleri.....	18
2.5.3 Gazlı dedektörlerde uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki.....	20
2.5.4 Gazlı dedektör türleri	22
2.5.4.1 İyonizasyon odaları (Ion chambers).....	22
2.5.4.2 Orantılı sayaçlar (Proportional counters)	23
2.5.4.3 Geiger-Müller dedektörü (GM)	24
2.6 Dirençli Levha Oda-RPC (Resistive Plate Chamber) Dedektörleri.....	25
2.6.1 RPC dedektörlerinin genel özellikleri	26
2.6.2 RPC dedektörlerinin çalışma mekanizması	26
2.6.2.1 RPC dedektörlerinde elektron-iyon çiftlerinin üretimi.....	30
2.6.2.2 RPC dedektörlerinin çalışma modları	32
2.6.2.3 RPC dedektörlerinin kullanıldığı yerler ve önemi.....	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1 RPC Üretiminde Gerekli Olan Malzemeler	35
3.1.1 Cam elektrot üretim işlemi.....	35
3.1.2 RPC çerçevelerinin üretimi.....	44
3.1.3 RPC sinyal okuma kartlarının üretimi	46
3.1.4 RPC’de kullanılan gazlar	47
3.1.5 DC (Direct Current) güç kaynağı	47
3.1.6 Vakum odası ve saçırma metodu.....	48
3.1.7 Saçırma materyalleri	52
3.2 RPC Dedektörlerinin Üretimi.....	55
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	58
4.1 Üretilen RPC Dedektörlerinin Testleri	58
4.1.1 Gaz testleri	58
4.1.2 Yüksek voltaj testleri	58
4.1.3 Kozmik müon testleri.....	59
4.1.4 Işın testleri	62
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	65
KAYNAKLAR	67

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

RPC	Resistive Plate Chamber-Dirençli Levha Odaları
LEP	Large Electron-Positron-Büyük Elektron-Pozitron
PET	Pozitron Emisyon Tomografi
FWHM	Full Width Half Maximum-Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik
GM	Geiger-Müller
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi
ATLAS	A Large Toroidal Lhc Apparatus
CMS	Compact Muon Solenoid
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
FERMILAB	Fermi National Accelerator Laboratory
LNGS	Laboratori Nazionali del Gran Sasso
KEK	Kō Enerugi Kasokuki Kenkyū Kikō
DHCAL	Dijital Hadron Kalorimetresi
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
DC	Doğru Akım
SHV	Safe High Voltage
MCX	Mikro Koaksiyel Konnektor
RF	Radyo Frekans
BrK	Birim Kare
Barn	Tesir kesitinin standart birimi (cm²)
cST	centi Stokes
MRPC	MultigapRPC-Çok gaz katmanlı dirençli levha odaları
FR4	Flame Retardant
h	Planck sabiti
γ	Gama ışını
ν	Foton frekansı
λ	Dalga boyu
P_γ	Fotonun momentumu
C	Coulomb-Elektrik yük birimi

c	Işık hızı
Φ	Akı
$d\Omega$	Katı açısı
dN	Saçılan parçacıkların ortalama sayısı
σ	Tesir kesiti
P_n	Ortamın yoğunluğunu
R	Çözünürlük
E_0	Spektrumda gözlenen tepe noktasının enerjisi
E_{top}	Toplam verim ya da mutlak verim
$E_{içsel}$	İçsel verim
Sr	Steradyan
τ	Dedektörün ölü zamanı
k	Boltzmann sabiti
I_e	İyonizasyon enerjisi
$\frac{dE}{dx}$	Durdurma gücü
n_p	Birinci iyonlaşma verimi
W	Bir parçacığın, bir gazda elektron-iyon çifti oluşturmak için gereken ortalama enerjisi
n_t	Toplam iyonlaşma enerjisi
mA	MiliAmper
ms	Milisaniye
μm	Mikrometre
CO_2	Karbondiyoksit
$mbar$	MiliBar
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
$M\Omega$	Mega Ohm
cc/dak	Santimetre küp/dakika
kV	kiloVolt
cm^2	Santimetre Kare
mg	Miligram

Al_2O_3	Alüminyumoksit
Sf_6	Sülfür hekzaflorür
$R134a - \text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$	Tetrafloretan
$iso - \text{C}_4\text{H}_{10}$	İzobütan
TiO_2	Titanyum Dioksit
GeV	Giga elektron Volt
MeV	Mega elektron Volt



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik Spektrum (Aydın 2015).....	5
Şekil 2.2 a) İyi ve kötü çözünürlüğe sahip dedektörler için dedektör tepkisi, b) Enerji çözünürlüğünün FWHM ile tanımlanması (Knoll 1999).	14
Şekil 2.3 İzotropik kaynaktan yayımlanan ve dedektöre ulaşan fotonların oluşturduğu katı açısı (Akkurt vd. 2015).....	15
Şekil 2.4 Ölü zamanın felçli ve felçli olmayan modellerinin karşılaştırılması (Knoll 1999).	17
Şekil 2.5 Tipik bir gazlı dedektörün şematik yapısı (http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_965.html , 2022).....	19
Şekil 2.6 Tipik bir gaz dolu dedektör: (a) Devrede üretilen doğru akım ölçülür; (b) Bireysel sinyaller ölçülür (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)..	19
Şekil 2.7 Uygulanan HV ile toplanan yük arasındaki ilişkinin incelenmesi için kurulan deney şeması (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)..	20
Şekil 2.8 Dedektöre uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).....	21
Şekil 2.9 Bir iyon odasının temel bileşenleri ve akım-voltaj özellikleri (https://www.astro.rug.nl/~peletier/Bas%20Det%20Tech%202009%20gas%20detectors.pdf ,2022).	23
Şekil 2.10 Orantılı Sayacın temel bileşenleri (Hemn ve Ari 2014).	23
Şekil 2.11 Geiger-Müller dedektörünün şematik diyagramı (Knoll 1999).	24
Şekil 2.12 Geiger-Müller dedektörünün dışsal olarak sönmelenmesi için kullanılan devre (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).....	25
Şekil 2.13 Çok kanallı RPC sinyal okuma kartı a) ön yüz, b) arka yüz (Adams vd 2016)	27
Şekil 2.14 Çift camlı RPC'nin şematik yapısı (ölçeksiz) (Bilki vd. 2009a)	28
Şekil 2.15 Tek camlı RPC'nin şematik yapısı (Bilki vd. 2015).....	29
Şekil 2.16 Çift gaz boşluklu RPC tasarımı (a), Çoklu gaz boşluklu RPC tasarımı (b) (https://www.nevis.columbia.edu/~chi/rpc/cms-rpc-tech-note.pdf , 2022).....	30
Şekil 2.17 Çılgı (Avalanche) modunun şematik gösterimi (https://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge ,2022)	32

Şekil 2.18 Streamer modun şematik yapısı (Lippmann ve Riegler 2003)	33
Şekil 3.1 Elektrot yapımında kullanılan aday boyalar	36
Şekil 3.2 Cam elektrot üretmek için kullanılan hava tabancası ve camlara uygulanan aday boyalar.....	36
Şekil 3.3 Yüzey ölçüm cihazı.....	37
Şekil 3.4 Cam elektrot üretme çalışmaları.....	38
Şekil 3.5 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	39
Şekil 3.6 Amsterdam ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	39
Şekil 3.7 Amsterdam markalı cam numunelerde oluşan delikler.....	40
Şekil 3.8 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan ikinci versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	41
Şekil 3.9 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan üçüncü versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	41
Şekil 3.10 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan dördüncü versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	42
Şekil 3.11 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan son versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri.....	43
Şekil 3.12 RPC çerçevesinin tasarım parametreleri	44
Şekil 3.13 Tek parça olarak 3 boyutlu yazıcıdan çıkan RPC çerçevesi	45
Şekil 3.14 İki parça olarak üretilen RPC çerçevesi.....	45
Şekil 3.15 İki parçadan oluşan RPC çerçevesinin birleştirilmesi ve kullanıma hazır hale getirilmesi	45
Şekil 3.16 Tek kanallı sinyal okuma kartında kullanılan malzemeler	46
Şekil 3.17 Tek kanallı sinyal okuma kartının bitmiş hali	46
Şekil 3.18 CAEN markalı DC güç kaynağı	48
Şekil 3.19 50 bin voltluk doğru akım (DC) gerilim kaynağı	48
Şekil 3.20 Magnetron püskürtme işleminin şematik yapısı (Sönmezoğlu vd. 2012).....	49
Şekil 3.21 Kaplama yapılırken kullanılan soğutma cihazı.....	49

Şekil 3.22 Laboratuvarda kullanılan vakum odası ve magnetron püskürtme makinası.	50
Şekil 3.23 Kaplama esnasında oluşan plazma görüntüsü.....	51
Şekil 3.24 Doğru akım (DC) voltaj kaynağı ve RF güç kaynağı ile bakır (Cu) kaplanan cam malzemeler.....	51
Şekil 3.25 RF güç kaynağı ile alüminyum kaplanan cam malzeme	52
Şekil 3.26 Kaplama malzemeleri	53
Şekil 3.27 Al ₂ O ₃ ile kaplanmış sinyal okuma kartı.....	53
Şekil 3.28 Hibrit RPC üretmek amacıyla kullanılan toz Titanyum Dioksit (TiO ₂)	54
Şekil 3.29 Temiz RPC sinyal kartı (Solda) ve Titanyum Dioksit (TiO ₂) kaplanmış RPC sinyal katı (Sağda)	54
Şekil 3.30 RPC elektrotlarının birleştirilmesini ve gaz sızdırmazlığını sağlamak için kullanılan çift bileşenli epoksi.....	55
Şekil 3.31 Standart çift camlı RPC dedektörü	55
Şekil 3.32 Standart çift camlı RPC sinyal okuma kartı.....	56
Şekil 3.33 Sade tek camlı RPC dedektörü	57
Şekil 4.1 RPC gaz sızdırmazlık testi sistemi fotoğrafları. RPC gaz sızdırmazlık testi sistemi fotoğrafları. a) Yüksek yoğunluklu silikon yağı, b) baloncuk sistemi ve c) test istasyonu fotoğrafları.	58
Şekil 4.2 Standart çift camlı RPC dedektörü	59
Şekil 4.3 Bir sintilatör ve fotoçoklayıcı tüpten oluşan tetikleme sayacı.....	60
Şekil 4.4 Bir sintilatör ve silikon fotoçoklayıcıdan oluşan tetikleme sayacı.....	60
Şekil 4.5 Kozmik müon test istasyonun şematik yapısı.....	61
Şekil 4.6 Kozmik müon test istasyon kurulumu.....	61
Şekil 4.7 TiO ₂ _v1'in 7.7 kV (sol) ve 7.8 kV (sağ) ile çalıştırılırken kaydedilen kozmik müon olaylarının dalga formlarına birer örnek.....	62
Şekil 4.8 Fermilab Işın Testi Tesisi'ndeki deney düzeneğinin fotoğrafları.....	62
Şekil 4.9 Fermilab ışın testinde test edilen 7 RPC dedektörü için verimlilik – yüksek voltaj grafiği.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Gazlı dedektörlerde kullanılan gazlar ve bunların W değerleri (Ahmed 2007).	31
Çizelge 2.2 Alt dedektör olarak RPC'lerin kullanıldığı bazı büyük deneyler	34
Çizelge 3.1 Kullanılacak aday boyaların yüzey dirençleri.....	37



1. GİRİŞ

Radyasyon kelimesinin hayatımıza girdiği tarihten günümüze kadar atomaltı parçacık dünyası ile ilgili birçok gelişme yaşanmıştır. Özellikle iyonlaştırıcı radyasyon türlerini oluşturan X-Işınları, γ -Işınları, elektronlar, pozitronlar, protonlar, alfa parçacıkları, nötronlar, ağır iyonlar ve müonlar bu tarihi gelişimin bir parçası olarak ortaya çıkmıştır.

Bu parçacıkların sahip oldukları kütle, elektrik yükü ve enerji gibi özellikleri tespit etmek için birçok bilim insanı ve araştırma grubu çeşitli bilimsel araştırmalar yapmıştır. Örneğin, hem proton hem de nötronların, kuark adı verilen 3 temel parçacıktan oluştuğu bu bilimsel çalışmalar neticesinde ortaya çıkmıştır.

Normal şartlar altında bu parçacıklar gözlemlenemediğinden bu parçacıkları saptamak veya ölçmek için, bir malzeme ile etkileşime sokmak ve ardından malzemede ortaya çıkan değişiklikleri incelemek gerekir. Örneğin, X-Işını fotonları bir nesneden geçtikten sonra bir fotoğraf plakasına çarptığında plakayı boyar. Fotoğraf plakasının buğulandığı yerde, nesnenin iki boyutlu bir görüntüsü oluşur ve bu şekilde fotoğraf plakası, konuma duyarlı bir dedektör görevi görür.

Farklar amaçlar ve çalışmalar doğrultusunda birçok dedektör türü geliştirilmiştir. Geliştirilen tüm bu dedektör türleri için geçerli olan dedektör verimliliği, enerji çözünürlüğü, duyarlılık ve ölü zaman gibi genel dedektör özellikleri mevcuttur. Geliştirilen tüm dedektörlerin yüksek verimliliğe, yüksek enerji çözünürlüğüne, yüksek duyarlılığa ve düşük ölü zamana sahip olması beklenilir.

Bu tezin konusunu oluşturan RPC dedektörleri gazlı dedektörler sınıfına ait bir dedektör türü olduğu için, gazlı dedektörlerin çalışma mekanizmasını bilmek gerekir.

Yüksek enerji fiziğinde parçacık türünün belirlenmesi ve takibi için kullanılan dedektör türlerinden biri de gazlı dedektörlerdir. Bir parçacığın belli bir hacimden geçişini elektrik sinyaline dönüştüren ilk dedektör tipi H. Geiger ve E. Rutherford tarafından 1908'de tasarlanmıştır.

Gaz dolu dedektörler, iyonlaştırıcı radyasyonun bir gazdan geçerken ürettiği iyonlaşmayı kullanarak çalışır. Tipik olarak gazlı dedektörler, belirli bir elektrik potansiyelinin

uygulandığı iki elektrottan ve bu elektrotlar arasında gaz geçirildiği bir mekanizmadan oluşur. Elektrotlar arasındaki boşluktan geçen iyonlaştırıcı radyasyon, elektron-iyon çiftleri oluşturarak enerjisinin bir kısmını veya tamamını dağıtır. Hem elektronlar hem de iyonlar, elektrik alanının etkisi altında hareket eden yük taşıyıcılarıdır. Hareketleri elektrotlar üzerinde ölçülebilen bir akım indükler. Uygun elektronik araçlar aracılığıyla radyasyon tarafından üretilen yük bir sinyale dönüştürülür ve böylece parçacıklar ayrı ayrı sayılır.

Gazlı dedektörlerde uygulanan voltaj ile toplanan yüke bağlı olarak İyonizasyon Odaları (Ion Chambers), Orantılı Sayaçlar (Proportional Counters) ve Geiger-Müller dedektör türleri bulunur.

Yüksek enerji fiziğinde kullanılan dirençli levha odaları (RPC) ilk olarak 1981 yılında R. Santanico ve R.Cardarelli tarafından geliştirilmiştir. Tipik olarak dirençli levha odaları birbirine paralel bakalit veya camdan yapılmış iki dirençli levhadan oluşur.

RPC dedektörleri gazlı dedektörler sınıfına ait dedektör çeşidi olduklarından temel çalışma prensibi iyonizasyon ilkesine dayanmaktadır. RPC dedektörleri, birbirine paralel katot ve anot yüzeyler arasında elektrik alan uygulayarak, bu katmanlar arasındaki gaz içerisinde iyonize edici bir parçacık geçtiğinde oluşan elektron-iyon çiftinin elektronlarını anoda doğru hızlandırma ve anot üzerinde önce indüklenen, sonra toplanan yükü okuma prensibi üzerine kurulu parçacık dedektörleridir.

Mevcut RPC dedektörlerinde Freon (R134a) ve SF₆ (Sülfür hekzaflorür) gibi yüksek küresel ısınma faktörü içeren gazlar kullanılmaktadır. Bu gazların kullanımı yakın gelecekte ya kısıtlanacak ya da tamamen yasaklanacaktır. Mevcut gazlarla dedektör verimliliği % 90'ın üzerinde olan RPC dedektörlerinin bu özelliklerini sürdürebilmeleri için gaz türünde oluşacak olumsuzlukları telafi etmek gerekir.

Bu tez kapsamında, RPC gaz türünde oluşacak olumsuzlukları telafi etmek amacıyla, elektron çoklamasının bir kısmını gaz katmandan doğrudan gaz katmanı içerisinde olan anot yüzey üzerine kaplanan ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemeye kaydırarak hibrit RPC üretilmiştir.

Bu tezde RPC üretmek için gerekli olan tüm materyal ve yöntem basamakları açıklanmıştır. Bu kapsamda öncelikle standart çift camlı RPC ve tek camlı RPC dedektörleri üretilmiştir. Daha sonra anot yüzey kaplamaları 500 nm ve 350 nm kalınlıkta Al_2O_3 (Alüminyum Oksit); ve 1 mg/cm^2 , 0.5 mg/cm^2 ve 0.15 mg/cm^2 yüzey yoğunluklu TiO_2 (Titanyum Dioksit) hibrit-RPC dedektörleri üretilmiştir.

Böylelikle RPC anot yüzeyi üzerine ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemeler kaplanarak, RPC performansını iyileştirme ve daha da ötesinde, yeni bir RPC türü – hibrit RPC – geliştirme prensibi ilk kez bu tez kapsamında yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Bu hibrit RPC dedektörleri ile yapılan test çalışmaları neticesinde üretilen hibrit RPC dedektörlerinin yüksek verimlilikte çalıştığı kanıtlanmıştır.

Tezin 2. bölümünde kuramsal temeller, 3. bölümünde materyal ve yöntem, 4. bölümünde araştırma bulguları, 5. bölümünde ise sonuç ve tartışma sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

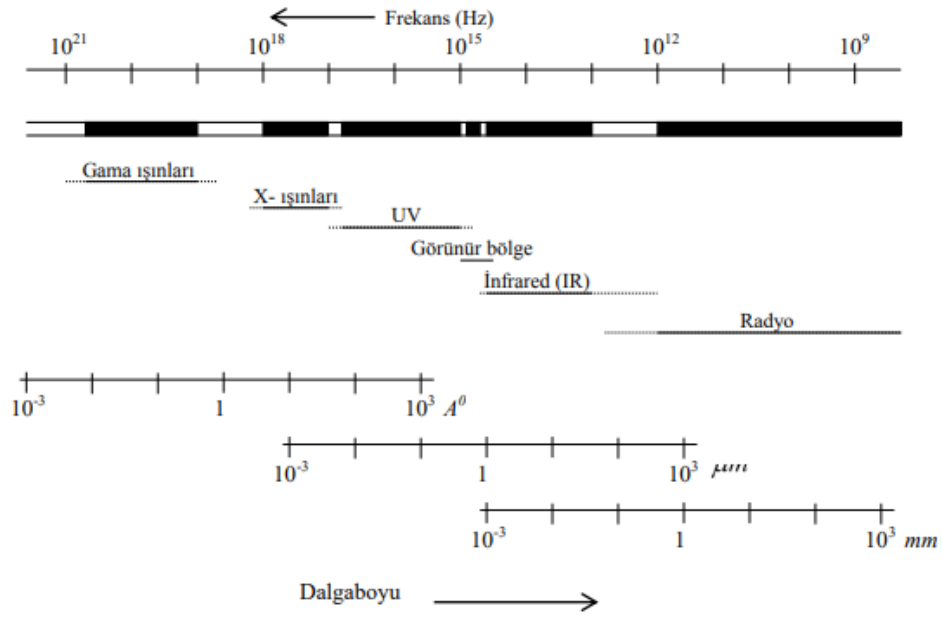
2.1 Radyasyon ve Radyasyon Türleri

Radyasyon kelimesi 1900 yılına kadar elektromanyetik dalgaları tanımlamak için kullanılmıştır. 21. yüzyılın başlarında ise elektronlar, X-Işınları ve doğal radyoaktivite keşfedilince bu ifadeler de radyasyon terimi altında toplanmıştır. Sonrasında keşfedilen radyasyon türleri, dalga olarak ele alınan elektromanyetik radyasyonun aksine, parçacıkların özelliklerini de göstermiştir. 1920'lere gelindiğinde ise, De Broglie maddenin ikililiği (dalga ve parçacık) teorisini geliştirdi. Bu teori kısa süre sonra elektron kırınım deneyleriyle ispatlanmıştır ve parçacıklar ile dalgalar arasındaki ayrım önemli olmaktan çıkmıştır. Günümüzde radyasyon, tüm elektromanyetik spektrumun yanı sıra keşfedilen tüm atomik ve atom altı parçacıkların ışımlarını da temsil eder (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

Radyasyon iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki farklı şekilde gruplandırılır. İyonlaştırma kelimesi, radyasyonun geçtiği ortamın bir atomunu veya molekülünü iyonize etme yeteneğini ifade eder (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, dalga boyu (λ) yaklaşık 100 nm veya daha uzun olan dalga boyunu temsil eder (Şekil 2.1). Elektromanyetik spektrumun bu kısmı radyo dalgalarını, mikrodalgaları, görünür ışığı ($\lambda = 770 - 390$ nm) ve morötesi ışığı ($\lambda = 390 - 100$ nm) içerir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

İyonlaştırıcı radyasyon ise, elektromanyetik spektrumun geri kalanını (X-Işınları, $\lambda \approx 0.01 - 10$ nm) ve dalga boyu X-Işınlardan daha kısa olan γ -Işınları içerir. Ayrıca elektronlar, pozitronlar, protonlar, alfa parçacıkları, nötronlar, ağır iyonlar ve mezonlar gibi tüm atomik ve atom altı parçacıkları içerir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).



Şekil 2.1 Elektromanyetik Spektrum (Aydın 2015)

2.2 Parçacıkların Genel Özellikleri

Parçacıkların atomlarla etkileşimi, hem gelen parçacıkların hem de hedef atomların özelliklerine bağlı olan kuantum mekaniksel süreçler tarafından yönetilir. Bu özellikler kütle, elektrik yükü ve enerjiyi içerir. Genelde, hedef atomların gelen parçacıklara göre hareketsiz olduğu kabul edilir. Bunun nedeni etkileşim gerçekleştikten sonra oluşan parçacıkların özelliklerini tahmin etmek için matematiksel manipülasyonların kullanılmasıdır. Çünkü bu manipülasyonlar matematiksel işlemleri oldukça basitleştirmektedir (Knoll 1999).

Bir parçacığın bütün özelliklerinin anlaşılması için iç yapısının detaylı bilinmesine gerek yoktur (normal radyasyon algılamasında gerekli olmayan bir nötronun manyetik momenti gibi özellikler hariç). Ancak tartışmanın tamamlanması için, temel parçacıklar hakkındaki mevcut bilgilere göz atarsak; temel düzeyde, farklı kombinasyonlarda daha ağır ve kararlı parçacıklar oluşturan yalnızca birkaç parçacık vardır. Örneğin, hem proton hem de nötron, kuark adı verilen 3 temel parçacıktan oluşur. Bu kuarkların doğası, onun bir proton mu yoksa bir nötron mu olduğunu belirler. Parçacık fiziğinde, 6 tür kuark ve lepton

adı verilen başka temel parçacık türü olduğunu ifade eden Standart Model, son derece başarılı bir modeldir. Temel parçacıklar, herhangi bir iç yapıya sahip oldukları günümüz bilgileri ışığında bilinmeyen ve bu nedenle temel parçacıklar olarak isimlendirilen parçacıklardır. Standart Modelde 6 lepton vardır: elektron, tau, müon ve bunların ilgili nötrinoları. Bu parçacıkların başka parçacıklardan oluştuğu bilinmemekle birlikte, iç yapıları olabileceğini düşündüren teorik modeller ve ampirik kanıtlar vardır (Ahmed 2007).

Farklı parçacıkların etkileşim mekanizmalarını anlamak için öncelikle bu parçacıkların özelliklerinin bilinmesi gerekir. Aşağıda radyasyon algılama alanıyla ilgili olarak bazı önemli parçacıklar incelenecek ve özellikleri tartışılacaktır (Ahmed 2007).

2.2.1 Fotonlar

Foton, kuantum elektromanyetik enerjiyi temsil eder ve parçacık fiziğinin Standart Modelinde temel bir parçacık olarak ele alınır. Bu modelde fotonun durgun kütlesi olmadığı varsayılır (Knoll 1999).

Fotonlar yalnızca görünür ışığa karşılık gelmez. Aslında görünür ışık, tam enerji spektrumunun çok dar bir bölgesini kapsar. Ayrıca, görünür ışık olarak gördüğümüz şeyin aslında tek tek fotonlardan oluştuğu düşünülmez, daha çok bir dizi fotonun üst üste binmesi şeklinde olduğu düşünülür. Fotonlar her türlü elektromanyetik etkileşimde yer alırlar. Bugünlerde bağımlı olduğumuz tüm kablosuz iletişim, büyük ölçüde mikrodalga ve radyo frekansı bölgelerindeki fotonlarla mümkündür. Spektrumun görünür ışık bölgesinde olmayan fotonları üretmenin birçok yolu vardır. Örneğin, yüklü bir parçacık hareket ettiğinde (bir teldeki değişen akım gibi), çevresinde uzayda yayılan elektromanyetik dalgalar oluşturur. Bu dalgalar, elektromanyetik alandaki uyarılar olarak kabul edilir ve bu uyarılara foton denir (Knoll 1999).

Bir fotonun taşıdığı enerji, etkileşime girdiği diğer parçacıklar tarafından çeşitli şekillerde soğurulabilir. Ayrıca, diğer parçacıklar gibi, bir foton da diğer parçacıklardan saçılabilir ve hatta yerçekimi etkisinde kalabilir. Radyasyona maruz kalma ve biyolojik hasar açısından genellikle γ -Işınları, X-Işınları ve ultraviyole ışınları gibi yüksek enerjili fotonlarla ilgilenilmektedir. Enerjileri yüksek olan bu fotonlar, görünür ışık gibi düşük

enerjili fotonlardan daha derine nüfuz edebilir ve daha fazla hasara neden olabilir (Ahmed 2007).

2.2.1.1 Fotonların özellikleri

Fotonların durgun kütlesi ve elektriksel yükü sıfırdır. Enerjileri ve momentumları sırasıyla eşitlik 2.1 ve eşitlik 2.2’ de gösterilmiştir.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.2)$$

şeklindedir. Örnek olarak görünür ışık, X-Işınları, γ -Işınları verilebilir.

Fotonların diğer bir önemli özelliği ise, durgun kütleleri olmamasına rağmen momentumlarının olmasıdır. Enerjisi E, frekansı ν ve dalga boyu λ olan bir fotonun momentumu (p_γ) eşitlik 2.3’de verilmiştir (Ahmed 2007).

$$p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2.3)$$

2.2.2 Elektronlar

Elektronlar (e^- veya β^- sembolleri ile gösterilirler), negatif elektrik yüküne sahip atomaltı temel parçacıklardır. Elektronlar, lepton parçacık ailesine ait olup günümüz bilgiler ışığında bilinen bir alt yapıları olmadığından temel parçacıklar olarak düşünülürler. Kütleleri, protonlardan yaklaşık olarak 1836 kat daha hafiftir. Elektronun kuantum mekaniksel özellikleri arasında, indirgenmiş Planck sabiti (h) biriminde ifade edilen, yarım tam sayı değerinde iç açıl momentumu (spini) vardır. Fermiyon olmalarından ötürü, Pauli dışarlama ilkesine göre iki elektron aynı kuantum durumunda bulunamaz. Temel parçacıkların tamamı gibi elektronlar da hem parçacık hem dalga özelliklerini gösterirler ve bu sayede diğer parçacıklarla çarpışabilir ya da kırınabilirler (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

2.2.2.1 Elektronların özellikleri

Elektronların durgun kütlesi $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$, elektriksel yükü ise $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ değerindedir.

Elektronlar; elektronik, kaynak, katot ışını tüpleri, elektron mikroskopları, radyoterapi, lazerler, gaz iyonlaştırma sayaçları ve parçacık hızlandırıcıları gibi alanlarda kullanılırlar. Ayrıca elektronlar, radyasyona uğramaları veya hızlandırılmaları durumlarında enerjiyi foton şeklinde emerler. Laboratuvar aletleri ile elektronların tek tek ya da elektromanyetik alanlar kullanılarak elektron plazmasından yakalanması ve özel teleskoplar aracılığıyla dış uzaydaki elektron plazmasının saptanması da mümkündür (Knoll 1999).

2.2.3 Pozitronlar

Pozitron, elektronun anti-parçacıdır. Pozitif olan elektrik yükünün polaritesi dışında bir elektronun tüm özelliklerine sahiptir. Bir pozitron, pozitif birim elektrik yüküne sahip bir elektron olarak düşünülebilir. Bir elektron ve bir pozitron birbirine yaklaştığında birbirlerini yok ederler ve eşitlik 2.4'de görüldüğü gibi foton şeklinde enerji üretirler (Ahmed 2007).

$$e^- + e^+ = 2\gamma \quad (2.4)$$

2.2.3.1 Pozitronların özellikleri

Pozitronların durgun kütlesi $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ ve elektriksel yükü $+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ değerindedir.

Pozitronlar çeşitli alanlarda etkili kullanılırlar. Örneğin pozitronlar CERN'deki LEP (Large Electron-Positron) gibi parçacık hızlandırıcılarda yapılan deneylerde geniş kapsamlı keşiflere öncülük etmişlerdir. Bunun yanında tıbbi görüntülemelerde ve Pozitron Emisyon Tomografisinde de (PET) pozitronlar kullanılır (Knoll 1999).

2.2.4 Müonlar

Müon, Parçacık Fiziğinin Standart Modeline göre temel parçacıklardan biridir ve Lepton olarak sınıflandırılır. Müonlar, elektronlarla aynı yüke sahip olmalarına rağmen elektronlardan yaklaşık olarak 200 kat daha ağırdırlar. Deniz seviyesinde, saniyede santimetre kare başına yaklaşık 1 müonluk bir akı ile, uzaydan Dünya'nın atmosferine giren en bol yüklü parçacıklardır. Burada müonların ana üretim mekanizması, birincil kozmik ışınların üst atmosferdeki malzeme ile etkileşimidir. Bu müonların ortalama enerjisi yaklaşık 4 GeV'dir. Atmosferden geçerken g/cm^2 enerji başına yaklaşık 2 MeV kaybederler, bu da orjinal enerjilerinin yaklaşık 6 GeV olduğunu gösterir. Ayrıca laboratuvarlarda yüksek enerjili protonlar bir hedefe (grafit gibi) çarptırılarak da müonlar üretilebilir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

2.2.4.1 Müonların özellikleri

Müonların durgun kütlesi $1.883 \times 10^{-28} \text{ kg} = 105.66 \text{ MeV}/c^2$, elektriksel yükü $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ve yarı ömrü ise $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 'dir (Ahmed 2007).

2.3 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi ve Temel Kavramlar

Radyasyonu saptamak veya ölçmek için, bir malzeme ile etkileşime sokturulmalı ve ardından malzemede ortaya çıkan değişiklik incelenmelidir. Mevcut duruma göre, radyasyonu bir ölçüm cihazı ile etkileşime sokmadan algılamak veya özelliklerini ölçmek mümkün değildir. Bu her türlü ölçüm için evrensel bir kural olarak ifade edilebilir. Beş duyu organı dahi bu kurala tabiidir. Örneğin gözler, nesnelerden yansıdıktan sonra retinadaki hücrelere çarpan fotonları algılar. Bu tür etkileşimler olmadan hiçbir şey görülemez. Aynısı, ölçülebilir bir sinyal üretmek için bir tür radyasyon etkileşimi kullanan radyasyon dedektörleri için de geçerlidir. Örneğin, X-Işını fotonları bir nesneden geçtikten sonra bir fotoğraf plakasına çarptığında plakayı boyar. Fotoğraf plakasının buğulandığı yerde, nesnenin iki boyutlu bir görüntüsü oluşur ve bu şekilde fotoğraf plakası, konuma duyarlı bir dedektör görevi görür. Böyle bir radyasyon algılama yöntemi hala yaygın olarak kullanılmasına rağmen, radyasyonun enerjisi ve akısı gibi özelliklerini ölçmek için çok hassas değildir. Elektronik dedektörler, radyasyonu tespit etmek ve ölçmek için çok iyi bir alternatiftir. Elektronik dedektör, içinden radyasyon geçtiğinde

elektrik sinyali üretmek için gaz gibi bir algılama ortamı kullanır. Bu elektrik sinyali, radyasyonu ve özelliklerini karakterize etmek için kullanılabilir. Bu nedenle, bir dedektör inşa etmede gerekli adım, algılama ortamında radyasyonun etkileşim mekanizmalarının anlaşılmasıdır (Knoll 1999).

2.3.1 Ters kare kanunu

Radyasyonun gücü, genellikle birim zamanda birim alandan geçen parçacıkların sayısı olarak tanımlanır. Kaynağın türünden bağımsız olarak, bu akı (Φ) kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Akıdaki bu azalma, kaynağın ve radyasyonun tipine bağlıdır. Örneğin, yüksek oranda hizalanmış lazer ışığı, mesafe ile akıda fazla bozulmaya uğramaz. Öte yandan, radyoaktif kaynaklardan gelen akı, uzaklık arttıkça hızla azalır. Yalnızca geometrik durumlara dayanan ters kare yasası bu değişikliği karakterize eder. Radyasyon akısı, nokta kaynaktan uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğu için eşitlik 2.5’de gösterildiği üzere azalmaktadır.

$$\Phi \propto \frac{1}{r^2} \quad (2.5)$$

burada r , kaynak ile akının hesaplanacağı nokta arasındaki mesafe olarak verilir (Ahmed 2007).

2.3.2 Tesir kesiti

Parçacık etkileşimleri kuantum mekaniği tarafından başarılı bir şekilde ifade edilmiştir. Bununla birlikte, bazen anlaşılması ve görselleştirilmesi zor olan fiziksel ve matematiksel kısımları da vardır. Dalga-parçacık ikiliği böyle bir kavramdır. Bir diğer önemli kavram ise, bir parçacığın herhangi iki özelliğini aynı anda belirlemede her zaman belirsizlik olduğunu belirten Heisenberg’in belirsizlik ilkesidir. Örneğin, bu ilkeye göre, bir parçacığın momentumu ve konumu aynı anda tam doğrulukla ölçülemez (Ahmed 2007).

Kuantum mekaniğinde parçacık etkileşimleri nasıl ifade ediliyor? Bu noktada tesir kesiti kavramı devreye girer. Tesir kesiti, bir parçacığın başka bir parçacıkla belirli bir şekilde etkileşime girmesinin ne kadar olası olduğunu belirtir. Matematiksel olarak alan boyutuna sahiptir, ancak kavramsal olarak etkileşim olasılığını temsil eder. Tesir kesiti, parçacık fiziği ve radyasyon ölçümü alanlarında en çok kullanılan parametrelerden biridir, çünkü

bir malzeme ile etkileşime girdiğinde belirli bir parçacık demetinden ne bekleneceğinin doğrudan ölçüsünü verir. Matematiksel olarak tesir kesiti nasıl tanımlanır? Bunun için bir hedefe bir parçacık demeti gönderildiği varsayalım. Parçacıklar hedefle etkileşime girdikten sonra, gelen demetteki bazı parçacıklar saçılır. Burada ($d\Omega$) katı açıyı ve (dN) ise saçılan ortalama parçacık sayısını temsil eder (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

$$\frac{d\Omega}{dN}(E, \Omega) = \frac{1}{\Phi} \frac{dN}{d\Omega} \quad (2.6)$$

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.6 ve 2.7’de görüldüğü üzere, tesir kesiti (σ) alan (cm^2) boyutuna sahiptir. Bu nedenle tesir kesiti, gelen parçacığın maruz kaldığı alanı temsil eden bir miktar olarak tanımlanmıştır. Bu alan ne kadar büyük olursa, gelen parçacığın hedef parçacıkla etkileşime girmesi o kadar olası olacaktır. Kesit terimi herhangi bir fiziksel ilkeye dayanmamaktadır, boyut kullanılarak matematiksel bir açıklama için yapay olarak tasarlandığına dikkat edilmelidir. Tesir kesitinin standart birimi Barn’dır, 1 Barn = $10^{-24} cm^2$ (Knoll 1999).

2.3.3 Ortalama serbest yol

Parçacıklar malzemeden geçerken, hareket yönlerini değiştirebilecek çarpışmalara maruz kalırlar. Bu nedenle bu çarpışmalar arasındaki ortalama mesafe, belirli bir etkileşim olasılığının ölçüsüdür. Genellikle ortalama serbest yol olarak bilinen bu mesafe, eşitlik 2.8’de görüldüğü üzere malzemenin kesit alanı ve yoğunluğu ile ters orantılıdır,

$$\lambda_m \propto \frac{1}{P_n \sigma} \quad (2.8)$$

burada P_n ortamın yoğunluğunu ve σ ortamdaki parçacığın tesir kesitini temsil eder. Ortalama serbest yolun tanımı hesaplamada kullanılan kesit tipine bağlıdır. Örneğin, saçılma tesir kesiti kullanılırsa, ortalama serbest yol sadece saçılma sürecine karşılık gelir. Ancak genelde, örneğin radyasyon ortamında gerekli olan zırlama hesabını yaparken tüm olası durumlar düşünülüp, toplam ortalama serbest yolu veren toplam enine kesit kullanılır (Ahmed 2007).

2.4 Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri

Farklı amaçlar içinde olsa tüm dedektör tipleri için geçerli olan bazı genel dedektör özellikleri: dedektör hassasiyeti, dedektör yanıtı, dedektör enerji çözünürlüğü, dedektör verimliliği, dedektörün tepki süresi ve ölü zaman (dead time) şeklinde verilebilir.

2.4.1 Dedektör hassasiyeti

Bir dedektör için ilk dikkate alınması gereken özellik dedektör hassasiyetidir. Dedektör hassasiyeti, belirli bir radyasyon ve enerji türü için kullanılabilir bir sinyal üretme yeteneğidir. Bütün enerjilerdeki her türlü radyasyona duyarlı bir dedektör olamaz. Bu nedenle bir dedektör, belirli bir enerji aralığında belirli radyasyon türlerine duyarlı olacak şekilde tasarlanır. Bu bölgenin dışına çıkmak genellikle kullanılamaz bir sinyale veya verimliliğin büyük ölçüde azalmasına neden olur (Leo 2012).

Belirli enerjideki belirli bir radyasyon tipi için dedektör hassasiyeti birkaç faktöre bağlıdır. Bu faktörler şu şekildedir:

1. Dedektördeki iyonizasyon tesir kesiti,
2. Dedektör kütlesi,
3. Dedektörün kendisinden kaynaklı doğal gürültüsü,
4. Dedektörün hassas hacmini çevreleyen koruyucu malzeme.

Tesir kesiti ve dedektör kütlesi, gelen radyasyonun dedektördeki enerjisinin bir kısmını veya tamamını iyonizasyon formuna dönüştürme olasılığını belirler. Yüklü parçacıklar yüksek oranda iyonlaştırıcı oldukları için düşük yoğunluklu ve küçük hacimli dedektörler bu parçacıkları ölçmek için yeterli iken nötr parçacıklar için durum daha farklıdır. Çünkü nötr parçacıkların öncelikle dedektör ortamını iyonize edebilecek etkileşime girmeleri gerekir. Bu etkileşim kesitleri genellikle çok küçüktür, bu nedenle makul bir etkileşim oranı sağlamak için daha yüksek bir kütle yoğunluğu ve hacmi gereklidir. Aksi takdirde dedektör esasen nötr parçacıklara karşı işlevsiz hale gelir. Bu yüzden gerekli dedektör kütlesi, radyasyonun tipine ve ilgilenilen enerji aralığına bağlıdır. Örneğin nötrinoları ölçmek için, genellikle tonlar düzeyinde dedektör kütleleri gereklidir (Leo 2012).

Dedektör hassasiyetini belirleyen diğer önemli bir faktör ise, dedektörden kaynaklı oluşan dedektör gürültüsüdür. Dedektörde iyonizasyon üretilse bile, sinyalin kullanılabilir olması için belirli bir minimum miktar gereklidir. Bu alt sınır, dedektörden ve ilgili elektronikten gelen gürültü tarafından belirlenir. Gürültü, dedektör çıkışında dalgalanan bir voltaj veya akım olarak görünür ve radyasyon olsa da olmasa da her zaman mevcuttur. Bu yüzden iyonizasyon sinyalinin kullanılabilir olması için iyonizasyon sinyalinin ortalama gürültü seviyesinden daha büyük olması gerekir. Belirli bir enerji aralığındaki belirli bir radyasyon türü için üretilen toplam iyonlaşma miktarı hassas hacim tarafından belirlenir (Leo 2012).

Son sınırlayıcı faktör ise, dedektörün hassas hacmini çevreleyen koruyucu malzemedir. Koruyucu malzeme belirli bir soğurulma katsayısına sahip olması nedeniyle, dedektör sadece bu koruyucu katmanı geçecek yeterli enerjiye sahip radyasyonları algılayabilir. Bu nedenle koruyucu malzemenin kalınlığı dedektör hassasiyeti üzerinde sınırlayıcı etkiye sahiptir (Leo 2012).

2.4.2 Dedektör yanıtı

Birçok radyasyon dedektörü radyasyonun varlığını tespit etmenin dışında, radyasyonun enerjisi hakkında da bilgi verir. Bu nedenle bir dedektörde radyasyon tarafından üretilen iyonlaşma miktarı, hassas hacimde kaybettiği enerjiyle orantılıdır. Yani dedektörde oluşan sinyalin şekli radyasyonun iyonlaşma miktarına bağlıdır (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

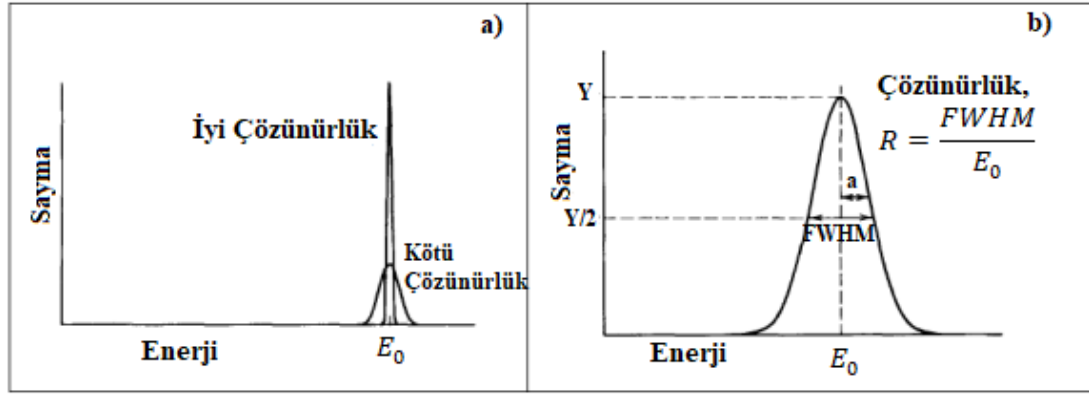
Bilindiği gibi birçok dedektörde çıkış sinyali olarak akım sinyali ölçülür. Bu çıkış sinyalinin zamana göre integrali, bu sinyalde bulunan elektrik yükünü temsil eder. Çıkış sinyal şeklinin değişmediğini varsayarsak, sinyalin genliği veya sinyalin yüksekliğiyle doğru orantılı olarak bu integral değişir. Bununla birlikte genel olarak dedektör yanıtı, parçacık tipinin ve enerjisinin fonksiyonudur ve bir tür radyasyon için lineer bir yanıtı sahip olan dedektörün başka radyasyon için lineer olacağını otomatik olarak söylemez. Bu duruma organik sintilatörler örnek verilebilir. Organik sintilatörlerdeki tepki, düşük enerjilerdeki elektronlar için doğrusal, ancak proton, döteron vb. gibi daha ağır parçacıklar için değildir. Bunun nedeni, ortamdaki farklı parçacıklar tarafından tetiklenen farklı reaksiyon mekanizmalarıdır (Knoll 1999).

Yani, radyasyon enerjisi ile çıkış sinyalinin toplam yükü veya sinyal yüksekliği arasındaki ilişki, dedektörün yanıtı olarak adlandırılır (Knoll 1999).

2.4.3 Dedektörün enerji çözünürlüğü

Gelen radyasyonun enerjisini ölçmek üzere tasarlanmış dedektörler için en önemli faktör enerji çözünürlüğüdür. Bu faktör dedektörün birbirine yakın iki enerjiyi ayırt edebilme derecesidir. Genel olarak enerji çözünürlüğü, dedektöre monoenerjetik bir radyasyon ışını göndererek ve ortaya çıkan spektrumu gözlemleyerek ölçülebilir. İdeal olarak, ortaya çıkan spektrumun keskin bir delta-fonksiyonu (Şekil 2.2.a) şeklinde olması beklenir. Fakat gerçekte böyle değildir. Çünkü ortaya çıkan spektrum sonlu bir genişliğe sahip ve genellikle Gauss dağılımı (Şekil 2.2.b) şeklindedir. Bu sonlu genişlik, üretilen iyonizasyon ve uyarılma sayısındaki dalgalanmalardan kaynaklı ortaya çıkar (Leo 2012).

Enerji çözünürlüğü (R), genellikle ortaya çıkan spektrumun maksimum tepe noktasının yarıya düştüğü tam genişlik (Full Width Half Maximum-FWHM) kullanılarak hesaplanır. Bu aralıktan daha yakın olan enerjiler genellikle çözülemez olarak kabul edilir (Leo 2012).



Şekil 2.2 a) İyi ve kötü çözünürlüğe sahip dedektörler için dedektör tepkisi, b) Enerji çözünürlüğünün FWHM ile tanımlanması (Knoll 1999)

$$\text{Çözünürlük } (R) = \frac{\Delta E}{E_0} \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9'da, R enerji çözünürlüğünü, FWHM bir sinyal dalgasının yarı yükseklikteki tam genişliğini ve E_0 spektrumda gözlenen tepe noktasının enerjisini temsil etmektedir. Genellikle enerji çözünürlüğü yüzde olarak verilir. Bu sebeple Eşitlik 2.9'da verilen

Çözünürlük formülü 100 ile çarpılır ve % R olarak hesaplanır. Örnek olarak 1 MeV'lik gama ışınları için NaI dedektörü yaklaşık %8-%9 enerji çözünürlüğüne sahip iken Germanyum dedektörleri 1 MeV enerjili gama ışınları için %0.1 enerji çözünürlüğüne sahiptir. Yüzde olarak elde edilen bu enerji çözünürlükleri ne kadar düşük olursa çözünürlük o kadar iyi olur ve spektrumdaki pikler daha iyi ayırt edilebilir (Knoll 1999).

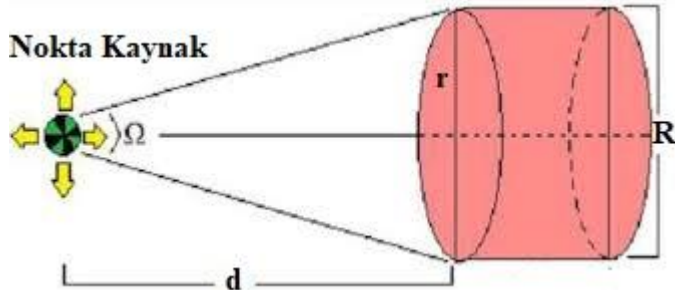
2.4.4 Dedektör verimliliğı

Dedektör verimliliğı için iki tür verimlilikten bahsedilir: Eşitlik 2.10'da gösterilen mutlak verimlilik (absolute efficiency) ve Eşitlik 2.11'de gösterilen içsel algılama verimliliğıdir (intrinsic detection efficiency). Bir dedektörün mutlak veya diğeri adıyla toplam verimliliğı, dedektör tarafından algılanan radyasyonun, radyasyon kaynağı tarafından yayılan toplam radyasyona bölünmesi olarak tanımlanır. Yani,

$$E_{\text{top}} = \frac{\text{Dedektör tarafından algılanan radyasyon}}{\text{Radyasyon kaynağı tarafından yayılan toplam radyasyon}} \quad (2.10)$$

$$E_{\text{içsel}} = \frac{\text{Dedektör tarafından algılanan radyasyon}}{\text{Dedektöre gelen toplam radyasyon}} \quad (2.11)$$

Burada, toplam (mutlak) verimlilik ile içsel verimlilik arasında $E_{\text{içsel}} = (4\pi/\Omega) E_{\text{top}}$ bağıntısı vardır. Ayrıca burada Ω , dedektörün katı açısını (Şekil 2.3) temsil etmekte ve birimi de steradyandır (sr) (Ahmed 2007).



Şekil 2.3 İzotropik kaynaktan yayımlanan ve dedektöre ulaşan fotonların oluşturduğu katı açı (Akkurt vd. 2015)

Dedektörün alanı A ve nokta kaynak ile dedektör arasındaki mesafe d olmak üzere katı açı Eşitlik 2.12,

$$\Omega = \int d\Omega = \int \frac{\cos\theta}{d^2} dA = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 - r^2}}\right) \quad (2.12)$$

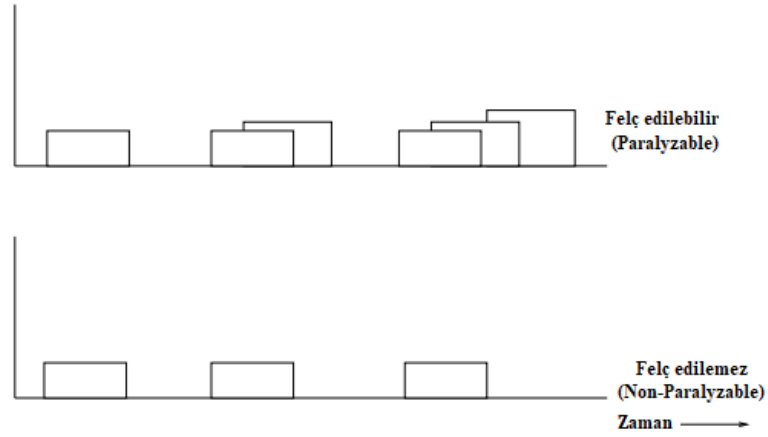
ifadesi ile verilir (Leo 2012).

İşsel verimlilik, radyasyon enerjisinin ve dedektör malzemesinin bir fonksiyonudur. Yüklü parçacıklar için işsel verimlilik genellikle birçok dedektör için uygun değerdedir. Çünkü yüksek enerjili yüklü bir parçacığın dedektörde iyonizasyon üretememesi çok olası bir durum değildir. Verimlilik sorunu genellikle nötr parçacıklar için daha önemlidir, ikincil yüklü parçacıkları oluşturmak için nötr parçacıklar önce etkileşime girmelidir. Nötr parçacıklar için bu etkileşimler genel olarak çok daha nadirdir, bu nedenle gelen nötr parçacıkların büyük bir kısmını yakalamak her zaman mümkün olmaz. İyi bir etkileşim olasılığı sağlamak için yeterli kütlenin mevcut olması gerektiğinden dedektörün boyutları önem kazanır (Leo 2012).

2.4.5 Dedektörün tepki süresi ve ölü zaman (Dead time)

Dedektörlerin diğer önemli bir özelliği ise tepki süreleridir. Tepki süresi, radyasyonun gelmesinden sonra dedektörün sinyali oluşturması için geçen süredir. Bu süre, dedektörün zamanlama özellikleri açısından çok önemlidir. Bunun yanında sinyalin süresi de çok önemlidir. Çünkü bu süre boyunca dedektör duyarsız kaldığı için veya ikinci sinyal birinci sinyalin üzerine yığılacağı için ikinci sinyali ölçemez. Bu durum dedektörün ölü zamanına katkıda bulunur ve dedektörün sayım oranını sınırlar (Leo 2012).

Bir dedektörün ölü zamanı veya sinyali çözümleme zamanı, ardışık iki parçacığın dedektöre gelmesi ile iki farklı sinyalin kaydedilmesi arasında geçen minimum süre olarak tanımlanır. Yani, ölü zaman, dedektörün ard arda gelen iki sinyali ölçmesi için ihtiyaç duyduğu minimum süredir. Ölü zamanın bileşenleri, dedektörün kendisinde sinyalin oluşumu ve dedektör sinyalinin elektronik bileşenler (ön yükselteç, yükselteç vb...) aracılığıyla işlenmesi için geçen süreden oluşur. Temel olarak iki farklı ölü zaman davranışı vardır: Felç edilebilir (Paralysable) ve felç edilemez (Non-Paralysable) (Şekil 2.4) (Knoll 1999).



Şekil 2.4 Ölüm zamanının felçli ve felçli olmayan modellerinin karşılaştırılması (Knoll 1999)

Dedektör ölü olduğu zaman diliminde ölçüm yapamayacaktır. Bu yüzden özellikle yüksek hızlarda ölçüm yapan dedektörlerde bu ölü zamandan kaynaklı bir ölçüm kaybı oluşacaktır. Ölüm zamandan kaynaklı oluşan bu ölçüm kaybını azaltmak gerekir.

Eşitlik 2.13’de felç edilemez durum için, τ sistemin ölü zamanı ve g gözlemlenen ölçüm oranı ise sistemin duyarsız olduğu (bir sinyali işlemekle meşgul) zaman dilimi $g\tau$ ’ dir. Felç edilebilir durum için Eşitlik 2.14 kullanılır. Burada n veya m gerçek ölçüm oranıysa, kayıp ölçüm sayısı $n(g\tau)$ olur (Knoll 1999).

$$n = \frac{g}{1 - g\tau} \quad (2.13)$$

$$m = ne^{-n\tau} \quad (2.14)$$

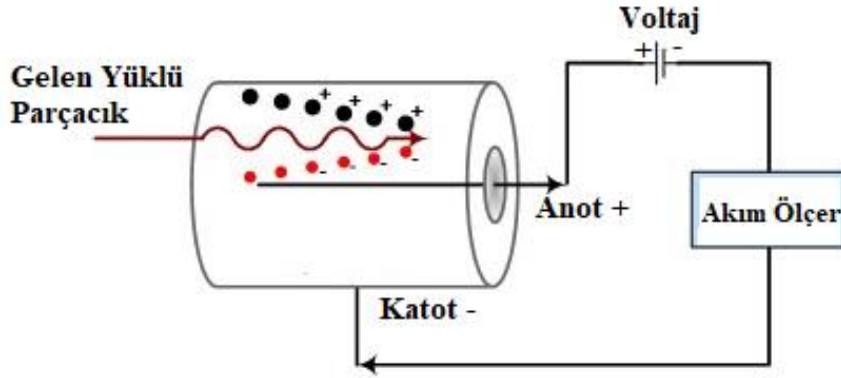
2.5 Gazlı Dedektörler

2.5.1 Gazlı dedektörlerin gelişimi

Yüksek enerji fiziğinde parçacık türünün belirlenmesi ve takibi için kullanılan dedektör türlerinden biri de gazlı dedektörlerdir. Bir parçacığın belli bir hacimden geçişini elektrik sinyaline dönüştüren ilk dedektör tipi H. Geiger ve E. Rutherford tarafından 1908 yılında tasarlanmıştır. 1928 yılında ise geliştirilerek “Geiger–Müller sayacı” adını alan bu dedektörler, tüm modern gazlı dedektörlerin temeli olarak bilinirler. Geiger–Müller sayacından sonra, dedektör ortamına giren radyasyonun veya yüklü parçacıkların izini, 100 μm ’lere varan yüksek bir hassasiyetle belirleyebilen orantılı sayaçlar geliştirilmiştir. G. Charpak’a 1992 yılı Nobel Fizik Ödülünü getiren bu buluş yüksek enerji fiziğinde büyük sayma hacmi ve gücü gerektiren dedektörlerin üretilebilmesinin de önünü açmıştır. Bu önemli buluşu, çok aşamalı çığ odaları ve sürüklenme odaları gibi dedektörler izlemiştir (Şahin 2018).

2.5.2 Gazlı dedektörlerin çalışma prensipleri

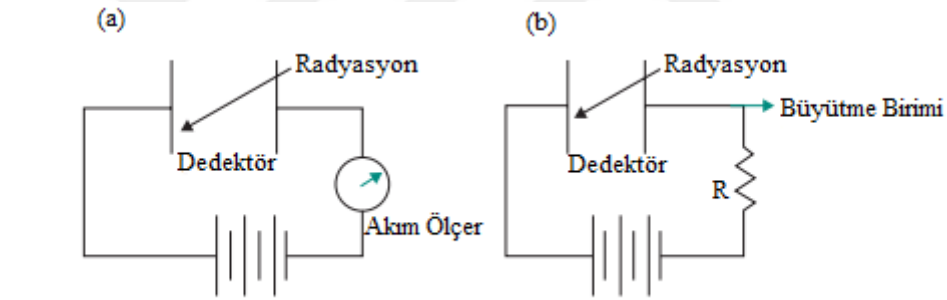
Gaz dolu dedektörler, radyasyonun bir gazdan geçerken ürettiği iyonlaşmayı kullanarak çalışır. Tipik olarak gazlı dedektörler, belirli bir elektrik potansiyelinin uygulandığı iki elektrottan ve bu elektrotlar arasından gaz geçirildiği bir mekanizmadan oluşur (Şekil 2.5). Elektrotlar arasındaki boşluktan geçen iyonlaştırıcı radyasyon, elektron-iyon çiftleri oluşturarak enerjisinin bir kısmını veya tamamını dağıtır. Hem elektronlar hem de iyonlar, elektrik alanının etkisi altında hareket eden yük taşıyıcılarıdır. Hareketleri elektrotlar üzerinde ölçülebilen bir akım indükler. Uygun elektronik araçlar aracılığıyla radyasyon tarafından üretilen yük bir sinyale dönüştürülür ve böylece parçacıklar ayrı ayrı sayılır (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).



Şekil 2.5 Tipik bir gazlı dedektörün şematik yapısı

(http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_965.html, 2022)

Birinci tip dedektör (Şekil 2.6a) akım veya entegre oda olarak adlandırılır; ikinci tip dedektör ise (Şekil 2.6b) atma (pulse) odası olarak adlandırılır (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).



Şekil 2.6 Tipik bir gaz dolu dedektör: (a) Devrede üretilen doğru akım ölçülür; (b) Bireysel sinyaller ölçülür (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)

Birçok gaz için bir elektron-iyon çifti üretmek üzere gereken ortalama enerji yaklaşık 30 eV' dur. Bu sayı, uyarılmaya yol açanlar da dâhil olmak üzere tüm olası çarpışmaları hesaba katar. Örneğin 3-MeV alfa (veya beta) parçacığı tüm enerjisini dedektörde biriktirirse, Eşitlik 2.15'e göre ortalama:

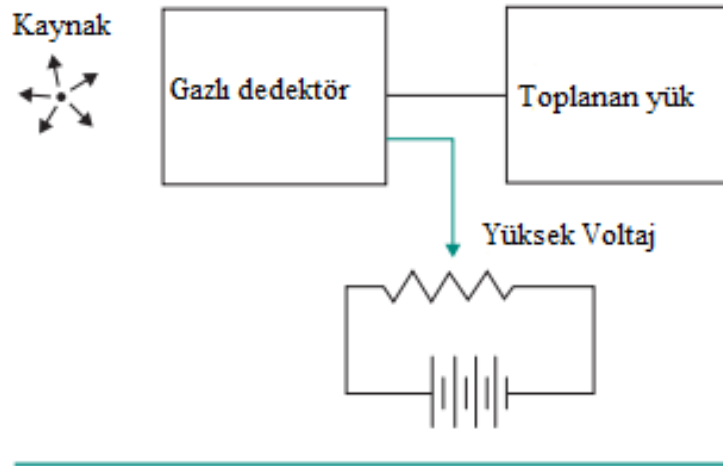
$$\frac{3 \times 10^6}{30} = 10^5 \text{ elektron - iyon çiftini üretir.} \quad (2.15)$$

Elektrik alanın olmadığı iyonize bir gazda, elektronlar ve pozitif iyonlar, $k =$ Boltzmann sabiti ve $T =$ gazın sıcaklığı (kelvin) olmak üzere $(3/2) kT'$ ye eşit bir

ortalama kinetik enerjiyle rastgele hareket edeceklerdir. Elektrik alan mevcut olduğunda hem elektronlar hem de pozitif iyonlar, elektrik alanının çizgileri boyunca hız kazanırlar. Elektronlar pozitif elektrota doğru hareket ederken pozitif iyonlar ise negatif elektroda doğru hareket eder. Her iki yük taşıyıcısı üzerindeki kuvvet aynıdır ve $F = Ee'$ ye eşittir, burada E = elektrik alan şiddeti ve e ise elektronun mutlak yükünü ifade eder. Elektron ve pozitif iyonlara etki eden kuvvet aynı olmasına rağmen elektronun kütlesi iyonun kütlesinden çok küçük olduğu için bu iki parçacığın kazandığı ivme farklıdır. Elektronların tipik bir dedektörün pozitif elektroduna ulaşması için geçen süre yaklaşık $1 \mu s$ ' dir. Pozitif iyonlar için buna karşılık gelen süre ise yaklaşık $1 ms$ ' dir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

2.5.3 Gazlı dedektörlerde uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki

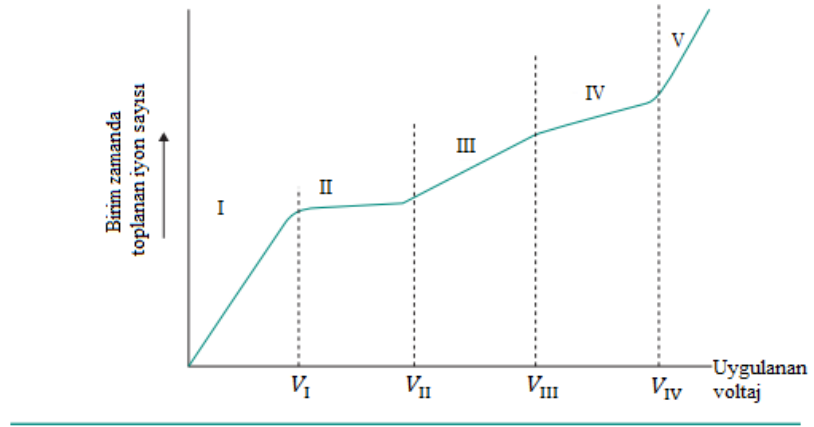
Sabit yoğunluklu bir radyoaktif kaynağın gazla dolu bir dedektörden uzakta sabit bir mesafeye yerleştirildiği varsayılırsa (Şekil 2.7), dedektöre uygulanan yüksek voltaj (High Voltage-HV), potansiyometre yardımı ile değiştirilebilir. Uygun bir sayaç, birim zaman başına toplanan yükü ölçer. Dedektöre uygulanan yüksek voltaj sürekli olarak arttırılırsa, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi birim zamanda toplanan yük miktarı değişir. Şekil 2.8'deki eğri, aşağıda açıklanan beş bölgeye ayrılmıştır.



Şekil 2.7 Uygulanan HV ile toplanan yük arasındaki ilişkinin incelenmesi için kurulan deney şeması (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)

I. Bölge: Rekombinasyon bölgesi olarak adlandırılır. Voltaj miktarı çok düşük olduğundan dedektördeki elektrik alanı güçlü değildir, elektronlar ve iyonlar nispeten yavaş hızlarda hareket eder ve rekombinasyon oranları yüksektir. Uygulanan voltaj miktarı arttıkça elektrik alan güçlenir, buna paralel olarak taşıyıcılar daha hızlı hareket eder ve yeniden birleştirme oranları sıfır olana kadar azalır. Daha sonra iyonlaştırıcı radyasyon tarafından oluşturulan tüm yükler toplanır ($V = V_I$) (Knoll 1999).

II. Bölge: Bu bölgede, V_I ve V_{II} arasındaki voltajdan toplanan iyon çiftleri voltajdaki değişikliğe rağmen sabit kalır. Elektrotlar tarafından toplanan iyon çiftlerinin sayısı, gelen radyasyon tarafından üretilen iyon çiftlerinin sayısına eşittir ve gelen radyasyondaki parçacıkların veya ışınların türüne ve enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, bu bölgede eğri düzdür. Voltaj, ayrılmış iyon çiftlerinin yeniden birleşebileceği noktadan daha yüksek olmalıdır. Öte yandan voltaj, gaz amplifikasyonu (ikincil iyonizasyon) üretecek kadar yüksek değildir. Bu bölge iyonizasyon bölgesi (Ionization Region) olarak adlandırılır (Knoll 1999).



Şekil 2.8 Dedektöre uygulanan voltaj ile toplanan yük arasındaki ilişki (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)

III. Bölge: Bu bölgede elektronlar ikincil iyonizasyonu başlattığı için toplanan yük artmaya başlar. Elektrik alan, dedektör hacminin belirli bir bölümünde o kadar güçlüdür ki, birincil iyonizasyondan gelen elektronlar, ikincil elektronları üretebilecek enerjiye sahiptirler. Yük çarpma faktörü (yani üretilen toplam iyonizasyonun birincil iyonizasyona bölünmesiyle elde edilen oran) belirli bir voltaj için birincil iyonizasyondan bağımsızdır. Çıkıştaki darbe yüksekliği, dedektörün içinde yayılan enerjiyle orantılıdır; bu nedenle

parçacık tanımlama ve enerji ölçümü mümkündür. Bu bölge, orantılı sayaç (Proportional Region) bölgesi olarak adlandırılır (Knoll 1999).

IV. Bölge: Bu bölgede dedektörün içindeki elektrik alanı o kadar güçlüdür ki, haznede üretilen tek bir elektron-iyon çifti, bir elektron-iyon çifti çıkışını başlatmak için yeterlidir. Bu çıkış, birincil iyonizasyondan ve partikül türünden bağımsız olarak şekil ve yükseklikte güçlü bir sinyal üretecektir, bu sadece dedektörün elektroniğine bağlı bir sinyaldir. Bu bölge Geiger–Müller (GM) bölgesi olarak adlandırılır (Knoll 1999).

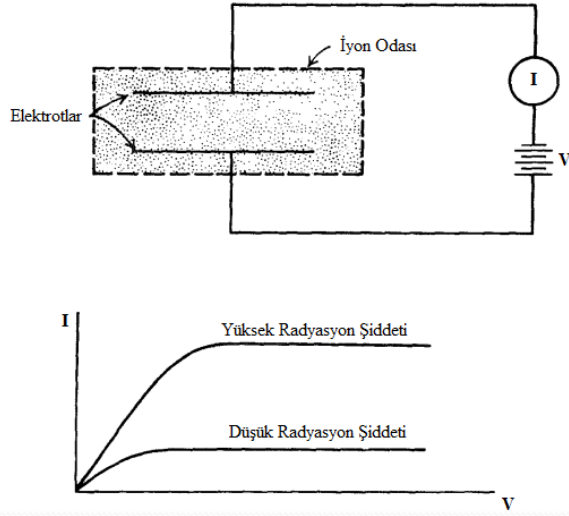
V. Bölge: Uygulanan voltaj V_{IV} değerinin üzerine çıkarsa, tek bir iyonlaşma olayı gazda sürekli bir deşarj başlatır ve cihaz artık bir parçacık dedektörü olarak çalışmaz. Bu yüzden hiçbir gazlı dedektör bu bölgede çalıştırılmamalıdır (Knoll 1999).

2.5.4 Gazlı dedektör türleri

Dedektör çeşitleri temel olarak, dedektörlere uygulanan voltaja bağlı olarak belirlenmektedir. Şekil 2.8’de uyguladığımız voltaja bağlı olarak toplanan iyon sayısı değişmektedir. Toplanan iyon sayısına bağlı olarak gazlı dedektörler farklı türlere ayrılır. Şimdi sırayla bu gazlı dedektör türlerini inceleyelim.

2.5.4.1 İyonizasyon odaları (Ion chambers)

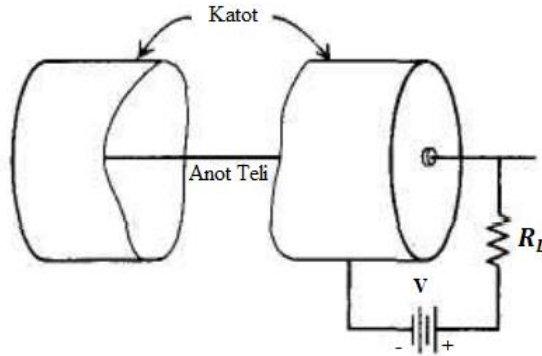
İyonizasyon odaları Şekil 2.8’nin II. bölgesinde faaliyet göstermektedir. Burada ikincil yükler oluşmaz. Çıkış sinyali, dedektörde dağılan parçacık enerjisiyle orantılıdır; bu nedenle, parçacık enerjisinin ölçümü mümkündür. Bir iyonizasyon odasından gelen sinyal büyük olmadığından alfa, proton ve fisyon parçaları gibi güçlü iyonlaştırıcı parçacıklar bu tür dedektörler tarafından ölçülür. Bu tip dedektörler 1000 volt civarı bir voltajda çalışırlar (Knoll 1999). Şekil 2.9’da iyonizasyon odasının bir şematiği görülmektedir.



Şekil 2.9 Bir iyon odasının temel bileşenleri ve akım-voltaj özellikleri (<https://www.astro.rug.nl/~peletier/Bas%20Det%20Tech%202009%20gas%20detectors.pdf>,2022)

2.5.4.2 Orantılı sayaçlar (Proportional counters)

Orantılı sayaçlar Şekil 2.8'in III. bölgesinde çalışır. Bu bölgede ikincil yükler oluşur, ancak çıkış sinyali yine de sayaçta biriken enerjiyle orantılıdır. Burada parçacık enerjisinin ölçümü mümkündür. Herhangi bir yüklü parçacığın tespiti için orantısız sayaçlar kullanılabilir. Gelen yüklü parçacığın türünü hem iyonizasyon odalarını hem de orantılı sayaçları kullanarak tespit edebiliriz. Örneğin aynı enerjiye sahip olan bir alfa parçacığı ve bir elektron aynı dedektöre girdiğinde farklı sinyaller üreteceklerdir. Alfa parçacığının sinyali, elektronun sinyalinden daha büyük olacaktır. Orantılı sayaçlar (Şekil 2.10) 1000 ile 2000 Volt arasındaki bir voltaj aralığında çalışmaktadır (Knoll 1999).

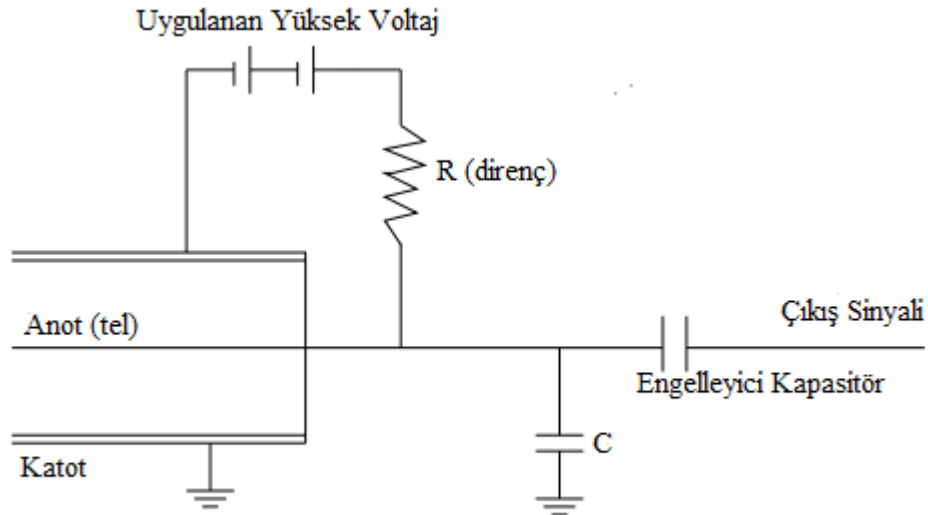


Şekil 2.10 Orantılı Sayacın temel bileşenleri (Hemn ve Ari 2014)

2.5.4.3 Geiger-Müller dedektörü (GM)

Geiger-Müller dedektörü, J. W. Geiger ve öğrencisi W. Müller tarafından bulunup geliştirilen gazlı bir dedektör türüdür. Bu dedektör, diğer gazlı dedektörlerle benzer bir çalışma mekanizmasına sahiptir. Yani radyasyonu tespit etmek için birincil araç olarak radyasyonla gazın iyonlaşma özelliğini kullanır. Geiger-Müller dedektörü (Şekil 2.11) silindirik bir tüp şeklindedir ve belirli bir düşük basınçta soy gazla doldurulur. Silindirik şeklin merkezinden anot görevi gören metalik bir tel geçerken dış kabuk da katot görevi görür. Bunun yanında silindirik tüpün bir ucunda radyasyon geçiren pencere (mika veya berilyumdan yapılmış) bulunur.

Tüpün penceresinden yüklü bir parçacık geçtiğinde, bu yüklü parçacık soy gazı iyonize eder. Bu şekilde üretilen negatif iyonlar anoda doğru çekilirken pozitif iyonlar yavaşça katoda doğru hareket eder. Bu yükler daha fazla sayıda atomu iyonize ederek negatif iyon ve pozitif iyon çığı oluşturur. Dedektörün algılama yeteneği oluşan çığa dayalı olduğundan, çıkış sinyalleri gelen radyasyonun enerjisinden bağımsızdır. Oluşan sinyalin yüksekliği radyasyon enerjisinden bağımsız olarak aynı kaldığı için GM dedektörleri yalnızca radyasyonun varlığını tespit etmek için kullanılabilir, radyasyon tipini tespit etmek için kullanılamaz (Ahmed 2007).



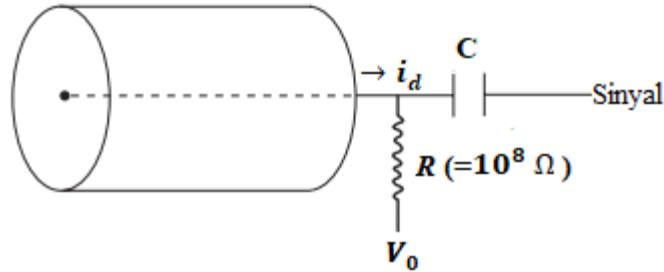
Şekil 2.11 Geiger-Müller dedektörünün şematik diyagramı (Knoll 1999)

GM dedektörüyle uzun süre ölçümler yapıldıktan sonra negatif yüklü iyonlar pozitif yüklü olanlara göre daha hızlı olduklarından pozitif yüklü iyonlar anot teli etrafında bir

gaz bulutu oluşturmaya başlarlar. Böylece bir süre sonra negatif iyonlar daha anot teline varamadan pozitif iyonlarla birleşerek dedektörde düzgün ölçüm yapılamamasına neden olurlar. Bu durumu engellemek için dedektöre sönümlenme uygulanır. İki tür sönümlenme vardır: bunlar sırasıyla içsel (internal quenching) sönümlenme ve dışsal (external quenching) sönümlenmedir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

İçsel sönümlenmede dedektörün içine 5 – 10 (%) oranında iyonlaşma potansiyeli asıl gazdan daha düşük ve karmaşık moleküler yapıya sahip olan ikinci bir gaz eklenerek yapılır. Eklenen ikinci gaz enerjisini iyonlaşma sırasında fotoelektrik işlem yerine parçalanarak kaybeder ve böylece elektron koparılması yerine moleküller parçalandığı için yeni ışışların oluşması engellenmiş olur (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).

Dışsal sönümlenme ise her sinyalden sonra sayaç tüpüne uygulanan yüksek gerilimin belirli bir süre için düşürülmesiyle yapılır. Bu etki basitçe bir RC devresi ile oluşturulabilir (Şekil 2.12). Bu metodun dezavantajı ise anodun normal gerilimine dönmesi için birkaç milisaniyelik zamana ihtiyaç duymasıdır. Bu durumda dedektörün ölü zamanının artması anlamına gelir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014).



Şekil 2.12 Geiger-Müller dedektörünün dışsal olarak sönümlenmesi için kullanılan devre (Tsoulfanidis ve Landsberger 2014)

2.6 Dirençli Levha Oda - RPC (Resistive Plate Chamber) Dedektörleri

Yüksek enerji fiziğinde kullanılan dirençli levha odaları (RPC) ilk olarak 1981 yılında R. Santanico ve R.Cardarelli tarafından geliştirilmiştir. Tipik olarak dirençli levha odaları birbirine paralel bakalit veya camdan yapılmış iki dirençli levhadan oluşur. RPC dedektörleri gazlı dedektörler sınıfına ait bir dedektör olduğu için çalışma biçimi olarak da diğer gazlı dedektörlere benzer. RPC dedektörlerinde ağırlıklı olarak R134a, iso-

C_4H_{10} ve SF_6 gaz karışımları kullanılmaktadır. Bu gaz karışımları yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip gazlar içerdiğinden gelecek yıllarda kullanımının kısıtlanması olasıdır. Bu yüzden son yıllarda bu gaz karışımına alternatif ve doğa dostu gazlar üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022).

2.6.1 RPC dedektörlerinin genel özellikleri

Dirençli levha odaları (RPC'ler) üretildikleri yıl olan 1981'den beri büyük gelişme göstermişlerdir. Özellikle yüksek enerji fiziğinde ve astroparçacık fiziği deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. RPC'ler, aşağıda belirtilen avantajlardan dolayı yaygın olarak büyük, çok amaçlı deneylerde kullanılmaktadır (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022):

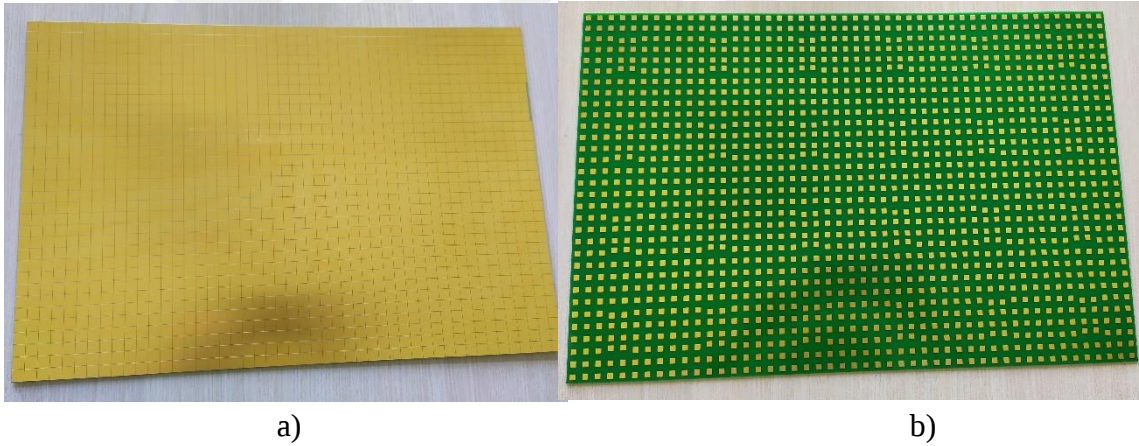
- RPC'ler düşük malzeme maliyetleri sayesinde, yüzlerce metrekarelik yer kaplayan büyük dedektörlerin bir parçası olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır.
- RPC dedektörlerinin yapısı oldukça kolaydır ve bu dedektörler basit okuma elektroniğine sahiptirler.
- RPC'ler nanosaniyeler mertebesinde zaman çözünürlüğüne sahiptirler ve kararlı şekilde uzun süre çalıştırılabilirler.
- RPC'ler çok iyi bir konum çözünürlüğüne ve % 90'ın üzerinde verimliliğe sahiptirler (Bilki vd. 2009a).

2.6.2 RPC dedektörlerinin çalışma mekanizması

RPC dedektörleri gazlı dedektörler sınıfına ait dedektör çeşidi olduklarından temel çalışma prensibi iyonizasyon ilkesine dayanmaktadır. RPC dedektörleri, birbirine paralel katot ve anot yüzeyler arasında elektrik alan uygulayarak, bu katmanlar arasındaki gaz içerisinden iyonize edici bir parçacık geçtiğinde oluşan elektron-iyon çiftinin elektronlarını anoda doğru hızlandırma ve anot üzerinde önce indüklenen, sonra toplanan yükü okuma prensibi üzerine kurulu parçacık dedektörleridir (Santonico ve Cardarelli 1981, Drake vd. 2007). RPC dedektörlerinde elektrot olarak çoğunlukla bakalit veya cam malzeme kullanılır. Son yıllarda daha sert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olması nedeniyle bakalit yerine cam elektrotlar tercih edilmektedir. Bu malzemeler sahip oldukları yüksek

özdirenç ($10^{11} - 10^{13} \Omega\text{cm}$) nedeniyle RPC yapımında kullanılırlar (<https://www.nevis.columbia.edu/~chi/rpc/cms-rpc-tech-note.pdf>, 2022).

Dünyadaki çok amaçlı deneylerde yaygın olarak kullanılan RPC'ler çift camlı olan RPC'lerdir. RPC'lerin sinyal okuma kartları dedektörün dış kısmında bulunur. Bu sinyal okuma kartları tek kanallı olabildiği gibi birçok kanallı da olabilir. Özellikle konumsal çözümleme yapılacak dedektörlerde çok kanallı sinyal okuma kartları kullanılır. Şekil 2.13'te bir örneği görülen çok kanallı okuma kartının ön yüzeyi 1 cm x 1 cm boyutlarındaki hücrelerden oluşur (Adams vd. 2016). Bu hücreler 100 μm miktarında bir mesafe ile birbirlerinden ayrılmıştır. Veri kaybını engellemek amacıyla bu hücreler arasındaki mesafe olabildiğince en küçük miktarda tutulmuştur. Çok kanallı sinyal okuma kartının arka yüzeyinde, ön yüzeydeki her bir hücre ile ayrı ayrı bağlantılı kontak noktaları bulunur. Bu kontak noktalarına sinyal kabloları bağlanarak dedektörden sinyal alınır.



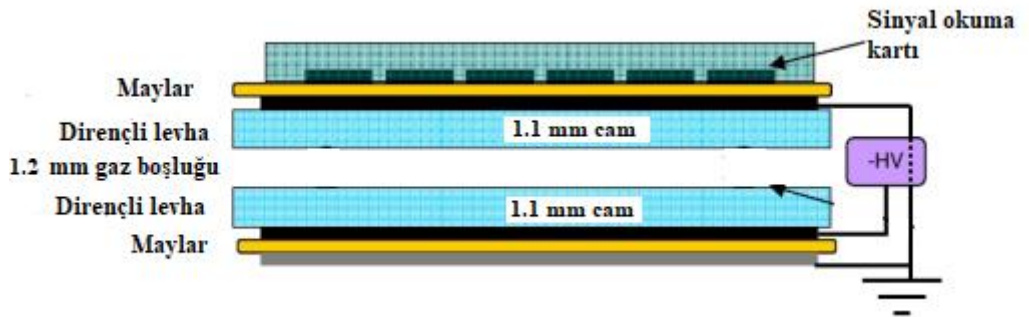
Şekil 2.13 Çok kanallı RPC sinyal okuma kartı a) ön yüz, b) arka yüz (Adams vd. 2016)

Bu sinyal okuma kartları kullanılarak çift camlı RPC'lerde hem anot tarafından hem de katot tarafından sinyal alınabilir. Şekil 2.14'te çift camlı RPC'nin şematik yapısı görülmektedir. Şeklin en üst kısmında sinyal okuma kartı bulunmakta olup, onun hemen altında ise Maylar denilen şeffaf yalıtkan malzeme bulunmaktadır. RPC dedektörleri yüksek voltajda çalışan dedektörler olduklarından koruma amaçlı olarak şeffaf yalıtkan malzeme (maylar) kullanılmaktadır.

Mayların hemen altında bakalit veya camdan yapılmış yüksek dirençli elektrotlar bulunmaktadır. Bu elektrotların yüzey direnci yaklaşık $0.8-1.5 \text{ M}\Omega/\text{BrK}$ ($\text{BrK} = \text{Birim Kare}$) olup iletken boya ile kaplıdır. Farklı tasarımlarda iletkenliği sağlamak için grafit ya da akrilik boya kullanılır. Bunun nedeni elektrotların yüzeyine uygulanan voltajın homojen dağılması ve iyonlaşma olayından sonra boşluğun kolayca yeniden şarj olmasını sağlamaktır (Loterman 2014).

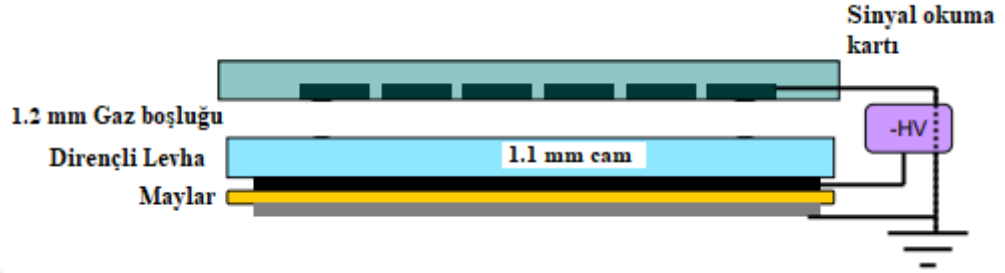
RPC dedektörlerinde diğer önemli bir nokta ise, dirençli levhalar arasındaki gaz boşluğudur. Gaz boşluğunun kalınlığı dedektörün zaman performansını etkilemektedir. Bu yüzden nanosaniye boyutlarında zaman çözünürlüğüne sahip olan RPC'ler için bu gaz boşluğunun kalınlığı önemlidir. Yapılan bir RPC'nin zamanlayıcı (timing) RPC olarak mı kullanılacağı yoksa tetikleyici (Trigger) RPC olarak mı kullanılacağını belirleyen gaz boşluğudur. Zamanlayıcı (Timing) RPC olarak kullanılan çok gaz boşluklu RPC'lerin gaz boşluk kalınlığı $0.2 - 0.3 \text{ mm}$ arasında ve zaman çözünürlüğü pikosaniye mertebelerindedir (Lippmann ve Riegler 2003).

Diğer bir önemli bir konu ise gaz boşluğunun her yönden eşit kalınlıkta olmasıdır. Bu çok önemli bir özelliktir çünkü gaz boşluk genişliğindeki bir değişiklik, elektrik alanında ve dolayısıyla gaz çoklamasında değişiklik anlamına gelir. Bu durum da doğal olarak dedektörün çalışma performansını etkiler.



Şekil 2.14 Çift camlı RPC'nin şematik yapısı (ölçeksiz) (Bilki vd. 2009a)

Geleneksel RPC dedektörlerinin çift camlı elektrottan oluştuğu ve bu dedektörlerin sinyal okuma kartlarının dedektörlerin dışında olduğundan bahsedilmiştir. Fakat son yapılan çalışmalarda özellikle kalorimetre görüntüleme çalışmaları için tek camlı elektrottan yapılmış RPC'ler de geliştirilmiştir. Tek camlı RPC'lerin sinyal okuma kartları dedektöre gömülü halde bulunur. Şekil 2.15' te tek camlı RPC'nin şematik yapısı görülmektedir (Bilki vd. 2015).

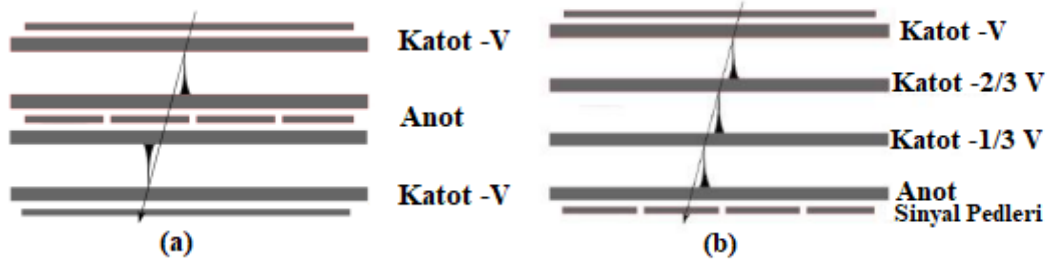


Şekil 2.15 Tek camlı RPC'nin şematik yapısı (Bilki vd. 2015)

Yeni tasarım tek camlı RPC dedektörlerinin avantajları:

- Öncelikle çift camlı RPC'lerde iki cam elektrot kullanıldığı için toplam direnç yüksektir. Bu camlardan biri çıkarıldığında toplam direnç düştüğü için dedektörün hız kapasitesi yaklaşık iki kat artar.
- Tek camlı RPC dedektörlerinde tek cam elektrot kullanıldığı için toplam dedektör kalınlığı azalır.
- Çift camlı RPC'lerde sinyal okuma kartı dedektörün dışında bulunduğu için, sinyal okuma kartının bulunduğu elektrotun yüzey direnci sinyal alımında önemli bir etkiye sahiptir. Tek camlı RPC'lerde sinyal okuma kartı direk dedektöre gömülü olduğu için, anot yüzeyindeki bu etki ortadan kalkmaktadır (Bilki vd. 2015).

Çift camlı ve tek camlı RPC'lerin yanı sıra çift gaz boşluklu (double gap) ve ikiden fazla gaz boşluğu olan (Multigap MRPC) RPC dedektörleri de mevcuttur (Şekil 2.16). Bu dedektörler tipik olarak çift camlı RPC dedektörleri gibi çalışır fakat sahip oldukları çoklu gaz boşlukları sayesinde oluşturdukları sinyal oranı yüksektir. Ayrıca daha düşük gaz kazancına sahip gazları yüksek voltajlarda çalıştırmayı mümkün kılar. Bu dedektörlerin dezavantajı ise üretimlerinin çok zor olmasıdır (<https://www.nevis.columbia.edu/~chi/rpc/cms-rpc-tech-note.pdf>, 2022).



Şekil 2.16 Çift gaz boşluklu RPC tasarımı (a), Çoklu gaz boşluklu RPC tasarımı (b)
(<https://www.nevis.columbia.edu/~chi/rpc/cms-rpc-tech-note.pdf>, 2022)

RPC dedektörleri, gazlı dedektörler sınıfına ait bir dedektör türü olduğu için temel olarak çalışma prensibi iyonizasyona dayanmaktadır. RPC dedektörünün içinden iyonize edici bir parçacık geçtiğinde, gazı iyonize ederek elektron ve iyon çiftlerini oluşturur. Bu yüzden elektron-iyon çiftinin oluşma mekanizmasının iyi anlaşılması önemlidir.

2.6.2.1 RPC dedektörlerinde elektron-iyon çiftlerinin üretimi

Yüklü bir parçacık gazdaki atomlarla etkileşime girdiğinde molekülleri uyarabilir, iyonize edebilir veya hiçbir şey yapmayabilir. Burada son derece önemli olan yüklü bir parçacığın, bir gazda elektron-iyon çifti oluşturması için gereken ortalama enerjisidir. Bu enerjiye W değeri denir. W değeri her enerjide, yüklü parçacığın ve gazın türüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Aslında W değeri bu parametrelere zayıf bir şekilde bağlı olduğu için bu değişiklik bir dereceye kadar önemlidir. Çünkü Çizelge 2.1’de birçok gaz ve radyasyon türleri için W değerinin 23 - 45 eV/çift arasında değiştiği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken ilginç nokta, W değerinin gazlar için ilk iyonlaşma potansiyelinden önemli ölçüde daha yüksektir, bu da tüm enerjinin elektron-iyon çiftleri oluşturmaya gitmediğini gösterir. Yüklü parçacığın sadece atomları iyonize etme kabiliyetine sahip olmadığı, aynı zamanda onları uyarabildiği bilindiği için bu anlaşılabilir bir durumdur (Ahmed 2007).

Gelen yüklü parçacık tarafından oluşturulan yüklere, onları aktif hacimde dolaylı olarak üretilenlerden ayırt etmek için, birincil yükler (primary charges) denir. Daha sonra bu birincil yükler ikincil yüklerin oluşmasına neden olur. Burada W değeri aktif hacimde meydana gelen tüm bu tür iyonizasyonları temsil eder. Örneğin E enerjisine sahip yüklü

bir parçacık gazlı bir dedektörün içinden geçip ΔE kadar enerjisi gaza aktarıldığında, dedektörde oluşturacağı toplam elektron-iyon çiftlerinin sayısı (N) Eşitlik 2.16 ile verilir.

$$N = \frac{\Delta E}{W} \quad (2.16)$$

Şayet gelen yüklü parçacık tüm enerjisini dedektördeki gaza aktarırsa, bu durumda oluşacak toplam elektron-iyon çiftlerinin sayısı Eşitlik 2.17 kullanılarak bulunur.

$$N = \frac{1}{W} \frac{dE}{dx} \Delta x \quad (2.17)$$

Burada Δx parçacığın dedektörde aldığı yoldur. Eğer yüklü parçacığın dedektörde birim yol başına ürettiği elektron-iyon çiftleri sayısı (n) hesaplanmak istenirse Eşitlik 2.18 kullanılır.

$$n = \frac{1}{W} \frac{dE}{dx} \quad (2.18)$$

Çizelge 2.1 Gazlı dedektörlerde kullanılan gazlar ve bunların W değerleri (Ahmed 2007).

Gaz	Z	Yoğunluk $\times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$	I_e (eV)	W eV/çift	dE/dx (keV/cm)	n_p (ip/cm)	n_t (ip/cm)
H_2	2	0.8	15.4	37	0.34	5.2	9.2
He	2	1.6	24.6	41	0.32	5.9	7.8
N_2	14	11.7	15.5	35	1.96	10	56
O_2	16	13.3	1.2	31	2.26	22	73
Ne	10	8.4	21.6	36	1.41	12	39
Ar	18	17.8	15.8	26	2.44	29	94
Kr	36	34.9	14.0	24	4.60	22	192
Xe	54	54.9	12.1	22	6.76	44	307
CO_2	22	18.6	18.6	33	3.01	34	91
CH_4	10	6.7	10.8	28	1.48	46	53

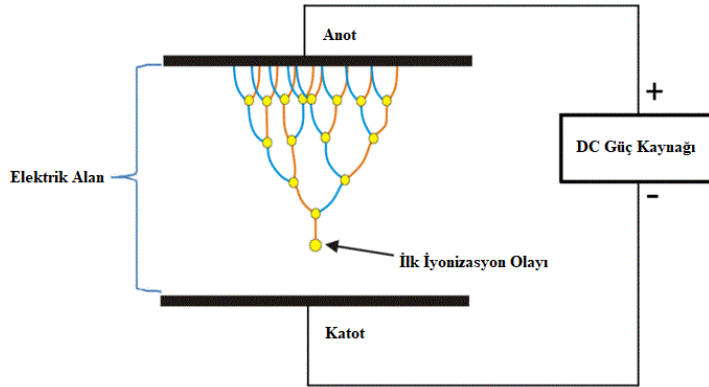
Burada I_e = iyonizasyon enerjisi, $\frac{dE}{dx}$ = Durdurma Gücü, n_p = Birincil iyonlaşma verimi, n_t = toplam iyonlaşma verimi 'dir (Ahmed 2007).

2.6.2.2 RPC dedektörlerinin çalışma modları

RPC dedektörleri Çığ Modu (Avalanche) (Şekil 2.17) ve Yük boşalma (Streamer) Modu (Şekil 2.18) olmak üzere temelde iki modda çalışır (Biswas 2010).

Avalanche modda, iyonize edici bir parçacık RPC dedektöründen geçtiğinde, RPC gazını iyonlaştırarak elektron-iyon çiftlerini oluşturur. Oluşan bu elektron-iyon çiftleri düzgün elektrik alan yardımıyla elektrotlara doğru hızlandırılır. Bu elektron ve iyonlar elektrik alan altında hareket ederken ortamda bulunan nötr gaz atomlarıyla da birçok etkileşime girerler. Şayet bu elektron ve iyonlar yeterli enerjiye sahiplerse ikincil elektron-iyon çiftlerinin oluşmasına neden olurlar. İkincil elektron-iyon çiftleri de elektrik alan yardımıyla hızlanarak başka elektron-iyon çiftlerinin oluşmasına neden olur. Şelale gibi devam eden bu olaya Townsend Çığı (Townsend Avalanche) denir (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022).

Avalanche modda çalışan RPC'ler daha düşük voltajda çalışır ve kazanç daha azdır. Bu nedenle bu modda çalışan RPC'lerin sinyal genlikleri bir kaç milliVolt ve elektron çoğalması 10^6 mertebesinde (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022).



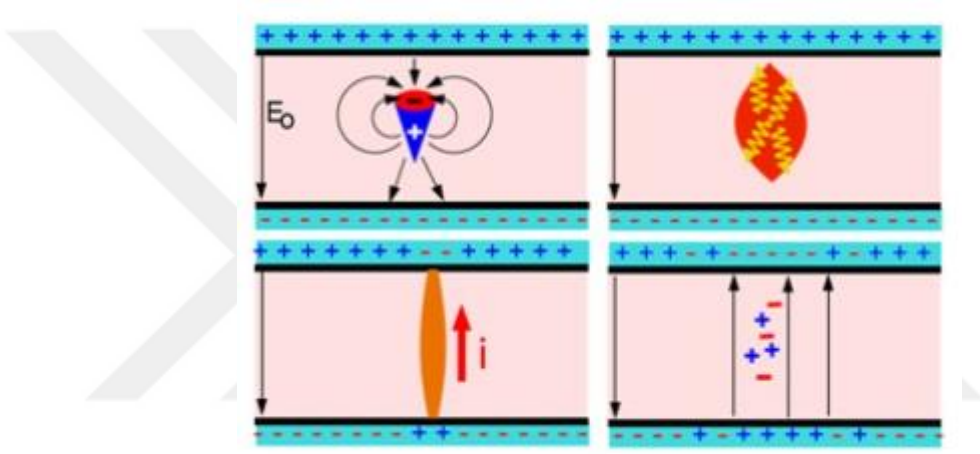
Şekil 2.17 Çığ (Avalanche) modunun şematik gösterimi

(https://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge, 2022)

Streamer çalışma modunda uygulanan elektrik alan büyüktür ve buna bağlı olarak elektron kazancı 10^8 'e kadar çıkabilir. İkincil iyonizasyon, gaz bozuluncaya ve sürekli deşarj gerçekleşene kadar devam eder. Bu çalışma modunda üretilen ikincil elektron-iyon çiftlerinin yöneliminde fotonlarda etkili olduğu için, oluşan çığın enine bir şekilde

yayılmasına neden olur. Bu çalışma modunda sinyal genlikleri 100-200 miliVolt mertebesinde. Dirençli elektrotun nispeten uzun gevşeme süresi nedeniyle, olay hızının çok büyük olduğu çarpıştırıcı deneylerinin çoğunda bu mod uygun değildir, ancak kozmik ışın ve düşük hızlı hızlandırıcı deneyleri için yeterlidir (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022).

RPC ile yapılan tüm deneyler bu modlarla çalışsa da, bu iki mod arasında keskin bir sınır yoktur. Çığ modunda çalışan RPC, streamer da oluşturabilir. Bu olasılık elektronegatif gaz fraksiyonunun artmasıyla azalır (https://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf, 2022).



Şekil 2.18 Streamer modun şematik yapısı (Lippmann ve Riegler 2003)

2.6.2.3 RPC dedektörlerinin kullanıldığı yerler ve önemi

Modern parçacık fiziği deneylerinin ve özellikle müon sistemlerinin vazgeçilmez parçalarından biri de RPC dedektörleridir. Bölüm 2.6.1’ de belirttiğimiz özellikler sayesinde RPC dedektörleri büyük, çok amaçlı deneylerde çokça kullanılan dedektörlerin başında gelir. Özellikle modern parçacık fiziği çalışmalarının yapıldığı CERN’de (Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi) bulunan büyük dedektörlerde müon ölçümleri için alt dedektör olarak RPC dedektörleri kullanılır. CERN’de alt dedektör olarak RPC’lerin kullanıldığı başlıca büyük dedektörler şunlardır:

- ATLAS (A Large Torodial Lhc Apparatus) dedektörü,
- CMS (Compact Muon Selenoid) dedektörü,
- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) dedektörü.

Dünya’da CERN dışında parçacık fiziği alanında çalışma yapan birçok araştırma merkezinde örneğin Amerika’ da, SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) ve FERMILAB (Fermi National Accelerator Laboratory), İtalya’da LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso), Japonya’ da KEK (Kō Enerugi Kasokuki Kenkyū Kikō) gibi birçok parçacık araştırma merkezlerinde de RPC’ler kullanılmaktadır.

RPC’ler, gelecek yüksek enerji fiziği deneylerinin kalorimetre sistemlerinde de aktif ortam olarak yerini alacaklardır. CALICE çalışma grubu (<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CALICE/WebHome>, 2022) tarafından geliştirilen Dijital Hadron Kalorimetresi (DHCAL) (Adams vd. 2016), 1 cm²’lik hücrelerle elektromanyetik ve hadronik etkileşimleri günümüze kadar kaydedilen en yüksek konum hassasiyetiyle ölçmeyi başaran görüntüleyici kalorimetre sistemidir (Bilki vd. 2008, Bilki vd. 2009a, Bilki vd. 2009b, Bilki vd. 2009c, Zhang vd. 2010, Bilki vd. 2012, Repond vd. 2012, Bilki vd. 2013, Freund vd. 2016, Chefdeville vd. 2019).

Çizelge 2.2 Alt dedektör olarak RPC’lerin kullanıldığı bazı büyük deneyler

Deneyler	Uygulama	Elektrot Materyali	Gaz Boşluk Sayısı	Gaz Boşluk Genişliği (mm)	Çalışma Modu	Kaynaklar
BESIII	Trigger	Bakalit	1	2	Streamer	Ablikim vd. (2010)
BABAR	Trigger	Bakalit	1	2	Streamer	Aubert vd. (2013)
ATLAS	Trigger	Bakalit	1	2	Avalanche	Atlas Collaboration (2021)
CMS	Trigger	Bakalit	2	2	Avalanche	Pugliese vd. (2014)
ALICE (muon)	Trigger	Bakalit	1	2	Streamer	Bianchi vd. (2019)
ALICE	Timing	Cam	10	<1	Avalanche	Peskov (2012)
HARP	Timing	Cam	4	0.3	Avalanche	Bogomilov vd. (2003)
STAR	Timing	Cam	6	0.22	Avalanche	Llope vd. (2012)
BELLE	Trigger	Cam	2	2	Streamer	Yamaga vd. (2000)
OPERA	Trigger	Bakalit	1	2	Streamer	<u>Bergnoli</u> vd. (2005)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 RPC Üretiminde Gerekli Olan Malzemeler

Bir RPC dedektörünün üretebilmesi için öncelikle bakalit veya camdan yapılmış elektrotlara ihtiyaç vardır. Bu elektrotların yüzey direncinin $0.8-1.5 \text{ M}\Omega/\text{BrK}$ aralığında olması gerekir. Bu yüzey direncini sağlayabilmek için ağırlıklı olarak grafit ya da akrilik boya kullanılır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda RPC'lerin cam elektrotları için biri yalıtkan diğeri iletken olan iki akrilik boyanın karışımı kullanılmıştır.

RPC üretiminde gerekli olan diğeri malzeme ise cam elektrotların üzerine konulduğu ve arasından gaz geçtiği RPC çerçevelerdir. Kalıba dökme ya da 3 boyutlu yazıcı kullanılarak bu çerçeveler üretilir. Tez çalışmaları kapsamında RPC dedektörü için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak RPC çerçeveleri üretilmiştir.

Elektrot ve çerçeveden sonra RPC üretiminde gerekli olan bir başka malzeme ise sinyal okuma kartlarıdır. Bu kartlar tek kanallı ya da çok kanallı olabilir. Çok kanallı sinyal okuma kartları sayesinde dedektörde pozisyon çözümlemesi yapılır. RPC dedektörlerinde ağırlıklı olarak çok kanallı sinyal okuma kartları kullanılır.

Ayrıca RPC dedektörünün üretiminde gerekli olan diğeri bir malzeme de voltaj kablodur. RPC dedektörlerinde, yüksek voltajlara dayanıklı olduğundan yaygın olarak koaksiyel kablo kullanılır.

3.1.1 Cam elektrot üretim işlemi

RPC üretme çalışmalarına öncelikle cam elektrot üretimiyle başlanılmıştır. Bu iş için $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ boyutlarında ve 2 mm kalınlığında normal pencere camı kullanılmıştır. Camların RPC üretimine uygun olup olmadığının test edilmesi için bu camların öz direnci ölçülmüştür ve camların öz direncinin $10^{13} \Omega \text{cm}$ mertebelerinde olduğu görülmüştür.

Özdirenç testini geçen camların yüzeyi, yüzey direnci yaklaşık $0.8-1.5 \text{ M}\Omega/\text{BrK}$ aralığında olacak şekilde bir boya karışımı ile kaplanmıştır. Camların bu boya ile kaplanması amacı, elektrotların yüzeyine uygulanan yüksek voltajın homojen olarak

dağılması ve bir iyonlaşma olayından sonra boşluğun kolayca yeniden şarj olmasını sağlamaktır.

Burada asıl önemli olan konu cam elektrotların yüzeyine uygulanan iletken boyanın elde edilme serüvenidir. Öncelikle cam elektrotların yüzey direncinin yaklaşık 0.8-1.5 M Ω /BrK aralığında olması kararlaştırılmıştır. Daha sonra bu yüzey direnç aralığını elde etmek için, çeşitli boyalar (Şekil 3.1) çeşitli oranlarda birbiriyle karıştırılarak cam yüzeylere uygulanmıştır.

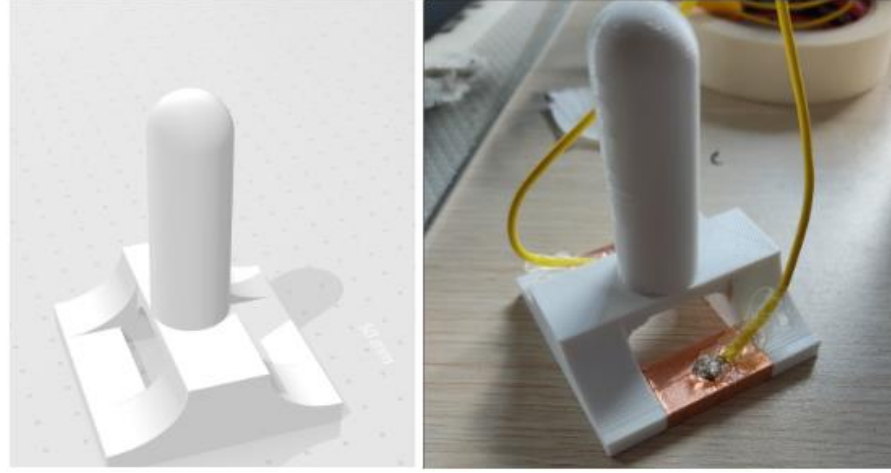


Şekil 3.1 Elektrot yapımında kullanılan aday boyalar

Elektrot üretme işleminde kullanılacak uygun boyaları ve uygun oranları tespit etmek için öncelikle bu boyaların kendi dirençlerinin (özdirençlerinin) bilinmesi gerekir. Bu yüzden elektrot üretme işleminde kullanılacak aday boyalar hava tabancası kullanılarak camlara uygulanmıştır (Şekil 3.2). Daha sonra yüzey ölçüm cihazıyla (Şekil 3.3) bu boyaların dirençleri ölçülmüştür.



Şekil 3.2 Cam elektrot üretmek için kullanılan hava tabancası ve camlara uygulanan aday boyalar



Şekil 3.3 Yüzey ölçüm cihazı

Çizelge 3.1 Kullanılacak aday boyaların yüzey dirençleri

Boya Numarası	Kullanılacak Aday Boya	Yüzey Direnci
A1	Amsterdam	1.6 GΩ
A2	Eko	1 GΩ
A3	Deko	200 GΩ
A4	Indian Ink	50 kΩ

Çizelge 3.1’ teki veriler neticesinde A1, A2 ve A4 numaralı boyaların yüzey dirençleri daha düşük olduğundan elektrot üretiminde kullanılmaları uygundur. Sonraki aşama ise uygun boya oranlarının bulunmasıdır.

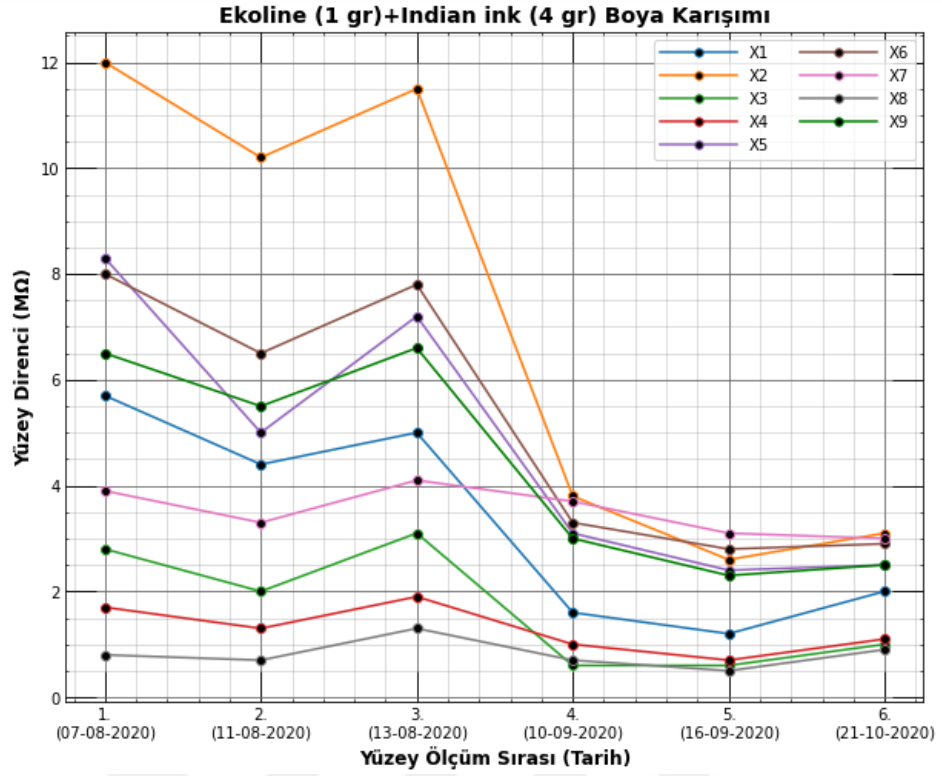
Boyalardan biri (A4) diğer boyalara (A1) ve (A2) kıyasla daha iletken olması nedeniyle, bu iletken boya temel alınarak diğer iki boyayla çeşitli oranlarda karıştırılarak bir karışım elde edilmiştir.

Öncelikle Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 4 gr oranlarında boya karıştırılarak toplamda 9 cam numuneye uygulanmıştır. Daha sonra Amsterdam markalı boyadan 1 gr ile Indian Ink markalı boyadan 4 gr oranlarında boya karıştırılarak toplamda 7 cam numuneye uygulanmıştır. Cam numuneler 10 cm x 10 cm boyutlarındadır ve tez kapsamında yapılan RPC dedektörlerinin aktif alanı 9 cm x 9 cm olduğu için camların 9 cm x 9 cm kısmı boyanmıştır (Şekil 3.4).

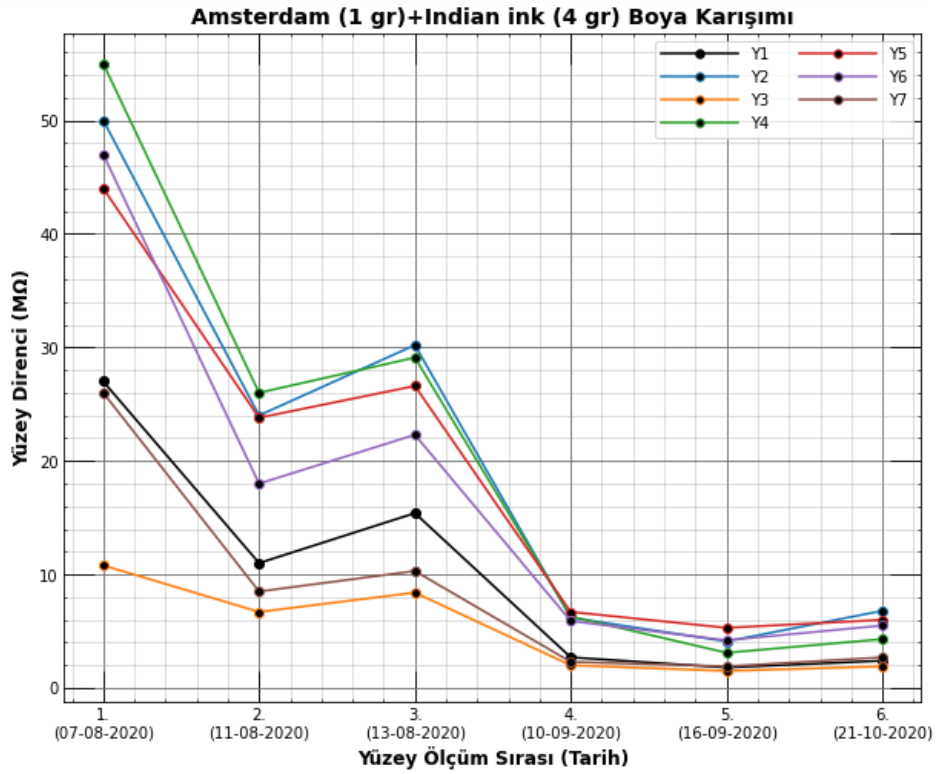


Şekil 3.4 Cam elektrot üretme çalışmaları

Elektrot olarak üretilen bu camlar 3 ay boyunca gözlem altında tutulmuş ve yüzey dirençlerinde oluşan değişiklik Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'daki grafikler neticesinde bazı cam numunelerin yüzey direnci bazı günler artarken bazı günler azaldığı görülmüştür. Bunun temel nedeni kullanılan boyaların, su bazlı boyalar olmasından kaynaklı olarak ortamdaki nemden etkilenmesidir. Yağmurlu günlerde havadaki nem oranı arttığı için cam numunelerin yüzey direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmadan çıkan diğer sonuç ise aynı boya oranı ile boyanan cam numunelerin farklı yüzey dirençlerine sahip olmasıdır. Bunun sebebi ise cam numunelerin üzerindeki boya miktarının farklı olmasıdır. İlk yapılan elektrot üretme çalışmalarında bu durum gözardı edilmiştir fakat daha sonra yapılan elektrot üretme çalışmalarında bu durum göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.5 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri



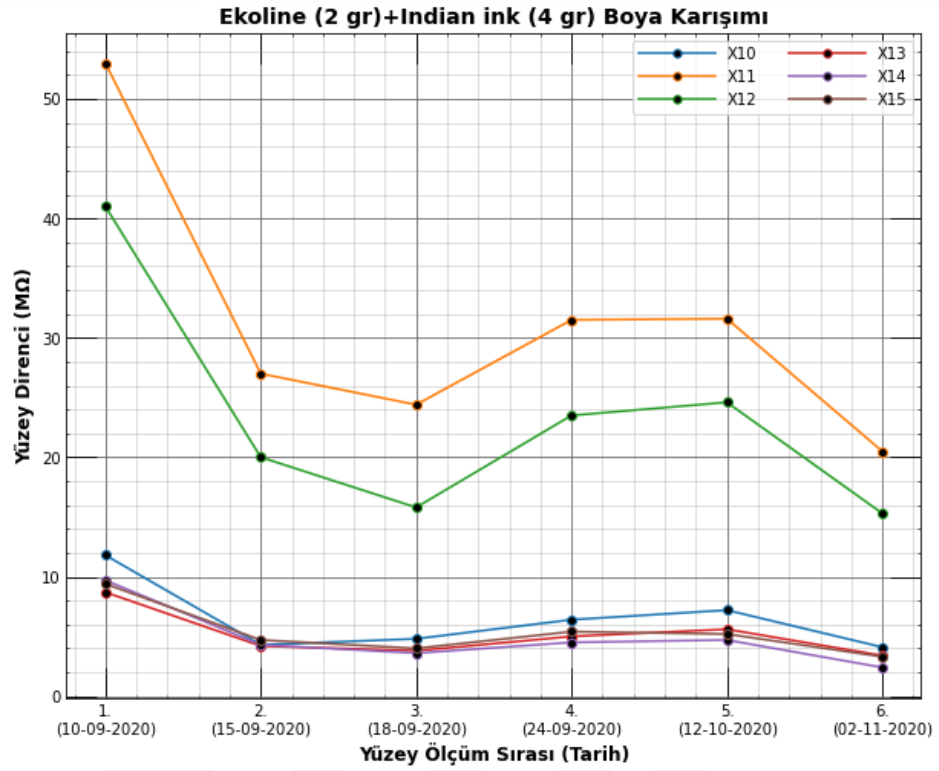
Şekil 3.6 Amsterdam ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri

Cam elektrot üretme çalışmalarında, cam numunelerin yüzey direnci kadar diğer önemli bir konu ise bu numunelerin yüzey kalitesidir. Çünkü bu numunelerden yapılan RPC dedektörlerinin, uzun süre kullanılabilmesi için cam numunelerin yüzeyinin kaliteli olması gerekir. Kaliteden kasıt ise, cam numune yüzeylerinin pürüzsüz olması, uygulanan boyanın homojen dağılması, boyamadan sonraki süreçte boyanın bütünlüğünü koruması ve cam numunelerin fiziki darbelere karşı dayanıklı olmasıdır. Bu çerçevede Amsterdam markalı boyadan yapılan numunelerin yüzeylerindeki boyada oluşan delikler ve kırıklıklar nedeniyle bu boya ile yapılan çalışmalara son verilmiştir (Şekil 3.7).

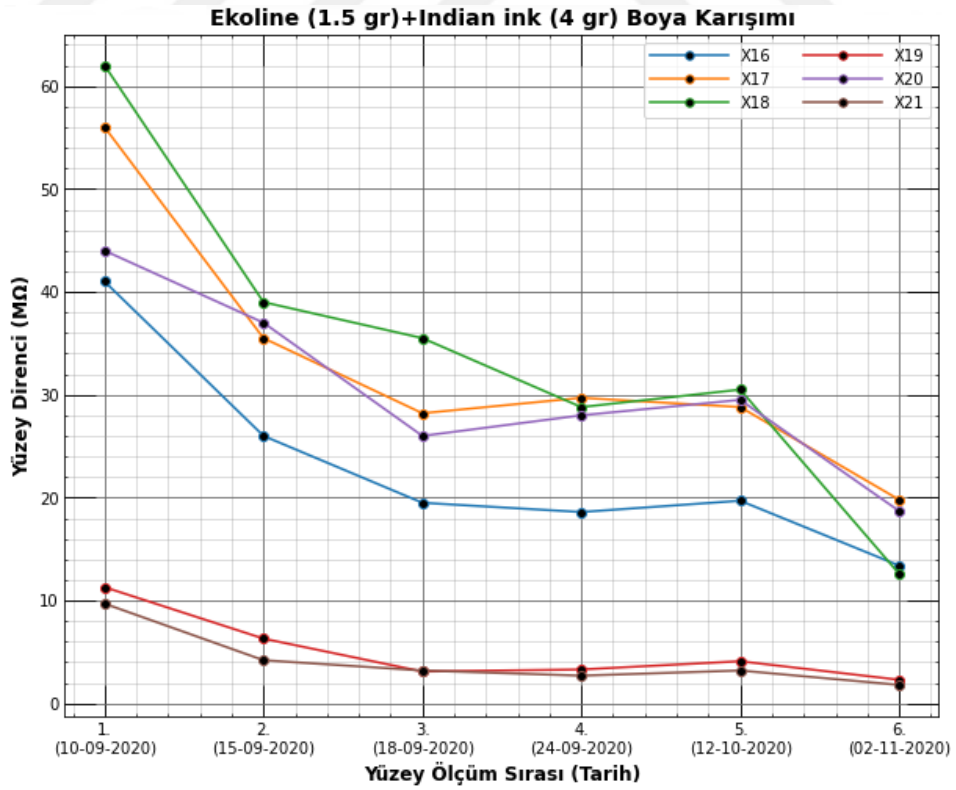


Şekil 3.7 Amsterdam markalı cam numunelerde oluşan delikler

Sonuçlar neticesinde en uygun boyanın Ekoline markalı boya olduğuna karar verilmiştir. Bunun yanında en uygun boya oranını tespit etmek üzere cam elektrot üretme çalışmalarına devam edilmiştir. İkinci versiyon cam elektrot üretme çalışmasında Ekoline markalı boyadan 2 gr ve Indian Ink markalı boyadan ise 4 gr alınarak birbiriyle karıştırılıp 6 tane cam numuneye uygulanmıştır (Şekil 3.8). Üçüncü versiyon cam elektrot üretme çalışmasında ise Ekoline markalı boyadan 1.5 gr ve Indian Ink markalı boyadan ise 4 gr alınarak birbiriyle karıştırılıp 6 cam numune boyanmıştır (Şekil 3.9). İkinci ve üçüncü versiyon cam elektrot üretme çalışmasında istenilen sonuç elde edilemediği için yeni bir karışım oranı belirlenmiştir. Yeni belirlenen karışım oranında Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 8 gr alınarak birbiriyle karıştırılıp toplamda 10 tane cam numuneye uygulanmıştır.

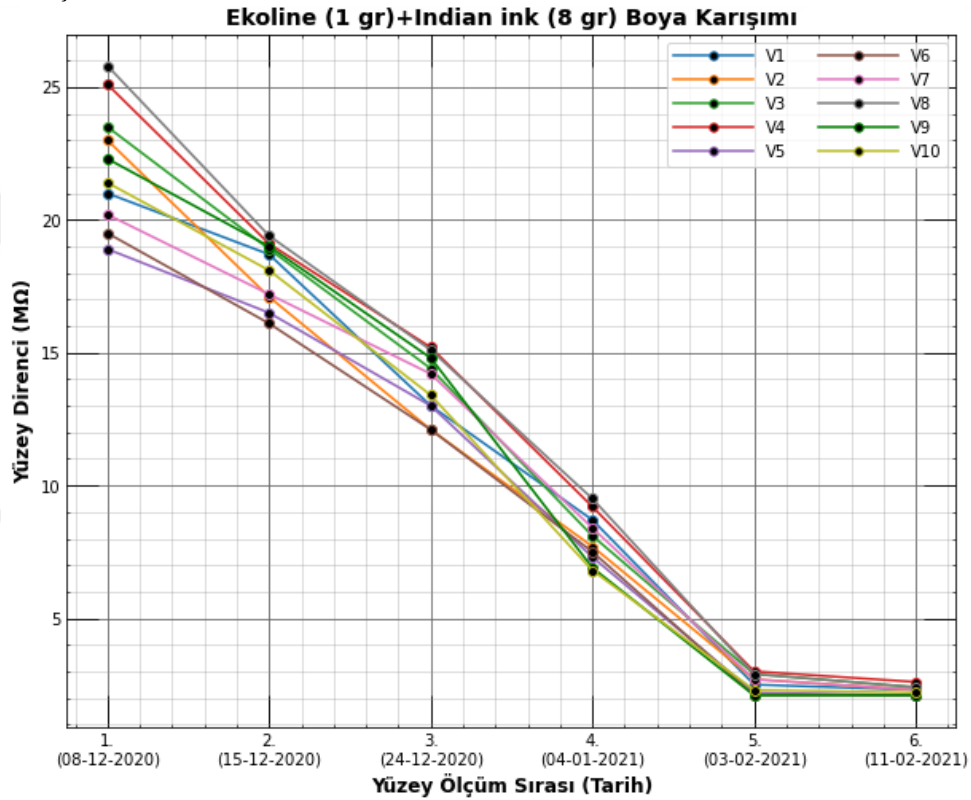


Şekil 3.8 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan ikinci versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri



Şekil 3.9 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan üçüncü versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri

Tüm bu çalışmalarda elde edilen deneyimler neticesinde, cam elektrotların ortamdaki nemden etkilenmemesi için Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 8 gr alınarak boyanan camlar temiz odada muhafaza edilmiştir. Temiz odada oda sıcaklığında muhafaza edilen bu cam elektrotlar 3 ay boyunca gözlem altında tutulmuş olup bu süre zarfında gözlem altında tutulan cam elektrotların yüzey dirençleri ölçülmüştür. Şekil 3.10'da gösterilen grafiğe dikkatlice bakıldığında ortamdaki nemden kaynaklı cam elektrotların yüzey direncindeki dalgalanmaların ortadan kalktığı gözlenmiştir.



Şekil 3.10 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan dördüncü versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri

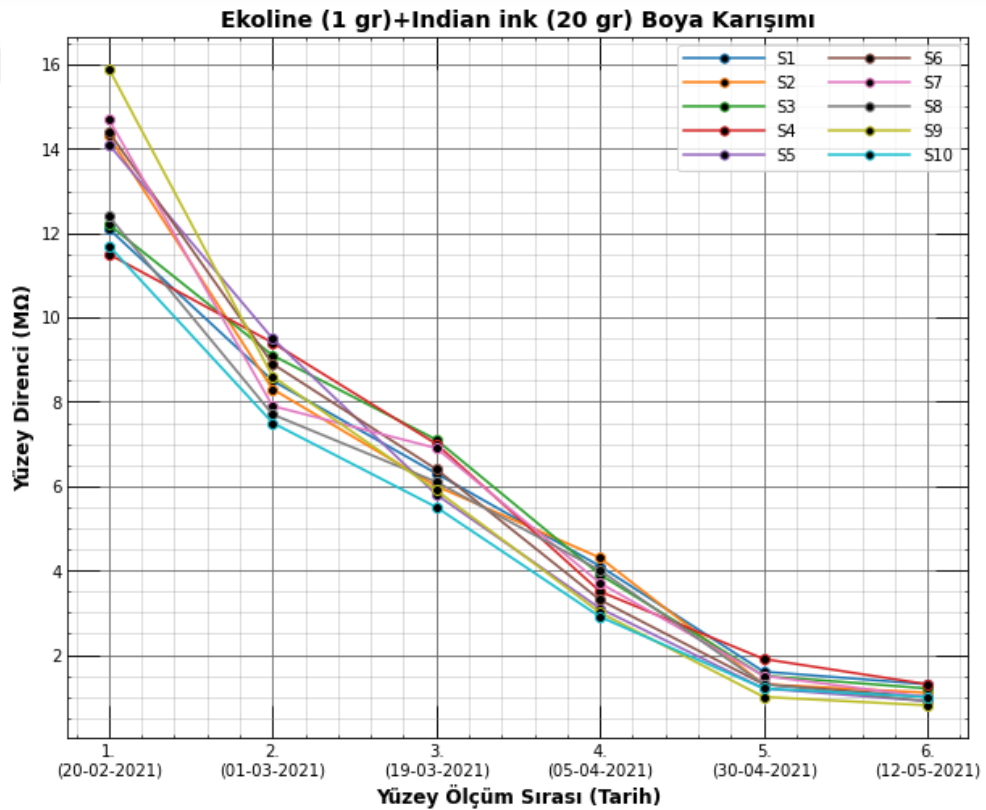
Elektrot üretme çalışmalarında su bazlı akrilik boya kullanıldığı için başlangıçta cam elektrotlar yüksek yüzey direncine sahiptirler. Zamanla cam elektrotların yüzeyine kaplanan boyaların içindeki su miktarı azaldığı için cam elektrotların yüzey direnci azalmakta ve belli bir noktada bu yüzey dirençleri sabitlenmektedir.

Tüm bu bilgiler ışığında Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 8 gr boya karıştırılarak elde edilen karışımın uygulandığı cam elektrotların yüzey direnci

başlangıçta 18-25 $M\Omega/BrK$ aralığındayken 3 ayın sonunda 2 $M\Omega/BrK$ değerinde sabitlenmiştir (Şekil 3.10). Bu tez çalışmasında hedeflenen yüzey direncinden (0.8-1.5 $M\Omega/BrK$) uzak bir sonuç elde edildiği için bu elektrotlar RPC üretiminde kullanılmamıştır.

Cam elektrot üretme çalışmalarının son versiyonunda Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 20 gr alınarak hazırlanan karışım 10 tane cam elektroda uygulanmıştır. Benzer şekilde temiz odada ve oda sıcaklığında 3 ay süre boyunca gözlem altında tutulan bu cam elektrotların yüzey dirençleri, bu zaman zarfında belirli günlerde ölçülmüştür.

Şekil 3.11’deki grafik neticesinde en uygun boya oranının Ekoline markalı boyadan 1 gr ve Indian Ink markalı boyadan 20 gr alınarak hazırlanan karışım olduğu görülmektedir. Başlangıç aşamasında yüksek yüzey direncine sahip olan bu cam elektrotlar zamanla istenilen yüzey direnç aralığına (0.8-1.5 $M\Omega/BrK$) ulaşmıştır (Şekil 3.11). Hedeflenen yüzey direnç aralığına ulaşan bu elektrotlar ile RPC dedektörleri yapılmıştır.

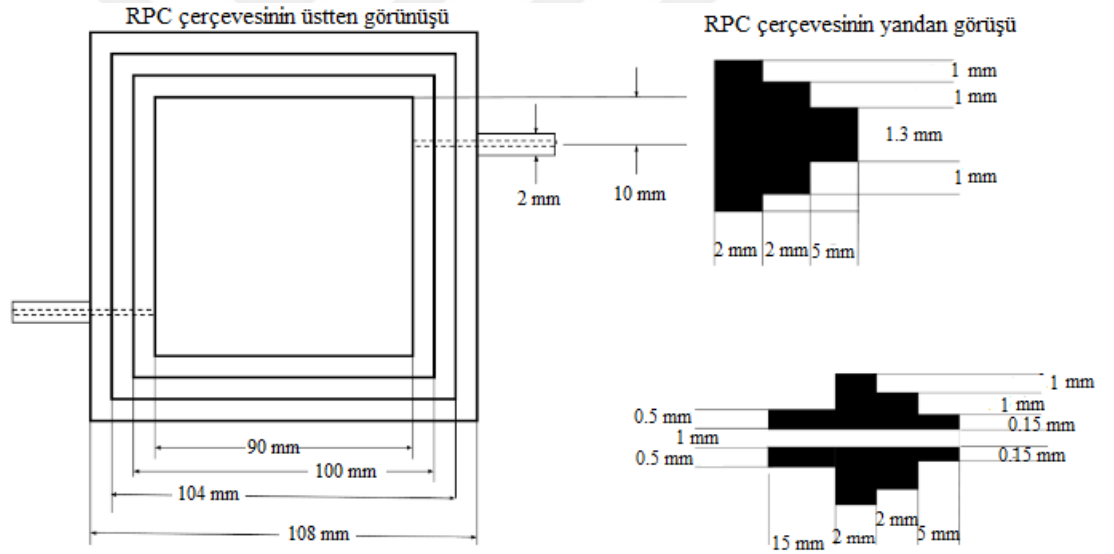


Şekil 3.11 Ekoline ve Indian ink markalı boyaların karışımıyla boyanan son versiyon cam numunelerin belirli zaman dilimlerinde ölçülen yüzey dirençleri

3.1.2 RPC çerçevelerinin üretimi

RPC yapmak için cam elektrot üretimi devam ederken bir yandan da bu cam elektrotların üzerine konulacağı çerçevelerin yapımına başlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi kalıba döküm yoluyla ya da 3 boyutlu yazıcı kullanılarak bu çerçeveler üretilir. Bu tez kapsamında 3 boyutlu yazıcı kullanılarak RPC çerçeveleri üretilmiştir.

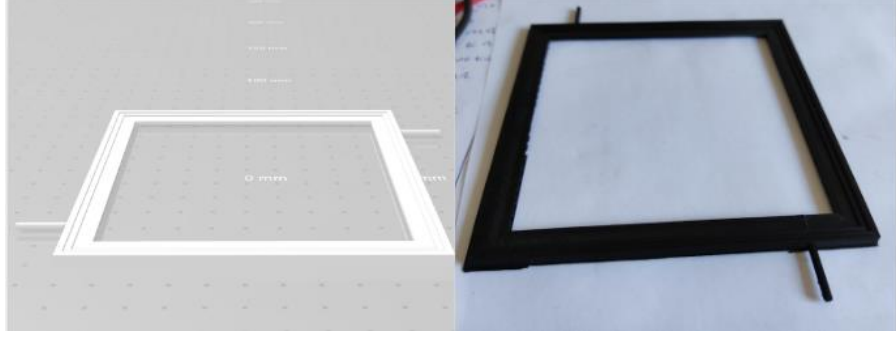
Kullanılan cam elektrotlar 2 mm kalınlığında ve 10 cm x 10 cm boyutlarında oldukları için, çerçeveler de buna göre dizayn edilmiştir. RPC çerçevelerinin gaz boşlukları 1.3 mm ve gaz giriş delikleri maksimum 1 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. RPC dedektörleri yapılırken gaz sızdırmazlığını sağlamak ve cam elektrotları sabitlemek için epoksi kullanılmıştır. Bu yüzden çerçevelerde epoksinin gireceği 2 mm'lik bir boşluk bırakılmıştır. Bu tez kapsamında üretilen RPC çerçevelerinin ayrıntılı tasarım parametreleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 RPC çerçevesinin tasarım parametreleri

RPC dedektörlerinde üretilen elektrik alanın homojen olarak dağılması, dedektör performansını doğrudan etkilediği için önemlidir. Bu elektrik alanın homojen dağılabilmesi gaz boşluğunun her tarafta aynı-homojen olmasına bağlıdır. Bu nedenle bu çerçeveleri üretirken ana parametrelere bağlı olacak şekilde bir kaç değişiklik yapılmıştır. İlk yapılan RPC çerçeveleri 3 boyutlu yazıcıda tek parça halinde basılmıştır ancak bu şekilde üretilen çerçevelerin destekleri tam olarak temizlenemediğinden

çerçevelerdeki gaz boşluk miktarı (1.3 mm) her yöne eşit olarak dağılamamıştır. (Şekil 3.13)



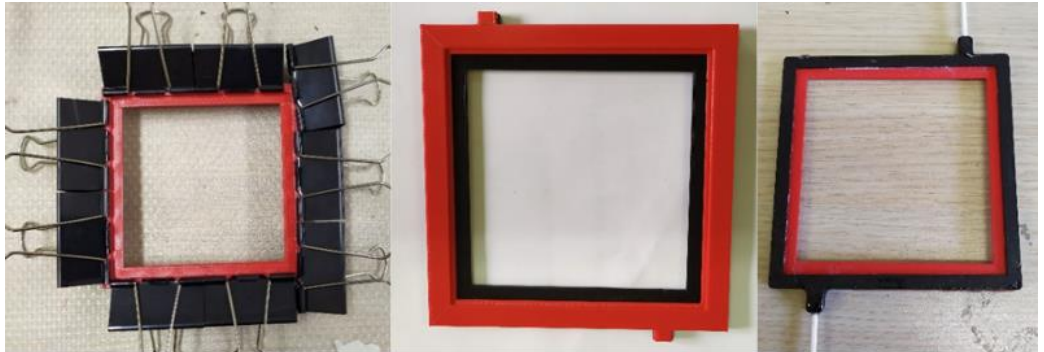
Şekil 3.13 Tek parça olarak 3 boyutlu yazıcıdan çıkan RPC çerçevesi

Yeni tasarlanan çerçeveler 2 parça halinde basılmıştır. Üç boyutlu yazıcının desteksiz bir şekilde bu çerçeveleri basabilmesi için bu yöntem uygulanmıştır. Bu şekilde basılan RPC çerçevelerindeki gaz boşluğunun 1.3 ± 0.05 mm olduğu ölçülmüştür. (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 İki parça olarak üretilen RPC çerçevesi

İki parça halinde üretilen bu çerçeveler daha sonra epoksi yardımıyla birleştirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 İki parçadan oluşan RPC çerçevesinin birleştirilmesi ve kullanıma hazır hale getirilmesi

3.1.3 RPC sinyal okuma kartlarının üretimi

RPC üretiminde gerekli olan bir başka malzeme ise sinyal okuma kartlarıdır. Bu tez kapsamında RPC dedektör verimliliği ile ilgilenildiği için tek kanallı sinyal okuma kartı üretilmiştir. Sinyal kartını üretebilmek için 600 µm kalınlıkta 9 cm x 9 cm boyutlarında bakır ve 10 cm x 10 cm x 1.5 mm boyutlarında devre basım kartı (Flame Retardant-FR4) kullanılmıştır. Bu devre basım kartında ön noktadan kontak almak amacıyla 3 mm çapında bir delik açılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Tek kanallı sinyal okuma kartında kullanılan malzemeler

Daha sonra bu iki parça epoksi yardımıyla birleştirilip RPC dedektörü için kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Tek kanallı sinyal okuma kartının bitmiş hali

3.1.4 RPC’de kullanılan gazlar

Günümüz RPC dedektörleri tetrafloretan ($R134a - C_2H_2F_4$), izobütan ($iso - C_4H_{10}$) ve sülfür hekzaflorürden (SF_6) oluşan gaz karışımıyla çalıştırılır. Bu gaz karışımlarının yüzdeleri değişiklik gösterebilir fakat ağırlıklı olarak tetrafloretan kullanılır.

Bir sera gazı, Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) göre sınıflandırılır. Bu potansiyel, atmosferde gaz tarafından tutulan ısıyı gösterir ve böylece sera etkisine katkıda bulunur. CO_2 ’nin GWP’si tanım gereği 1’e eşittir. Bunun yanı sıra, $C_2H_2F_4$ ve SF_6 ’nın GWP’leri sırasıyla 1430 ve 22800’dür (Bianchi vd. 2019).

Görüldüğü gibi günümüz RPC dedektörlerinde kullanılan bu gazlar sera etkisi olan gazlardır. Bu nedenle son yıllarda yapılan düzenlemeler nedeniyle özellikle tetrafloroetan ve sülfür hekzaflorür gazının üretimi kademeli olarak azaltılmıştır (Bianchi vd. 2019).

Mevcut gazlarla 95% üzerinde verimliliğe sahip olan RPC dedektörlerinin bu verimliliklerini koruyabilmesi için pek çok araştırma grubu çevre dostu RPC gazları üzerine çalışmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan standart ve hibrit RPC dedektörlerini, daha önce yapılmış RPC dedektörlerinin performansı ile karşılaştırmak amacıyla ilk önce CALICE DHCAL RPC gaz karışımı olan tetrafloretan 94.5% ($R134a - C_2H_2F_4$) - izobütan 5% ($iso - C_4H_{10}$) - sülfür hekzaflorür 0.5% (SF_6) kullanılmıştır. Çalışmanın çeşitli aşamalarında değişik oranlarda Argon - CO_2 karışımları da kullanılmıştır.

3.1.5 DC (Direct Current) güç kaynağı

Üretilen standart ve hibrit RPC’ler laboratuvarında bulunan CAEN markalı doğru akım (DC) güç kaynağıyla test edilmiştir. DC güç kaynağı polaritesi değiştirilebilen toplam 8 kanaldan oluşmaktadır. DC güç kaynağı maksimum 8000 Volt gerilim ve 3 mA akım üretir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 CAEN markalı DC güç kaynağı

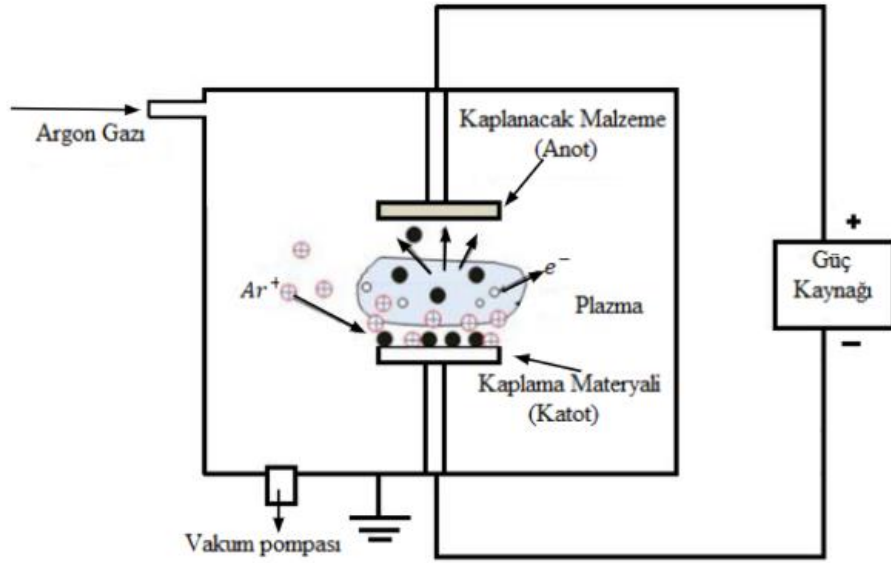
Laboratuvarda bulunan diğer bir güç kaynağı ise tek kanallı ve negatif kutuplu 50 bin Volt'luk voltaj üretebilen DC güç kaynağıdır. Bazı RPC dedektörlerinin daha yüksek voltajlarda test edilmesi amacıyla kullanılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 50 bin voltluk doğru akım (DC) gerilim kaynağı

3.1.6 Vakum odası ve saçırma metodu

Hibrit RPC üretiminde magnetron püskürtme metodu kullanılmıştır. Magnetron püskürtme metodu, kaplama malzeme (Target; Cu , TiO_2 , Al_2O_3 vb.) yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, atomların yüzeyden saçırılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların plazma fazına geçerek alttaş malzeme üzerine biriktirilmesi esasına dayanır (Şekil 3.20).



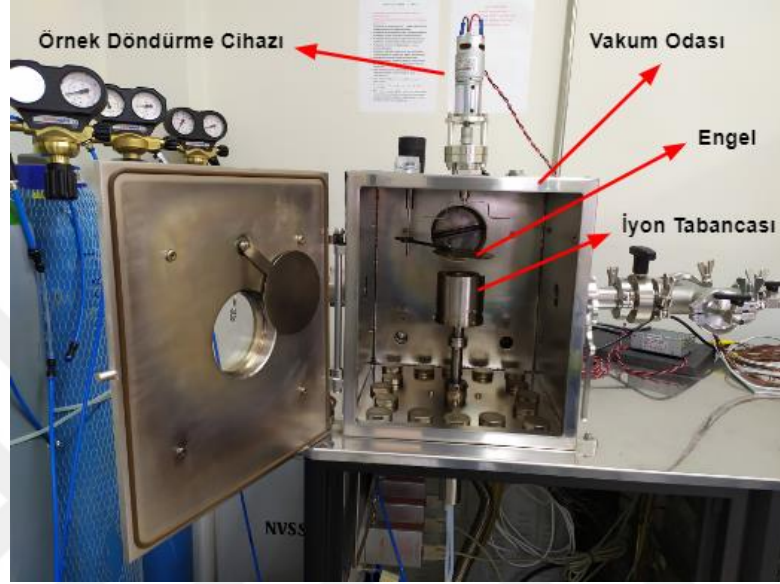
Şekil 3.20 Magnetron püskürtme işleminin şematik yapısı (Sönmezoğlu vd. 2012)

Laboratuvarda magnetron püskürtme makinası, biri anot diğeri katot olmak üzere karşılıklı yerleştirilmiş bir çift düzlemsel elektrottan oluşmaktadır. Katodun plazma ile teması halinde olan üst yüzeyinde kaplama malzemesi (Target), katodun altında ise magnet bulunur. Kaplama esnasında bu magnet kapalı sistem bir su soğutma cihazı ile soğutulur (Şekil 3.21). Soğutmanın amacı, hedef malzemeyi ve magneti kaplama sırasında aşırı ısınmaktan korumak ve bütünlüğünü sağlamaktır. Anot tarafa kaplanılacak malzeme yerleştirilir ve vakum odası 10^{-6} mbar mertebelerine kadar vakumlanır. Daha sonra vakum altına alınan vakum odası basınç 10^{-2} mbar mertebelerinde olacak şekilde argon gazı ile doldurulur.



Şekil 3.21 Kaplama yapılırken kullanılan soğutma cihazı

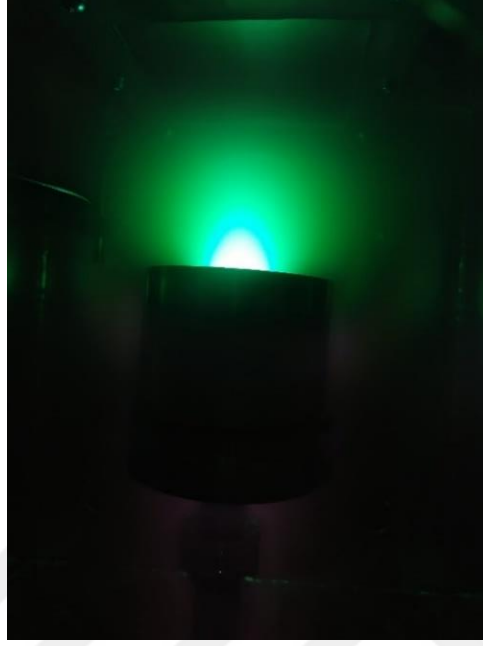
Kaplama malzemesinin türüne bağlı olarak ya doğru akım (DC) ya da radyo frekans (RF) voltaj uygulanır. Genellikle kaplama malzemesi iletken ise doğru akım, kaplama malzemesi yalıtkan ise RF voltaj uygulanır. Laboratuvarında bulunan magnetron püskürtme cihazında (Şekil 3.22) maksimum 600 V'luk gerilim uygulayan bir doğru akım (DC) kaynağı ve maksimum 500 Watt güç uygulayan RF güç kaynağı bulunmaktadır.



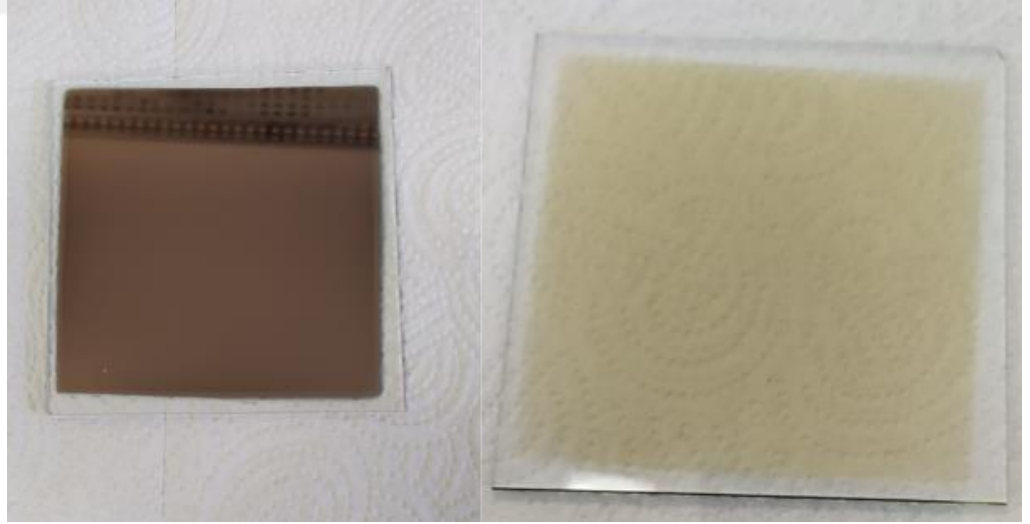
Şekil 3.22 Laboratuvarında kullanılan vakum odası ve magnetron püskürtme makinası

Magnetron püskürtme metodu çalışma mekanizması ile deneme amaçlı olarak cam yüzey üzerine bakır (Cu) ve kuvars cam yüzeyine alüminyum (Al) kaplama denemesi yapılmıştır (Şekil 3.23, Şekil 3.24). Bu kapsamda, ilk önce kaplama malzemesi (Cu) katot tarafta bulunan iyon tabancasının üzerine konulmuş, daha sonra anot tarafa ise kaplanacak malzeme (cam) konulmuştur. Bu işlemlerin ardından vakum odası 6×10^{-6} mbar mertebelerine kadar vakumlanmış olup istenilen vakum seviyesine inildikten sonra basınç 2.8×10^{-6} mbar olacak şekilde vakum odası Argon gazı ile doldurulmuştur. İyon tabancasına voltaj verilmeden önce kaplanacak malzemenin önüne engel bırakılmıştır. Bunun sebebi plazmanın yeterli güce ulaşmasından sonra malzemenin kaplanmasıdır. Ayrıca kaplanmanın homojen dağılabilmesi için kaplanılacak malzemeyi tutan örnek tutucunun belli bir devirde döndürülmesi gerekir (Şekil 3.22). Tüm bu aşamalardan sonra iyon tabancasına doğru akım kaynağından 360 V gerilim uygulanmıştır. Kaplama malzemesi (Cu, Al) iletken olmasına rağmen benzer işlemler RF güç kaynağı ile de

yapılmıştır. Aynı sürede doğru akım ile yapılan kaplamalar RF güç kaynağı ile yapılan kaplamalardan daha fazla malzeme ile kaplanmıştır.



Şekil 3.23 Kaplama esnasında oluşan plazma görüntüsü

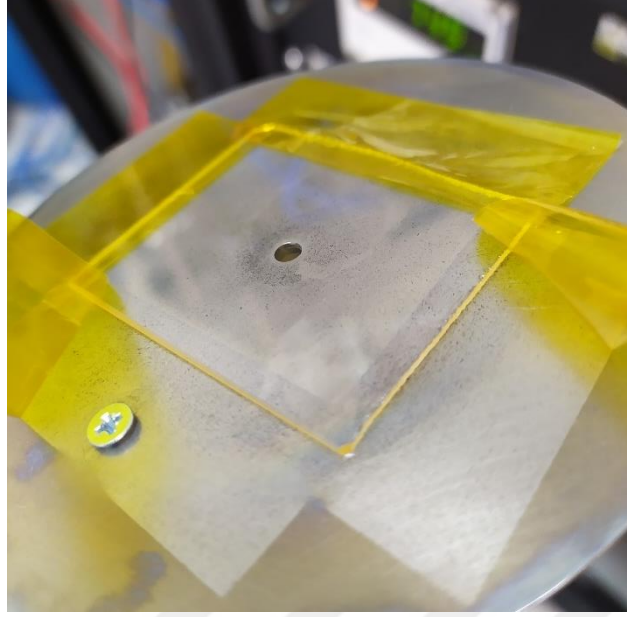


a)

b)

Şekil 3.24 Doğru akım (DC) voltaj kaynağı ve RF güç kaynağı ile bakır (Cu) kaplanan cam malzemeler

Bir başka kaplama denemesinde ise RF güç kaynağı kullanılarak kuvars malzeme üzerine alüminyum (Al) ince film kaplaması yapılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 RF güç kaynağı ile alüminyum kaplanan cam malzeme

İnce film kaplama deneylerinin amacı, magnetron püskürtme sisteminin performansını test etmek ve bu çerçevede hibrit RPC üretmek için RPC sinyal okuma kartını ikincil elektron verme özelliği yüksek olan TiO_2 ve Al_2O_3 malzemeleri ile kaplamaktır.

Bu amaçla Al_2O_3 kaplama malzemesi ile bir kaç deneme yapılmış fakat teknik aksaklıklardan kaynaklı olarak istenilen başarı sağlanamamıştır. Bu yüzden ince film kaplamaları, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkez’inde magnetron püskürtme yöntemiyle Al_2O_3 ile kaplanmıştır (<https://fotonik.gazi.edu.tr/>, 2022). Toplamda biri 500 nm diğeri 350 nm kalınlıkta olan iki tane RPC sinyal okuma kartı Al_2O_3 ile kaplanmıştır.

3.1.7 Saçtırma materyalleri

Tez kapsamında hibrit RPC üretmek amacıyla TiO_2 ve Al_2O_3 kaplama malzemeleri satın alınmıştır (Şekil 3.26). Hibrit RPC üretiminde bu malzemelerin kullanılmasının temel nedeni, malzemelerin ikincil elektron verme özelliklerinin yüksek olmasıdır. Bu kapsamda magnetron püskürtme yöntemi kullanarak RPC sinyal okuma kartının yüzeyi TiO_2 ve Al_2O_3 ile kaplanması amaçlanmıştır (Şekil 3.27).



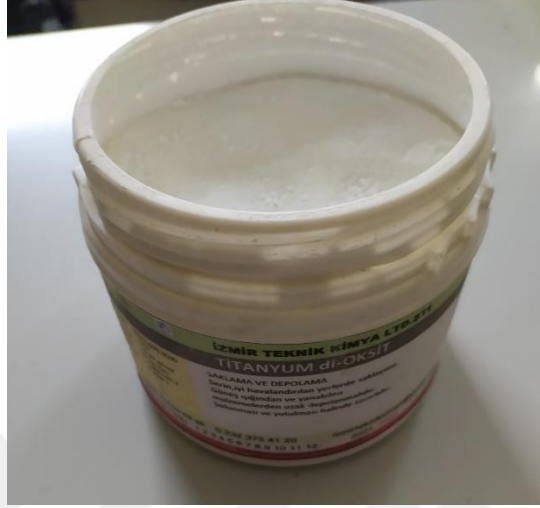
Şekil 3.26 Kaplama malzemeleri

İlk ince film kaplamaları, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde magnetron püskürtme yöntemiyle yapılmıştır. Bu merkezde biri 500 nm diğeri 350 nm kalınlıkta olan iki tane Al_2O_3 kaplaması yapılmıştır. Farklı kalınlıkta ince film kaplama yapılmasının amacı Al_2O_3 kalınlığının ikincil elektron üretme üzerindeki etkisini görmek ve uygun kaplama kalınlığını saptamak amacıyla ilk çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27 Al_2O_3 ile kaplanmış sinyal okuma kartı

Tez kapsamında yapılan diğer hibrit RPC dedektörlerinde ise TiO_2 kaplamalı anot yüzeyler kullanılmıştır. Laboratuvarımızda gerçekleştirilen kaplamalarda, toz halindeki TiO_2 (Şekil 3.28) etanol içinde çözünmüş ve daha sonra hava tabancası kullanılarak RPC sinyal okuma kartlarının yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 3.29).



Şekil 3.28 Hibrit RPC üretmek amacıyla kullanılan toz Titanyum Dioksit (TiO_2)

Birinci versiyon RPC dedektörünün sinyal okuma kartı 0.5 mg/cm^2 TiO_2 ile kaplanmıştır. Daha sonra ikinci versiyonda RPC sinyal okuma kartı 1 mg/cm^2 TiO_2 ile kaplanmıştır. Son ve üçüncü versiyonda ise RPC sinyal okuma kartı 0.15 mg/cm^2 TiO_2 ile kaplanmıştır. Burada da aynı şekilde TiO_2 kalınlığının ikincil elektron çoklama yeteneği üzerindeki etkisini anlamak için farklı kalınlıkta TiO_2 ile kaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.29 Temiz RPC sinyal kartı (Solda) ve Titanyum Dioksit (TiO_2) kaplanmış RPC sinyal kartı (Sağda)

3.2 RPC Dedektörlerinin Üretimi

Bu tez kapsamında ilk aşamada standart çift camlı RPC dedektörü üretilmiştir. Bu işlem için öncelikle uygun yüzey direncine sahip cam elektrotlar tespit edilmiştir. Bu dedektörün üretiminde kullanılan cam elektrotların yüzey direnci $0.8-1.5 \text{ M}\Omega/\text{BrK}$ aralığındadır. Daha sonra çift bileşenli epoksi (Şekil 3.30) kullanılarak bu cam elektrotlardan bir tanesi RPC çerçevesinin üzerine yapıştırılmış ve epoksinin kuruması için bir gün boyunca beklenilmiştir. Bir sonraki gün benzer işlemler diğer cam elektrot için tekrarlanmıştır (Şekil 3.31).

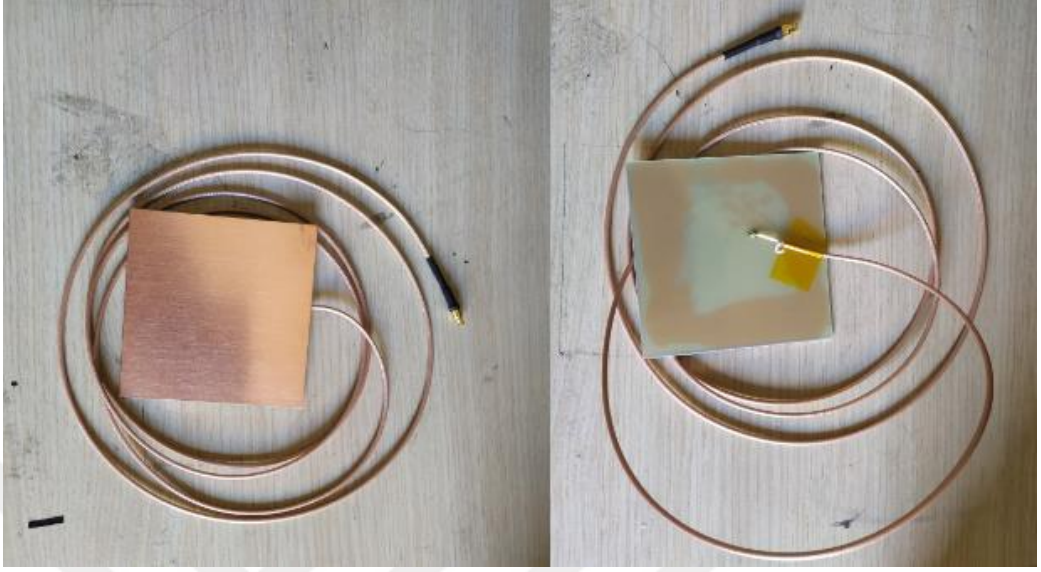


Şekil 3.30 RPC elektrotlarının birleştirilmesini ve gaz sızdırmazlığını sağlamak için kullanılan çift bileşenli epoksi



Şekil 3.31 Standart çift camlı RPC dedektörü

Standart çift camlı RPC dedektörlerinde sinyal okuma kartı dedektörün dışında olduğu için tek kanallı bağımsız bir sinyal okuma kartı üretilmiştir (Şekil 3.32).

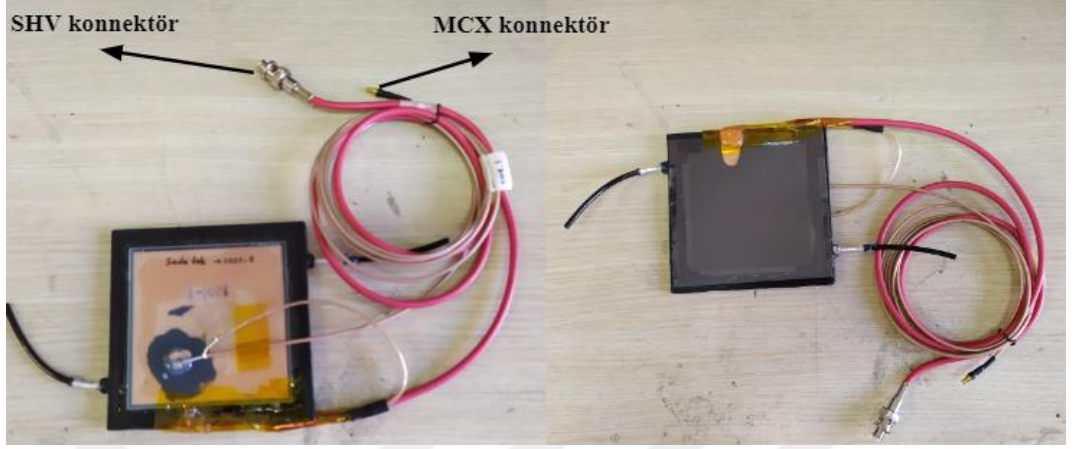


Şekil 3.32 Standart çift camlı RPC sinyal okuma kartı

Standart çift camlı RPC üretim ve testlerinden sonra bu tezin de temel dayanağını oluşturan tek camlı RPC üretimine geçilmiştir. Bu kapsamda ilk aşamada, anot yüzeyinde hiçbir şey kaplı olmayan sade tek camlı RPC dedektörü üretilmiştir. Bu RPC dedektörünü üretmek için bir tane cam elektrot ve bir tanede sinyal okuma kartı kullanılmıştır. Öncelikle sinyal okuma kartı RPC çerçevesine epoksi yardımıyla yapıştırılıp bir gün boyunca epoksisinin kuruması için beklenilmiştir. Epoksi kuruduktan sonra sinyal okuma kartına bir ucunda MCX (Micro Coaxial Connector) konnektör olan bir sinyal alma kablosu yapıştırılmıştır. Daha sonra sinyal okuma kartı ile konnektör arasında bağlantı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Çünkü tek camlı RPC dedektörlerinde sinyal okuma kartı dedektöre gömülü olduğu için cam elektrot takılmadan önce bu kontak kontrolünün yapılması gerekmektedir.

Sinyal okuma kartının takılıp kontak kontrolünün yapılmasında sonra RPC çerçevesine cam elektrot yapıştırılmıştır. Epoksinin kuruması amacıyla bir gün beklendikten sonra gaz kaçak testine geçilmiştir. Standart çift camlı RPC dedektöründe gaz kaçak tespitinde kullanılan yöntemin aynısı bu kez de sade tek camlı RPC dedektörünün gaz kaçak testi

için yapılmıştır. Gaz kaçak testini başarıyla geçen RPC dedektörlerini kullanıma hazır hale getirmek amacıyla voltaj kablosu bağlanmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 Sade tek camlı RPC dedektörü

Anot yüzeyleri Al_2O_3 ve TiO_2 ile kaplanmış olan RPC dedektörlerinin üretimi de standart tek camlı RPC üretim prosedürünü takip ederek gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ve ışın testleri için üretilen RPC dedektörlerinin listesi aşağıda verilmiştir. RPC dedektörleri parantezler içindeki uluslararası kısa isimleri ile adlandırılmışlardır.

1. Standart çift camlı RPC (2-glass)
2. Standart tek camlı RPC (1-glass)
3. 500 nm Al_2O_3 kaplamalı anot yüzeyi olan tek camlı RPC (Al_2O_3_v1)
4. 350 nm Al_2O_3 kaplamalı anot yüzeyi olan tek camlı RPC (Al_2O_3_v2)
5. 1 mg/cm^2 yoğunluklu TiO_2 kaplamalı anot yüzeyi olan RPC (TiO_2_v1)
6. 0.5 mg/cm^2 yoğunluklu TiO_2 kaplamalı anot yüzeyi olan RPC (TiO_2_v2)
7. 0.15 mg/cm^2 yoğunluklu TiO_2 kaplamalı anot yüzeyi olan RPC (TiO_2_v3)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Üretilen RPC Dedektörlerinin Testleri

4.1.1 Gaz testleri

Üretilen RPC dedektörleri öncelikle gaz sızdırmazlık testine tabi tutuldu. Bu testler için gaz geçiş sistemi 5 cc/dak. gaz verecek şekilde ayarlandı. Bu işlemten sonra gazın çıkış ucu yüksek yoğunluklu (300000 centiStokes-cST) silikon yağına (Şekil 4.1.a) batırıldı ve bir dakika boyunca oluşan baloncuk sayısı tespit edildi (Şekil 4.1.b). Daha sonra gaz sistemine RPC dedektörü bağlandı (Şekil 4.1.c) ve bir dakika boyunca silikon yağında oluşan baloncuk sayısı tespit edildi. RPC dedektörünün bağlı olmadığı durumda sayılan baloncuk sayısı ile RPC dedektörünün bağlı olduğu durumdaki baloncuk sayısı birbirine eşit ise dedektörde gaz kaçağı yoktur sonucuna varıldı. Bu testi geçemeyen RPC dedektörlerinde gerekli iyileştirmeler yapıp gaz sızdırmazlığı sağlandı.



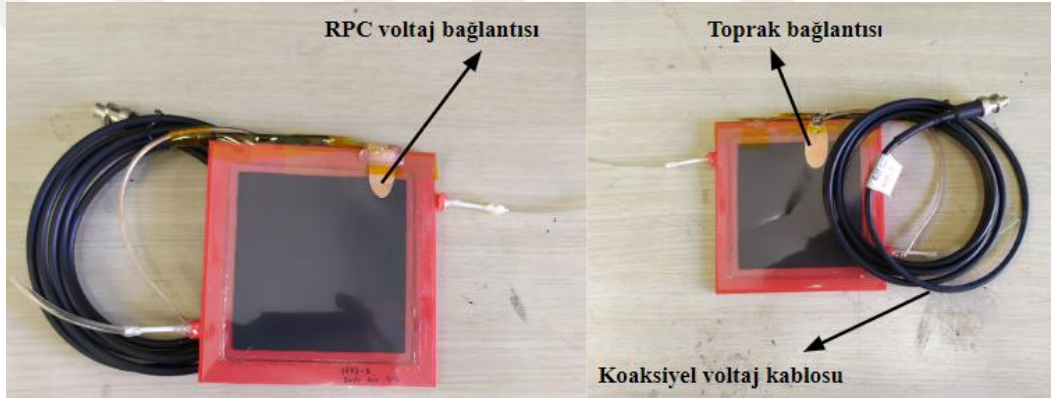
Şekil 4.1 RPC gaz sızdırmazlık testi sistemi fotoğrafları. a) Yüksek yoğunluklu silikon yağı, b) baloncuk sistemi ve c) test istasyonu fotoğrafları

4.1.2 Yüksek voltaj testleri

Gaz sızdırmazlık testini başarıyla geçen RPC dedektörlerini çalıştırmak için yüksek voltaja dayanıklı koaksiyel kablo kullanıldı. Kablonun bir ucunda SHV (Safe High Voltage) tipi konnektör diğer ucunda ise yapışkan tarafı iletken olan bakır bant bulunmaktadır. Koaksiyel kablonun canlı ve toprak uçlarına lehimlenen iletken bakır bant, RPC dedektörünün cam elektrotlarına, canlı uç bir elektrota ve toprak uç çift camlı

RPC dedektöründe diğer elektrota, tek camlı RPC dedektörlerinde sistem toprağına bağı olacak şekilde yapıştırıldı. Burada dikkat edilmesi gereken konu voltajın verildiğı canlı ucun, gaz giriş çıkışlarından uzak bir noktaya yapıştırılmasıdır.

Voltaj bağılantısı yapıldıktan sonra cam elektrotlara verilen voltajın homojen dağılıp dağılmadığını test etmek amacıyla RPC dedektörüne 100 volt'luk gerilim verildi. Daha sonra cam elektrotun çeşitli noktalarında voltaj ölçümü yapıldı. Voltaj ölçümünü başarıyla geçen RPC dedektörünün yüksek voltajlarda çalıştırılması durumunda oluşabilecek elektrik çarpmalarını engellemek amacıyla şeffaf yalıtkan bir malzeme (mylar) ile kaplandı. Son olarak bakır bant ile voltaj kablosunun canlı ucunun birleştiğı nokta silikon ile kapatıldı ve RPC dedektörü kullanıma hazır hale getirildi (Şekil 4.2).



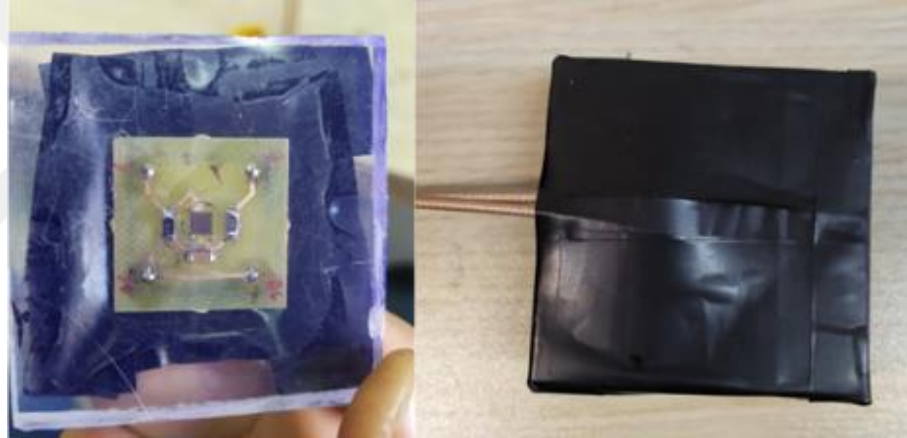
Şekil 4.2 Standart çift camlı RPC dedektörü

4.1.3 Kozmik müon testleri

Kullanıma hazır hale getirilen RPC dedektörleri kozmik müonlarla test edilmiştir. Bu test işleminde toplamda 4 adet tetikleme sayacı kullanılmıştır. Bu tetikleme sayaçlarından iki tanesi ışık geçirmez hazne içerisine yerleştirilmiş bir sintilatör ve fotoçoklayıcı tüpten oluşmaktadır (Şekil 4.3). Diğer iki tane tetikleme sayacı ise yine ışık geçirmez hazne içerisine yerleştirilmiş bir sintilatörden ve SiPM'den (silikon fotoçoklayıcı) oluşmaktadır (Şekil 4.4).

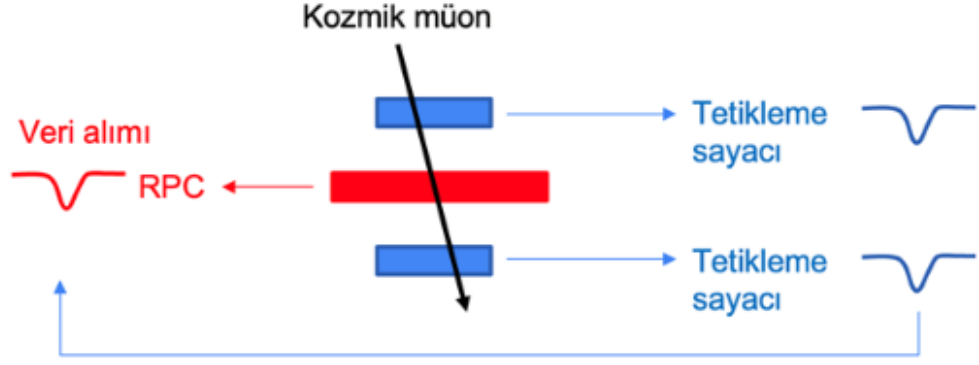


Şekil 4.3 Bir sintilatör ve fotoçoklayıcı tüpten oluşan tetikleme sayacı



Şekil 4.4 Bir sintilatör ve silikon fotoçoklayıcıdan oluşan tetikleme sayacı

Kozmik müonlarla test edilme aşamasında bir tetikleme sayacı üst kısımda, RPC dedektörleri orta kısımda ve diğer tetikleme sayacı da alt kısımda olacak şekilde RPC test istasyonu kurulmuştur (Şekil 4.5, Şekil 4.6). Şayet kozmik müon bu test istasyonundan geçtiğinde hem tetikleme sayaçlarında hem de RPC dedektörlerinde sinyal oluşturuyorsa yapılan RPC dedektörleri çalışıyor demektir.

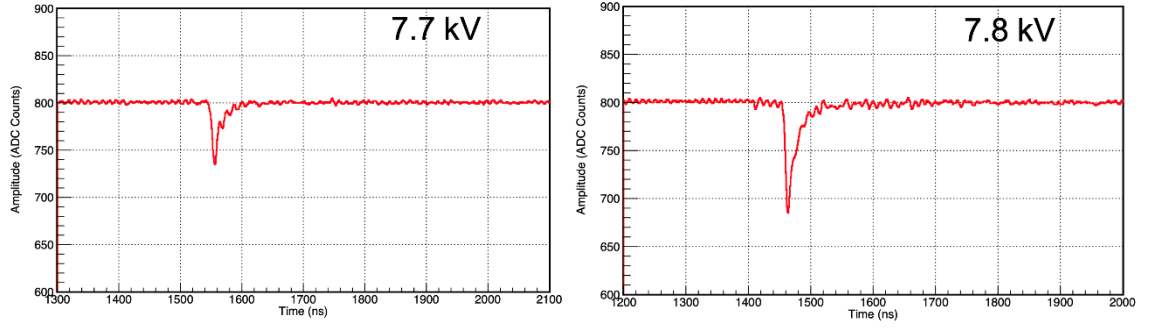


Şekil 4.5 Kozmik müon test istasyonun şematik yapısı



Şekil 4.6 Kozmik müon test istasyon kurulumu

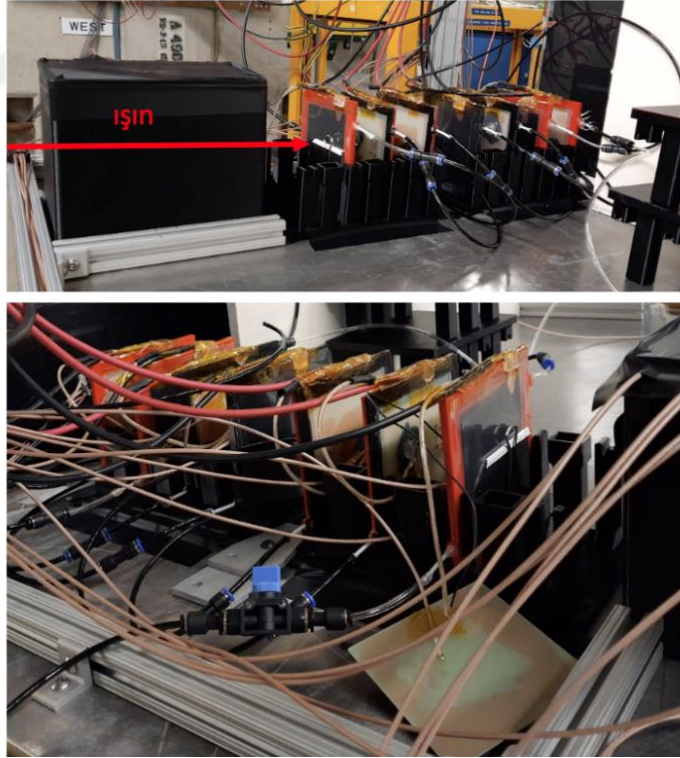
Şekil 4.7 TiO_2 _v1'in 7.7 kV ve 7.8 kV ile çalıştırılırken kaydedilen kozmik müon olaylarının dalga formlarına birer örnek göstermektedir. Laboratuvarımızda test edilen RPC dedektörlerinde Freon (R134a) gazı kullanılmıştır. Testlerde uzun süreli çalışma şartları altında gaz sızdırmazlığı, yüksek voltaj kararlılığı ve performans kararlılığı gözlenmiş ve belirgin bir problem tespit edilmemiştir.



Şekil 4.7 TiO_2_v1 'in 7.7 kV (sol) ve 7.8 kV (sağ) ile çalıştırılırken kaydedilen kozmik mion olaylarının dalga formlarına birer örnek

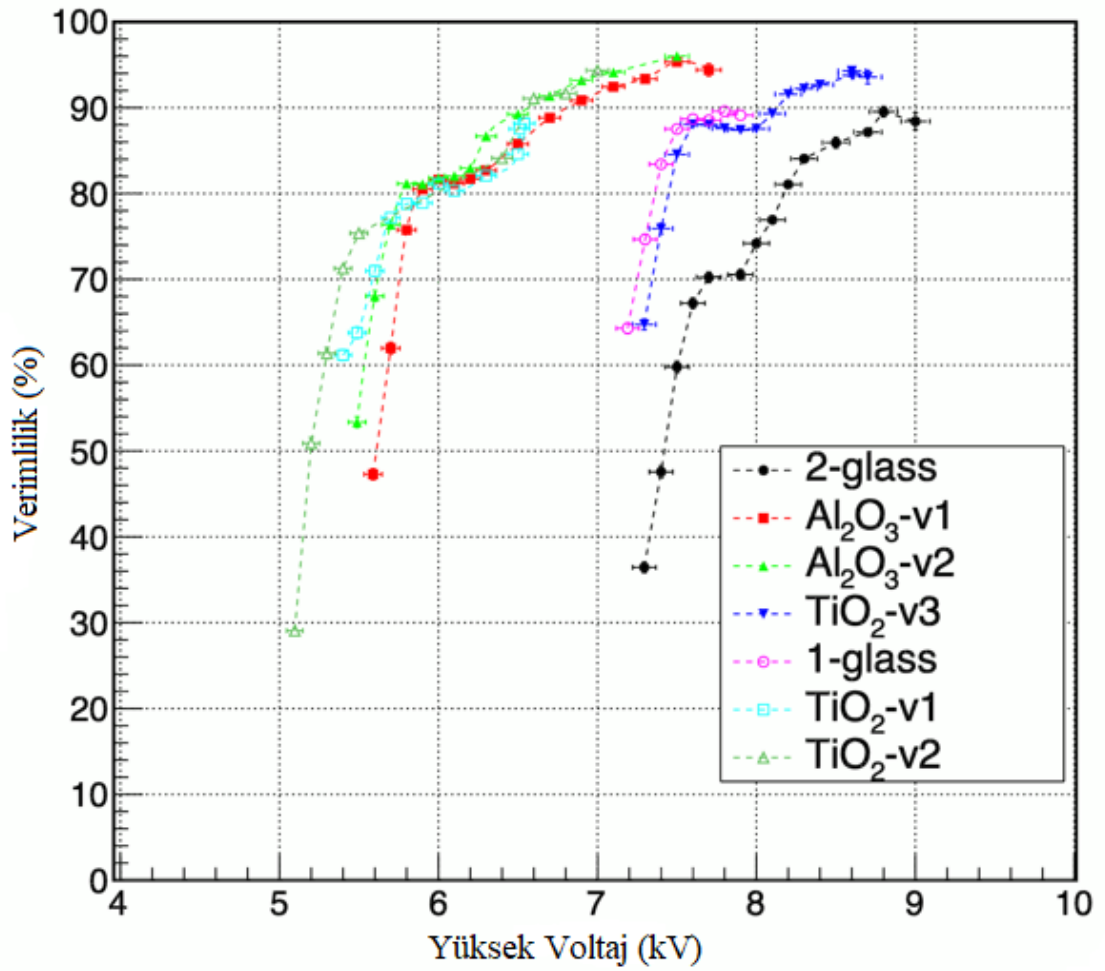
4.1.4 Işın testleri

Üretilen RPC dedektörleri Nisan 2022'de Fermilab, ABD'deki ışın testi tesisine götürülmüş ve test edilmiştir. Bu ilk testler, literatürde varolan RPC dedektörleri ile doğrudan performans karşılaştırması yapılabilmesi için CALICE DHCAL RPC gaz karışımı olan tetrafloretan: izobütan: SF_6 94.5: 5: 0.5 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney masasındaki kurulumun fotoğrafları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Fermilab Işın Testi Tesisi'ndeki deney düzeniğinin fotoğrafları

Dakikada 4 saniyelik paketler halinde gelen 30 GeV enerjili myonların kullanıldığı testlerde, RPC dedektörlerinin yüksek voltaj taraması yapılmış ve şekil 4.9’de görülen verimlilik – voltaj grafiği elde edilmiştir. Burada verimlilik kriteri, myon için kaydedilen sinyalin integralinin 300 fC’den (FemtoCoulomb) büyük olmasıdır. Performans karşılaştırması için %90 verimlilik sınırı göz önünde bulundurulabilir. Çift camlı RPC, %90 civarındaki verimliliğe 8.5 kV civarında ulaşmaktadır. Bu sınır tek camlı RPC ve 0.15 mg/cm² TiO₂ kaplı anoda sahip olan RPC (TiO₂_v3) için yaklaşık olarak 7.5 kV seviyesindedir. Tek camlı RPC’nin performansının çift camlı RPC’ye göre daha iyi olması beklenen bir neticedir (Bilki vd. 2009a).



şekil 4.9 Fermilab ışın testinde test edilen 7 RPC dedektörü için verimlilik – yüksek voltaj grafiği

RPC dedektörlerinin performansları arasındaki belirgin fark 500 nm ve 350 nm Al₂O₃ kaplı anotlara sahip RPC'lerde ve 0.5 mg/cm² ve 1 mg/cm² TiO₂ kaplı anotlara sahip RPC'lerde gözlenmektedir. Bu RPC'lerde %90 verimlilik sınırı yaklaşık olarak 6.5 kV yüksek voltajda aşılmaktadır. Tek camlı RPC'lerden farklı olarak anot yüzey üzerinde ikincil elektron çoklama yeteneği olan bir katman barındıran bu RPC'lerin verimlilik neticeleri, bu katmanın işlevselliğini doğrulayan ilk veriyi oluşturmaktadır. Kullanılan kaplama kalınlıkları arasında, sonuç performansı açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir.



5. SONUÇ VE TARTIŞMA

RPC (Resistive Plate Chambers) dedektörleri büyük çaplı deneylerin özellikle müon sistemlerinin vazgeçilmez bileşenleridir. Gelecek büyük çaplı deneylerin de entegre parçaları olacağı, bu deneylerin günümüzdeki tasarımlarından anlaşılmaktadır.

RPC dedektörlerinin çok büyük alanları kaplayacak şekilde üretilmesi, dedektör inşası açısından çok zor olmayan bir işlemdir. Bunun yanı sıra üretim maliyetleri de düşüktür. Sinyal üretimi ve okuması karmaşık sistemler gerektirmez. Kaliteli bir üretim aşaması sonrasında yıllarca problemsiz bir şekilde yüksek performansla çalışabilirler.

Uzun yıllar süren araştırmalar neticesinde optimize edilen RPC gaz karışımlarının, yüksek küresel ısınma faktörleri içeren gazlar içermesi, ve RPC dedektör sistemlerinin giderek yaygınlaşarak bu emisyonun daha da artacağına işaret etmesi neticesinde, alternatif gaz arayışları, karışımı kapalı bir sistemde saflaştırarak tekrar kullanabilme ve tamamen kapalı gaz sistemi gibi teknolojiler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez kapsamında, elektron çoklamanın, gaz katmanının yanı sıra, doğrudan gaz katmanı içerisinde olan anot yüzey üzerine kaplanan ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemelerde de gerçekleştiği RPC dedektör teknolojisi geliştirilmiştir. İlk aşamada uygulanan yüzey kaplamaları 500 nm ve 350 nm kalınlıkta Al_2O_3 ; ve 1 mg/cm², 0.5 mg/cm² ve 0.15 mg/cm² yüzey yoğunluklu TiO_2 'dir.

0.15 mg/cm² yüzey yoğunluklu TiO_2 kaplamanın ikincil elektron çoklamaya etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ölçülebilir etki 0.5 mg/cm² ve 1 mg/cm² yoğunluklu TiO_2 kaplamalardadır. Bu RPC'ler, anot yüzey kaplaması olmayan tek camlı RPC'lere kıyasla 1 kV daha düşük voltajda tek camlı RPC verimliliğini sağlayabilmektedirler. Bu çalışma voltajında, ikincil elektron çoklama mekanizması olmayan RPC dedektörlerinin hiçbirisi ölçülebilir bir verimliliğe sahip değildir.

500 nm ve 350 nm kalınlıkta Al_2O_3 ile kaplanmış anoda sahip RPC'lerin verimlilikleri birbirine benzer bir trend göstermektedir ve bu trend TiO_2 kaplı anotlara sahip RPC'lerine de benzerdir. Kullanılan Al_2O_3 kaplaması kalınlıkları arasındaki farkın RPC performansını ölçülebilir şekilde etkilemediği gözlenmiştir. Birbirinden çok farklı

tekniklerle uygulanan Al_2O_3 ve TiO_2 kaplamalarının benzer performansla neticelendiğini de not etmek gerekir.

RPC anot yüzeyi üzerine ikincil elektron çoklama yeteneği yüksek malzemeler kaplanarak, RPC performansını iyileştirme ve daha da ötesinde, yeni bir RPC türü – hibrit RPC – geliştirme prensibi ilk kez bu tez kapsamında yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Uzun yıllar sürecektir olan araştırma-geliştirme çalışmalarının ilk aşamasını oluşturan bu çalışma ile, daha düşük performanslı RPC gazlarının kullanılabilmesi söz konusu olacağı gibi kapalı sistem RPC'ler de mümkün olacaktır.

Araştırmanın sonraki aşamalarında, bu yeni tür RPC'lerin zaman ve pozisyon çözünürlüğü ölçülecek, alternatif basit bileşenli gazlar denenecek ve ikincil elektron çoklama katmanı seçenekleri tüm sistematiği ile birlikte incelenecektir. Gelecek uygulamaların kolaylığı açısından, büyük boyutlu RPC üretimi ve büyük boyutlu anotların pratik yüzey kaplamaları üzerine Ar-Ge yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Atlas Collaboration. (2021). Performance of the ATLAS RPC detector and Level-1 muon barrel trigger at $\sqrt{s} = 13$ TeV. arXiv preprint arXiv:2103.01029.
- Ablikim, M. et al. (2010). Design and construction of the BESIII detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 614(3), 345-399.
- Adams, C. et al. (2016). Design, construction and commissioning of the Digital Hadron Calorimeter—DHCAL. Journal of instrumentation, 11(07), P07007.
- Ahmed, S. N. (2007). Physics and engineering of radiation detection. Academic Press.
- Akkurt, I., Tekin, H. O., & Mesbahi, A. (2015). Calculation of detection efficiency for the gamma detector using MCNPX. *Acta Phys. Pol. A*, 128(2-B), 332-334.
- Aubert, B. et al. (2013). The BABAR detector: Upgrades, operation and performance. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 729, 615-701.
- Aydın, R. (2015). İnfrared Dedektörlere Genel bir Bakış. Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, (41), 55-64.
- Basic Detection Techniques Gas Detectors(2022). Web adresi: <https://www.astro.rug.nl/~peletier/Bas%20Det%20Tech%202009%20gas%20detectors.pdf>. Erişim Tarihi:12.01.2022.
- Bergnoli, A. et al. (2005). Tests of OPERA RPC detectors. IEEE transactions on nuclear science, 52(6), 2963-2970.
- Bianchi, A., Delsanto, S., Dupieux, P., Ferretti, A., Gagliardi, M., Joly, B., Manen, S.P., Marchisone, M., Micheletti, L., Rosano, A. & Vercellin, E. (2019). Characterization of tetrafluoropropene-based gas mixtures for the Resistive Plate Chambers of the ALICE muon spectrometer. Journal of Instrumentation, 14(11), P11014.
- Bilki, B. et al. (2008). Calibration of a digital hadron calorimeter with muons. Journal of Instrumentation, 3(05), P05001.
- Bilki, B., Butler, J., May, E., Mavromanolakis, G., Norbeck, E., Repond, J., Underwood, D., Xia, L. & Zhang, Q. (2009a). Measurement of the rate capability of Resistive Plate Chambers. Journal of Instrumentation, 4(06), P06003.

- Bilki, B., Butler, J., Mavromanolakis, G., May, E., Norbeck, E., Repond, J., Underwood, D., Xia, L. & Zhang, Q. (2009b). Hadron showers in a digital hadron calorimeter. *Journal of Instrumentation*, 4(10), P10008.
- Bilki, B., Butler, J., May, E., Mavromanolakis, G., Norbeck, E., Repond, J., Underwood, D., Xia, L. & Zhang, Q. (2009c). Measurement of positron showers with a digital hadron calorimeter. *Journal of Instrumentation*, 4(04), P04006.
- Bilki, B., & CALICE Collaboration. (2012). DHCAL Response to Positrons and Pions. *Physics Procedia*, 37, 317-324.
- Bilki, B. et al. (2013). The DHCAL Results from Fermilab Beam Tests: Calibration. CALICE Analysis Note, CAN-042.
- Bilki, B., Corriveau, F., Freund, B., Neubüser, C., Onel, Y., Repond, J., Schlereth, J. & Xia, L. (2015). Tests of a novel design of Resistive Plate Chambers. *Journal of instrumentation*, 10(05), P05003.
- Biswas, S. (2010). Development of high resolution gas filled detector for high energy physics experiments (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, University of Calcutta, Kolkata India).
- Bogomilov, M., Dedovich, D., Dumps, R., Dydak, F., Gapienko, V., Semak, A., ... & Zaets, V. (2003). The HARP RPC time-of-flight system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 508(1-2), 152-158.
- Chefdeville, M. et al. (2019). Analysis of test beam data of the highly granular RPC-steel CALICE digital hadron calorimeter and validation of GEANT4 Monte Carlo models. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 939, 89-105.
- Drake, G., Repond, J., Underwood, D., & Xia, L. (2007). Resistive Plate Chambers for hadron calorimetry: Tests with analog readout. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 578(1), 88-97.
- Fabrication and Characterization of Glass Resistive Plate Chamber (RPC) (2022). Web sitesi: https://www.tifr.res.in/~ehp2019/pdfs/exp04_rpc.pdf. Erişim Tarihi: 10.03.2022.

- Freund, B. et al. (2016). DHCAL with minimal absorber: measurements with positrons. *Journal of instrumentation*, 11(05), P05008.
- Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi. (2022). Web sitesi <https://fotonik.gazi.edu.tr>. Erişim Tarihi: 10.01.2022.
- Hemn, M. S., & Ari, M. H. (2014). 54 Xe and 36 Kr gas filled proportional counters and characteristic X-rays detection. *American Journal of Physics and Applications*, 2(4), 95-103.
- İyon Dedektörleri. (2022). Web sitesi: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_965.html. Erişim Tarihi: 12.02.2022.
- Knoll, G. F. (1999). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Leo, W. R. (2012). *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media.
- Lippmann, C., & Riegler, W. (2003). Detector physics of resistive plate chambers. In *2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 1, 600-604.
- Llope, W. J., & STAR collaboration. (2012). Multigap RPCs in the STAR experiment at RHIC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 661, S110-S113.
- Loterman, D. (2014). Development of a Glass Resistive Plate Chamber for the Phase-2 Upgrade of the CMS Detector at the Large Hadron Collider. Web sitesi: https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/163/596/RUG01-002163596_2014_0001_AC.pdf. Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Peskov, V. (2012). Challenges for RPCs and resistive micropattern detectors in the next few years. *arXiv preprint arXiv:1204.2144*.
- Pugliese, G. et al. (2014). CMS RPC muon detector performance with 2010-2012 LHC data. *Journal of Instrumentation*, 9(12), C12016.
- Repond, J., & CALICE collaboration. (2012). Analysis of muon events in the DHCAL. *Physics Procedia*, 37, 347-355.
- Resistive Plate Chambers. (2022). Web sitesi: <https://www.nevis.columbia.edu/~chi/rpc/cms-rpc-tech-note.pdf>. Erişim Tarihi: 24.03.2022.

- Santonico, R., & Cardarelli, R. (1981). Development of resistive plate counters. *Nuclear Instruments and Methods in physics research*, 187(2-3), 377-380.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. & Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 389-404.
- Şahin, Ö. (2018). Gazlı Parçacık Dedektörlerinin Çalışma Verimi ve Kararlılığının İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(3), 49-60.
- Townsend discharge. (2022). Web sitesi https://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge. Erişim Tarihi: 15.04.2022.
- Tsoufanidis, N., & Landsberger, S. (2014). *Measurement & detection of radiation*. CRC press.
- Yamaga, M. et al. (2000). RPC systems for BELLE detector at KEKB. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 456(1-2), 109-112.
- Zhang, Q., Bilki, B., Butler, J., May, E., Mavromanolakis, G., Norbeck, E., Repond, J., Underwood, D. & Xia, L. (2010). Environmental dependence of the performance of resistive plate chambers. *Journal of Instrumentation*, 5(02), P02007.