



**RPC DETEKTÖRLERDE KULLANILAN ELEKTROT
MATERYALLERİNİN İNCELENMESİ**

Betül ELBİR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RPC DETEKTÖRLERDE KULLANILAN ELEKTROT MATERYALLERİNİN
İNCELENMESİ**

Betül ELBİR
0009-0001-1722-7784

Prof. Dr. Nilgün DEMİR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RPC DETEKTÖRLERDE KULLANILAN ELEKTROT MATERYALLERİNİN İNCELENMESİ

Betül ELBİR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nilgün DEMİR

Deneysel parçacık fiziğinde kullanılan en önemli cihazlardan biri olan gazlı detektörler, çekirdek bozunmalarında, kozmik ışın etkileşimlerinde ya da parçacık hızlandırıcılarında açığa çıkan yüksek enerjili parçacıkları tespit etmek ve/veya izlerini bulmak için kullanılır. Dirençli Plaka Odası (Resistive Plate Chamber-RPC), arasında ince bir gaz boşluğu ile birbirinden ayrılmış ve paralel yüksek dirençli iki plakadan oluşur. Detektörden iyonize edici bir parçacık geçtiğinde, detektörün gaz hacminde yaptığı iyonizasyonlar sonucu elektron-iyon çiftleri meydana gelir. Plakalar arasına uygulanan yüksek voltajla elde edilen düzgün bir elektrik alan sayesinde, oluşan bu iyonizasyon çiftleri levhalara doğru hızlandırılır. Plakalarda toplanan yükler indüklenerek sinyal okuma kanallarına iletilir. Bu durum, yüksek dirençli plakalardan oluşan RPC detektörünü diğer detektörlerden ayıran en belirgin özelliğidir. Bu olay diğer detektörlere göre çok daha yavaş olduğu için, RPC'lerin zaman ve konum çözünürlüğü, çok daha yüksektir. Detektörün verimini artırmak için indüklenen yükün sinyal okuma kanallarına hızlı bir şekilde aktarılması gerekir. Bu amaçla, yüksek dirençli elektrotların (plakaların) dışa bakan yüzeyleri direnci daha düşük bir malzemeyle kaplanır. Kaplama işlemi ile elektrotların yüzeyel ve hacimsel özdirençleri değişecektir. Bu parametrelerin değişimi, detektör verimini de etkileyecektir.

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Gazlı Detektör Araştırma Laboratuvarı'nda yürütülmektedir. Çalışmada, elektrot olarak, soda-lime camlar kullanılmış ve yüzeyleri serigrafi boyama tekniği ile kaplanmıştır. Kaplama için grafit tozu, bakır-mikron tozu ve bor-karbür tozları çeşitli oranlarda serigrafi boyası ile karıştırılarak farklı katmanlarda çeşitli elektrot örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan her bir örnek elektrotun, yüzeyel ve hacimsel özdirençleri ölçülerek voltaja bağlı değişimleri incelenmiştir. Yüzeyel direnci $1M\Omega$ - $4M\Omega$ olan elektrotlarla fotona duyarlı RPC detektörü tasarlanmış ve test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: RPC, cam elektrot, serigrafi, hacimsel direnç, yüzeyel direnç

2024, xvi + 114 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXAMINATION OF ELECTRODE MATERIALS USED IN RPC DETECTORS

Betül ELBİR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Nilgün DEMİR

Gas detectors, one of the most important devices used in experimental particle physics, are used to detect and/or find traces of high-energy particles released in nuclear decay, cosmic ray interactions or particle accelerators. Resistive Plate Chamber (RPC) consists of two parallel high resistance plates separated from each other by a thin gas gap. When an ionizing particle passes through the detector, electron-ion pairs are formed because of the ionizations made by the detector in the gas volume. Thanks to a uniform electric field obtained by high voltage applied between the plates, these ionization pairs are accelerated towards the plates. The charges collected on the plates are induced and the signal is transmitted to the reading channels. This is the most distinctive feature that distinguishes the RPC detector, which consists of high resistance plates, from other detectors. Since this event is much slower than other detectors, the time and location resolution of RPCs is much higher. To increase the efficiency of the detector, the induced charge must be quickly transferred to the signal reading channels. For this purpose, the outward facing surfaces of high resistance electrodes (plates) are coated with a material with lower resistance. With the coating process, the surface and volume resistivities of the electrodes will change. Changing these parameters will also affect the detector efficiency.

This study is carried out at Bursa Uludağ University Gas Detector Research Laboratory. In the study, soda-lime glasses were used as electrodes and their surfaces were covered with silk-screen painting technique. For surface coating, various electrode samples were prepared in different layers by mixing graphite powder, copper-micron powder and boron-carbide powder with screen printing paint in various proportions. The surface and volume resistivities of each prepared sample electrode were measured and their voltage-dependent changes were examined. A photon-sensitive RPC detector was designed and tested with electrodes with surface resistance of $1M\Omega$ - $4M\Omega$.

Key words: RPC, glass electrode, screen printing, volume resistivity, surface resistivity

2024, xvi + 114 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez çalışmamda büyük bir özveriyle ve bilgi birikimiyle bana ışık tutan, danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Nilgün DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez, FYL-2024-1391 no'lu proje ile Bursa Uludağ Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir. BAP birimine destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Bunun yanında, yine derin bilgisinden yararlandığım, Sayın Prof. Dr. Özkan ŞAHİN'e ve Fizik Bölümü'nde yer alan tüm değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca dostluğuyla ve tecrübesiyle çalışmalarımda destek olan değerli arkadaşım, Şevket Burçak DAĞLI'ya, yazılım konusundaki tecrübesiyle desteğini esirgemeyen Berker YILMAZ'a ve Mustafa SÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Uludağ Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü lisans öğrencileri Yıldız DEMİR ve Melike Nur DAŞKIN'a değerli yardımları için teşekkür ederim.

Son olarak çalışma ve araştırmalarımda benden desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Betül ELBİR
28/06/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Parçacık Detektörleri	3
2.2. RPC Detektör Yapısı ve Özellikleri	4
2.2.1.Multigaplı RPC	12
2.2.2.Hibrit Tasarımlar	16
2.3. Dirençli Plaka Odası Çalışma Modları	18
2.4.Timing RPC ve Trigger RPC	25
2.4.1. Zamanlama RPC'leri (Timing RPC)	25
2.4.2. TOF (Time of Flight- Uçuş Zamanı)	26
2.4.3. Trigger RPC'ler (Tetikleyici RPC'ler)	28
2.5. RPC'nin Verimini Etkileyen Parametreler	29
2.5.1. RPC'de Kullanılan Gaz Karışımı	29
2.5.2.RPC'de Kullanılan Elektrotların Seçimi	31
2.5.3.RPC'nin Verimini Etkileyen Diğer Değişkenler	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM	35
3.1. Materyal	35
3.2.Yöntem	39
4.BULGULAR	43
4.1.Düz Cam Bulguları	43
4.2.Grafit Kaplamalı Bulgular	46
4.3. Bakır+ Grafit Kaplamalı Bulgular	63
4.4. Bor Karbür+ Grafit Kaplamalı Bulgular	91
5.TARTIŞMA VE SONUÇ	103
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	115

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
α	İnce yapı sabiti, Townsend katsayısı
η	Bağlantı katsayısı
ϵ_{tot}	Toplam verimlilik
q_e	Elektronun temel elektrik yükü
ΔV	Potansiyel fark
E_k	Kinetik enerji
A	Gaz kazancı
v^-	Elektron sürüklenme hızı
v^+	İyon sürüklenme hızı
L	Uçuş mesafesi
M	Kütle
σ	Tesir kesiti
p	Parçacığın momentumu
c	Işık hızı
β	Parçacığın hızı bölü ışık hızı oranı
t^-	Elektronların ulaşma süresi
t^+	İyonların ulaşma süresi
v	Parçacığın hızı
ρ_s	Yüzeysel özdirenç
ρ_v	Hacimsel özdirenç
R_s	Yüzeysel direnç
R_v	Hacimsel direnç
l	Uzunluk

Kısaltmalar	Açıklama
RPC	Dirençli Plaka Odası
PMT	Foto Çoğaltıcı Tüp
MWPC	Çok Telli Orantılı Sayaç
PSC	Düzlemsel Kıvılcım Sayacı
HV	Yüksek Voltaj
GND	Toprak
MRPC	Çok Boşluklu Dirençli Plaka Odası
BaBar	Temel Parçacık Fiziği Grubu
OPERA	Emülsiyon İzleme Aparatlı Salınım Projesi
CMS	Kompakt Müon Selonoidi
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
ATLAS	Büyük Toroidal LHC Aparatı
ALICE	Ağır İyon Çarpıştırıcı Deneyi
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
BES	Pekin Spektrometresi

BESIII	Pekin Spektrometresi III
ARGO-YBJ	YangBaJing'deki Yer Tabanlı Gözlemevi ile Astrofiziksel Radyasyon
LEP	Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
PPC	Paralel Plakalı Sayaç
UV	Ultraviyole ışın
FWHM	Pikin yarı yüksekliğindeki tam genişliği
TOF	Uçuş zamanı
HARP	Hadron Üretim Deneyi
STAR	Kuark-gluon plazmasının oluşumunu inceleyen deney
RHIC	Görelî Ağır İyon Çarpıştırıcısı
HADES	Yüksek Kabul Di-elektron Spektrometresi
CCD	Şarj bağlantılı cihaz
PTFE	Politetrafluo-roetilen
PLA	Poliaktik asit
neBEM	Detektörün elektrik alan haritasını oluşturan program
COMSOL	Detektörün elektrik alan haritasını oluşturan program
CVD	Kimyasal buhar kaplama
PVD	Fiziksel buhar kaplama
RF	İnce film kaplama tekniği
EDXRF	Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektroskopisi
AKM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
TTM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
ODP	Ozon tükenme gücü
GWP	Küresel ısınma potansiyeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bir dirençli plaka odasının şeması (Lippmann 2003'ten değiştirilerek alınmıştır)	7
Şekil 2.2. Çeşitli R134-a karışımları için Td'deki normalleştirilmiş elektrik alanın bir fonksiyonu olarak normalleştirilmiş etkili Townsend katsayısı	8
Şekil 2.3. (a) Silindirik bir detektörün şematik gösterimi, birincil elektronların anoda varma süreci. (b) Paralel plakalı bir detektör, oluşan birincil elektronlar ve çığ oluşumu (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	9
Şekil 2.4. Çıgın dielektrik anoda temas ettiği anda çığın ve lokal kısmi anot boşalmasının şematik gösterimi (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	11
Şekil 2.5. Çift boşluklu bir RPC düzeneği (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	13
Şekil 2.6. Beş boşluklu bir MRPC'nin şeması. Çalışma voltajı, dış plakalara uygulanan dirençli katmanlara uygulanır; harici yalıtımlı devrelerde sinyaller algılanır (Sauli 1977)	14
Şekil 2.7. Beş boşluklu bir MRPC için voltajın bir fonksiyonu olarak verimlilik ve zaman çözünürlüğü (Sauli 1977)	15
Şekil 2.8. Hibrit (metalik+ dirençli elektrotlar) RPC'lerin birkaç şematik örneği a) Dört boşluklu bir zamanlama sayacı b) MikroRPC (Fonte 2000)	16
Şekil 2.9. Parkhomcuk ve arkadaşları tarafından tasarlanan ve test edilen RPC'nin ilk tasarımının şeması. Şekilde numaralandırılan malzemeler; 1-iletken katman, 2-yarı iletken cam, 3- bakır katottur (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	17
Şekil 2.10. Bir gazda Townsend çığ gelişiminin şeması: Yeterince yoğun bir elektrik alanında sürüklenen (soldan gelen) serbest bir elektron, atomlar ve moleküller ile elastik ve elastik olmayan çarpışmalar yaşar, bu da yeni serbest elektronların yanı sıra uyarılmış veya iyonize atomik veya moleküler türlerin oluşmasıyla sonuçlanır (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	19
Şekil 2.11. Çığ yapısının iki zaman aralığındaki şematik gösterimi. (a) $t = d/v^-$ ayrıca gazın kendi kendine fotoiyonlaşmasıyla oluşturulan bir elektronu da gösterir ve (b) $t = d/v^+$, olası bir iyon fırlatılmış elektronu da gösterir. $t = 0$, çığın katotta tek bir elektron tarafından başlatıldığı zamana karşılık gelir. Küçük dolu daireler elektronları, ortasında "+" işareti bulunan açık daireler ise pozitif iyonları temsil eder (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	21
Şekil 2.12. Fotonlar veya yüklü parçacıklar tarafından ışınlanan tek telli bir sayaç için tipik voltaj-akım özellikleri (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	22
Şekil 2.13. Çığdaki toplam yük Raether sınırına ulaştığında kıvılcım gelişiminin üç aşaması: (a) çığa yakın alan çizgileri bir odaklanma etkisi yaşar ve bazı ikincil çığlar pozitif iyonların "gövdesine"	23

	doğru hareket etmeye başlar; (b) ince bir plazma filamanı – bir flama (veya Kanal) – oluşur; (c) Flama elektrotlara ulaştığında bu Şekilde açılan kanaldan bir kıvılcım oluşur (Abbrescia ve diğerleri, 2018)	
Şekil 2.14.	Çeşitli alışma voltajlarında bir Bakalit RPC'den (10/7/83) oranında Ar/i-C4H10/C2H2F4) kaydedilen sinyal dalga formları: a) sırasıyla V + 9.6 ve 10.2 kV'de bir çığ sinyali (V = 9.4 kV), (b,c) ığ ve kıvılcım sinyalleri ve (d) kıvılcım sinyali ve ardından bir kıvılcım atması (Nappi ve Peskov, 2013)	24
Şekil 2.15.	Söndürme gazları için elektron verimliliği (Kumagaia 2004)	30
Şekil 3.1.	Bir EDXRF sistemi (Tsompopoulou, Mergia 2019)	35
Şekil 3.2.	AKM Şeması (Şahin 2009)	37
Şekil 3.3.	Elektrot olarak kullanılan düz camın iki boyutlu(a), üç boyutlu(b) AKM görüntüsü	37
Şekil 3.4.	Serigrafi kasnağı ve raglesi	38
Şekil 3.5.	a) Hacimsel direnç ölçüm Şeması. b) Hacimsel direnç ölçüm düzeneği	39
Şekil 3.6.	a) Yüzeysel direnç ölçümü Şematik gösterimi. b) Yüzeysel direnç ölçüm deney düzeneği	40
Şekil 3.7.	Yüzey direnci ölçümünde kullanılan sistem	42
Şekil 4.1.	2mm düz cam hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	44
Şekil 4.2.	2mm düz cam yüzey özdireni-voltaj grafiği	44
Şekil 4.3.	3mm düz cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	45
Şekil 4.4.	3mm düz cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	46
Şekil 4.5.	G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	48
Şekil 4.6.	G3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	49
Şekil 4.7.	G3 kaplamalı cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	49
Şekil 4.8.	G3 için gün bazında yüzey direnç değişimi	50
Şekil 4.9.	G3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	50
Şekil 4.10.	G4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	52
Şekil 4.11.	G4 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	53
Şekil 4.12.	G4 kaplamalı cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	53
Şekil 4.13.	G4 için gün bazında yüzey direnç değişimi	54
Şekil 4.14.	G4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	54
Şekil 4.15.	GG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	56
Şekil 4.16.	GG3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	57
Şekil 4.17.	GG3 kaplamalı cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	57
Şekil 4.18.	GG3 için gün bazında yüzey direnç değişimi	58
Şekil 4.19.	GG3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	58
Şekil 4.20.	GG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	60
Şekil 4.21.	GG4 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	61
Şekil 4.22.	GG4 kaplamalı cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	61
Şekil 4.23.	GG4 için gün bazında yüzey direnç değişimi	62
Şekil 4.24.	GG4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	62
Şekil 4.25.	BG1 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	64
Şekil 4.26.	BG1 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	65
Şekil 4.27.	BG1 kaplamalı cam için yüzey özdireni-voltaj grafiği	65
Şekil 4.28.	BG1 için gün bazında yüzey direnç değişimi	66

Şekil 4.29.	BG1 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	66
Şekil 4.30.	BG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	67
Şekil 4.31.	BG2 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	68
Şekil 4.32.	BG2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	69
Şekil 4.33.	BG2 için gün bazında yüzey direnç değişimi	69
Şekil 4.34.	BG2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	70
Şekil 4.35.	BG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	71
Şekil 4.36.	BG3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	72
Şekil 4.37.	BG3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	72
Şekil 4.38.	BG3 için gün bazında yüzey direnç değişimi	73
Şekil 4.39.	BG3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	73
Şekil 4.40.	BG(D1)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	74
Şekil 4.41.	BG(D1)2 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	75
Şekil 4.42.	BG(D1)2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	76
Şekil 4.43.	BG(D1)2 için gün bazında yüzey direnç değişimi	76
Şekil 4.44.	BG(D1)2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	77
Şekil 4.45.	BG(D1)3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	78
Şekil 4.46.	BG(D1)3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	79
Şekil 4.47.	BG(D1)3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	79
Şekil 4.48.	BG(D1)3 için gün bazında yüzey direnç değişimi	80
Şekil 4.49.	BG(D1)3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	80
Şekil 4.50.	BG(D1)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	81
Şekil 4.51.	BG(D1)4 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	82
Şekil 4.52.	BG(D1)4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	83
Şekil 4.53.	BG(D1)4 için gün bazında yüzey direnç değişimi	83
Şekil 4.54.	BG(D1)4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	84
Şekil 4.55.	BG(D3)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	85
Şekil 4.56.	BG(D3)4 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	86
Şekil 4.57.	BG(D3)4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	86
Şekil 4.58.	BG(D3)4 için gün bazında yüzey direnç değişimi	87
Şekil 4.59.	BG(D3)4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	87
Şekil 4.60.	BG(D4)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	88
Şekil 4.61.	BG(D4)2 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	89
Şekil 4.62.	BG(D4)2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	90
Şekil 4.63.	BG(D4)2 için gün bazında yüzey direnç değişimi	90
Şekil 4.64.	BG(D4)2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	91
Şekil 4.65.	BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	92
Şekil 4.66.	BKG2 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	93
Şekil 4.67.	BKG2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	94
Şekil 4.68.	BKG2 için gün bazında yüzey direnç değişimi	94
Şekil 4.69.	BKG2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	95
Şekil 4.70.	BKG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	96
Şekil 4.71.	BKG4 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	97
Şekil 4.72.	BKG4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	97
Şekil 4.73.	BKG4 için gün bazında yüzey direnç değişimi	98
Şekil 4.74.	BKG4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	98
Şekil 4.75.	BKG5 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği	100
Şekil 4.76.	BKG5 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği	101

Şekil 4.77.	BKG5 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği	101
Şekil 4.78.	BKG5 için gün bazında yüzey direnç değişimi	102
Şekil 4.79.	BKG5 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası	102
Şekil 5.1.	Yalnız grafit(a), bakır+ grafit(b) ve bor karbür+ grafit(c) kaplamaların karşılaştırmalı akım -voltaj grafikleri	105
Şekil 5.2.	Her kaplama çeşidinden bir örnek için akım- voltaj karşılaştırması	106
Şekil 5.3.	Yalnız grafit(a), bakır+ grafit(b) ve bor karbür+ grafit(c) kaplamaların karşılaştırmalı yüzey direnç -voltaj grafikleri	107
Şekil 5.4.	Her kaplama çeşidinden bir örnek için yüzey direnci- voltaj karşılaştırması	108
Şekil 5.5.	Bazı kaplamalara ait fotoğraflar. Yalnız grafit kaplama (a), bakır+ grafit kaplama (b), bor karbür+ grafit kaplama (c)	109
Şekil 5.6.	Kurulan RPC detektörün şematik gösterimi	109
Şekil 5.7.	RPC detektöründen alınan voltaja bağlı sinyal sayımı ve örnek pik görüntüsü	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Kullanılan düz camın EDXRF spektrometresi ile analiz sonuçları	36
Çizelge 3.2. Kaplamada kullanılan malzemelerin boyutu ve elektriksel iletkenlikleri	38
Çizelge 4.1. 2mm düz cam hacimsel özdirenç-voltaj değerleri	43
Çizelge 4.2. 3mm düz cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri	45
Çizelge 4.3. Grafit kaplamaların kütlece grafit oranları ve atılan kat sayıları	47
Çizelge 4.4. G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri	47
Çizelge 4.4. G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri(devamı)	48
Çizelge 4.5. G3 kaplamalı cam için akım-voltaj değerleri	48
Çizelge 4.6. G4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	51
Çizelge 4.7. G4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	52
Çizelge 4.8. GG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri	55
Çizelge 4.9. GG3 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	56
Çizelge 4.10. GG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	59
Çizelge 4.11. GG4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	60
Çizelge 4.12. Bakır + grafit kaplamaların kütlece bakır, grafit oranları ve atılan kat sayıları	63
Çizelge 4.13. BG1 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	63
Çizelge 4.14. BG1 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	64
Çizelge 4.15. BG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	67
Çizelge 4.16. BG2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	68
Çizelge 4.17. BG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	70
Çizelge 4.18. BG3 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	71
Çizelge 4.19. BG(D1)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	74
Çizelge 4.20. BG(D1)2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	75
Çizelge 4.21. BG(D1)3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	77
Çizelge 4.22. BG(D1)3 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	78
Çizelge 4.23. BG(D1)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	81
Çizelge 4.24. BG(D1)4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	82
Çizelge 4.25. BG(D3)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	85
Çizelge 4.26. BG(D3)4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	86
Çizelge 4.27. BG(D4)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	88
Çizelge 4.28. BG(D4)2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	89
Çizelge 4.29. Bor Karbür + grafit kaplamaların kütlece Bor Karbür, grafit oranları ve atılan kat sayıları	91
Çizelge 4.30. BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	91
Çizelge 4.30. BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	92

Çizelge 4.31.	BKG2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	93
Çizelge 4.32.	BKG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	95
Çizelge 4.33.	BKG4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	96
Çizelge 4.34.	BKG5 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri	99
Çizelge 4.35.	BKG5 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri	100



1. GİRİŞ

İnsanoğlunun ilk çağlarında “parçacık” kelimesi, o zamana göre çok bir anlam ifade etmeyebilir. Belki “parça” kelimesi bile fazladır. Yaratılan her şey zamanla değiştiği gibi, sonsuz merak duygusuna sahip, aynı zamanda asıl doğası değişime açık olan insan da değişmiştir. Bu değişimin çoğu, aklını kullanma ve kazandığı tecrübeleriyle şekillenmiştir.

Günümüze gelinceye kadar insanın, yaşamın anlamı olarak kabul ettiği merak duygusu ile bilim ve teknolojide gelişmeler üstel olarak artmıştır. İnsan yine sınırlarını zorlamış, her buluş sonunda, “bunun en son buluş” olduğu, daha fazlasının da olamayacağı gibi bir hisse kapılsa da aslında bunun böyle olmadığını gözlemlemiştir.

Günümüzde ise yokuş aşağı koşan birinin belirli bir hıza ulaştıktan sonra bacaklarının hızına yetişememesi gibi, teknolojiye ayak uydurmakta büyük bir çaba içine girilmiştir. Burada teknoloji derken şuna dikkat edilmesi gerekir: İnsanoğlunun yararına ve en önemlisi de içinde bulunduğumuz Dünya'nın yaşam döngüsünü bozmayacak şekilde olmalıdır. Bir bilim insanının yaklaşımı da bu şekildedir.

Detektör, ilk olarak ve kolaylıkla ulaşılamayan bir şeye bu araçları kullanarak ulaşıp, o şeyi daha iyi tanımayı sağlayan araçlardır. Buradaki “şey” ifadesi, yukarıda “parçacık” olarak tanımlananları ve duyu organlarıyla algılanamayanları temsil eder. Detektörün, maddenin doğası ve enerji ile ilgili çokça kafa yoran fizikçilerin, en çok ihtiyaç duyduğu araçlardan biri olması kaçınılmazdır. Bu yüzden parçacık detektörleri, sürekli kendini yenileyecek, her keşfin ya da icadın ardından yeni yeni malzemeler ve sistemler eklenerek gelişmeye devam edecektir. Burada çalışılan da bir detektördür. Her detektöre yeni bir bakış açısıyla bakılabilir. Bu, detektörün kullanım alanını genişletebilir, yaşam için daha yararlı hale getirebilir, hatta başka keşiflerin de önünü açabilir.

Dirençli Plaka Odası (RPC) detektörü, bir gazlı detektör olup yüksek dirençli elektrotlardan oluşması özelliği ile dikkat çeker. Aynı zamanda kullanılan elektrotların cinsi, kalınlığı, elektriksel özellikleri ve yapılan kaplamanın yüzey homojenliği RPC

detektörünün verimini etkileyen en önemli parametrelerdendir. RPC detektörlerde sinyal, elektrot üzerinde indüklenen yükler vasıtası ile ölçülür. Yüksek dirençli bir cam elektrottan, elektrik kontağı sağlamak için detektörün dışında kalan yüzeylerin direncini bir miktar azaltmak gerekir. Bu amaçla, elektrotların dış yüzeyleri grafit gibi hafif iletken malzemeler ile boyanarak kaplanır.

Bu çalışmada, cam elektrot kullanıldı. Camların bir yüzeyi serigrafi boyama tekniği ile boyandı. Bu işlem için, serigrafi boyasına çeşitli metal-oksit tozları karıştırıldı. Elde edilen farklı boya karışımlarının uygulandığı elektrotların yüzeysel ve hacimsel özdirençleri, elektrot hacminden geçen voltaja bağlı kaçak akım değerleri ölçüldü, gün bazında direnç değişimi takip edildi ve kaplanan elektrotların birim yüzey başına direnç değerleri ölçülerek yüzey direnç haritası çıkarıldı.

Hacimsel özdirenç, detektörün zaman sabiti (gevşeme zamanı) ile orantılıdır. Zaman sabiti, detektörde deşarjın meydana geldiği bölgede elektrotların yeniden şarj olması için geçen süre olarak tanımlanır. Yüksek hacimsel özdirenç, detektörde zaman çözünürlüğünün ve sayma oranının kontrolünü sağlar. Aynı zamanda deşarjın tüm gaz hacmine yayılmasını engeller. RPC detektörlerde yüzeysel özdirenç istenmeyen alan yükü etkisine karşı, mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Böylece yüzey üzerinde biriken yük, sinyal okuma şeritlerine daha hızlı bir şekilde aktarılır.

Bu durumlar dikkate alınarak, üretilen çeşitli elektrotlar arasından bakır+ grafit kaplama ile bor karbür+ grafit kaplamalı iki elektrot seçilerek bir RPC prototipi oluşturuldu. Oluşturulan RPC' de gaz boşluğu 2mm olarak ayarlandı. Gaz karışımı olarak p20 (%80 Ar+%20 CH₄) kullanıldı. 2000V-8000V aralığında bakır+ grafit kaplamalı elektrota yüksek voltaj uygulanarak voltaja bağlı sinyal sayımı yapıldı.

Yapılan çalışmalar, Bursa Uludağ Üniversitesi Fizik Bölümü Gazlı Detektörler Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Parçacık Dedektörleri

Yaşadığımız evrende keşfettiklerimiz arasında en akıllı varlık olan insan, öteden beri nereden gelip nereye gittiğini merak etmiş, bu merak duygusuyla elinde olan imkanları kullanarak keşifler yapmıştır. Keşfettiklerine her geçen gün daha yenisini ekleyerek aklındaki sorulara cevap bulmaya çalışmıştır. Fizikçiler ise evrene uzay, zaman, madde ve enerji cihetinden bakarak etrafını saran maddenin ve enerjinin kaynağını araştırmıştır.

Bu araştırmalarında öncelikle duyu organlarını kullanmıştır. Fakat duyu organlarımız hepimizin bildiği gibi farklı hassasiyetlerde çalışır ve kısıtlı ölçeklere sahiptir. Örneğin gözümüz elektromanyetik spektrumun görünür bölgesi olan 380 ile 760 nm dalga boyları aralığında ışık yayan veya yansıtan nesnelere görmemizi sağlar. Bu yüzden evreni gözlemlemedeki ilk deneyimimiz bu görünür bölgeye aittir. Bilindiği gibi görünür bölge elektromanyetik tayfin çok küçük bir kısmına karşılık gelir. Daha büyük ve daha küçük dalga boylarındaki radyasyon ve farklı enerjilerdeki kozmik parçacıkların birçoğu dünyamıza ulaşır. Göremediğimiz ışınların ve parçacıkların tespiti geliştirilen özel cihazlarla mümkün hale gelir (Nappi ve Peskov, 2013).

Böylece bilim adamları galaksideki x- ışını kaynaklarını tespit edebilir ve γ - patlamaları gibi keşifler yapabilir. Ayrıca radyasyon dedektörleri ya da parçacık dedektörleri dediğimiz bu teknoloji bilimsel araştırma yapmak için laboratuvarlarda kullanımının yanı sıra tıptan astronomiye, güvenlikten endüstriyel alanlara kadar birçok yerde uygulama imkânı bulmuştur.

Temel parçacık fiziği temel düzeyde en küçük ölçekte ‘Madde nelerden oluşur?’ sorusunu ele alır (Griffiths, 2013). 1930'lardan bu yana binlerce fizikçinin teorileri ve keşifleri, maddenin temel yapısına ilişkin dikkate değer bir kavrayışla sonuçlandı: Evrendeki her şeyin, dört temel kuvvet tarafından yönetilen, temel parçacıklar olarak adlandırılan birkaç temel yapı taşından oluştuğu keşfedildi. Bu parçacıkların ve üç

kuvvetin birbiriyle nasıl ilişkili olduğuna dair en iyi anlayış parçacık fiziğinin Standart Modelinde özetlenir. 1970'lerin başında geliştirilen Standart Model, neredeyse tüm deneysel sonuçları başarıyla açıkladı ve çok çeşitli ayrıntıları kesin olarak tahmin etti. Zamanla ve birçok deney yoluyla Standart Model, iyi test edilmiş bir fizik teorisi olarak kurulmuştur (<https://home.cern/science/physics/standard-model>, 2022).

Bu uzun soluklu keşifler için yapılan deneyleri de analiz edebilmek için sonuçların kaydedilmesi gerekir. Bu yüzden temel parçacık fiziğinde günümüze kadar farklı duyarlılık özelliklerine sahip ve farklı yapılarda detektörler geliştirilmiştir. Kullanılacak olan detektör seçimi ölçülmek istenen parçacığın özelliklerine göre yapılır.

Nükleer ve temel parçacık fiziği tarihinde, pek çok farklı türde detektör geliştirilse de, hepsi aynı temel prensibe dayanır: Parçacık enerjisinin bir kısmının veya tamamının, insan için daha ölçülebilir bir forma dönüştürüldüğü dedektöre aktarılması. Yüklü parçacıklar enerjilerini atomik elektronlarla doğrudan çarpışma yoluyla maddeye aktarırlar, böylece atomların uyarılmasına veya iyonlaşmasına neden olurlar. Öte yandan, nötr parçacık, önce dedektörde bir tür reaksiyona girerek yüklü parçacıklar üretmelidir, bu parçacıklar da dedektör atomlarını iyonlaştırır ve harekete geçirir. Dönüştürülen enerjinin görüldüğü biçim, dedektöre ve tasarımına bağlıdır (Leo, 1948).

Parçacık detektörleri, parçacığın detektör materyali ile yaptığı etkileşme sonucu enerjisinin, momentumunun, uzaysal konumunun ve zaman fonksiyonunun belirlenmesini sağlar. Elektromanyetik etkileşme durumunda, gelen parçacık enerjisini elektron saçarak (yani atomu iyonize ederek) kaybeder. Parçacık yeteri kadar enerjiye sahipse ikincil parçacıklar üretilir ve reaksiyonlar parçacık sağanağı oluşturur (Nagashima, 2013).

Dedektörler, çarpan radyasyonun etkileşime girdiği yani elektron çoğalmasının gerçekleştiği ortama göre vakum, gaz, sıvı ve katı hal olmak üzere dört ana kategoriye ayrılabilir. Bu tez çalışmasında, gaz detektörler sınıfından olan RPC (Resistive Plate Chamber- Dirençli Plaka Odası) detektör üzerinde çalışılacağından bu detektör sınıfına yoğunlaşılacaktır.

Gazlı detektörler diğer türlere göre bazı avantajlara sahiptir. Detektör alanı amaca göre genişletilebilir. Çalışma sistemi ve üretimi kolaydır. Manyetik alana duyarlıdır ve görünür ışıktan x- ışınları, γ - ışınları ve yüklü parçacıklara kadar geniş bir alanda çalışma yeteneğine sahiptirler (Nappi ve Peskov, 2013).

Gazlı detektörlerin tarihsel gelişimi 1968 yılına kadar olan bölüm “Birinci nesil detektörler” olarak anılır. Bunların içinde sis odası, Gieger- Müller detektörü, iyonizasyon odası ve orantılı sayaçlar; sonraları Foto Çoğaltıcı Tüpler (PMT-Photo Multiplier Tube), nükleer emülsiyonlar ve kabarcık odasının keşfi sıralanabilir.

1968’den sonraları ise “Yeni nesil detektörler” olarak bilinen G. Charpack’ın çok telli orantılı sayaçları (Multi Wire Proportional Chamber -MWPC) icat etmesiyle temeli atılan modern teknolojik tasarımlardır. Bu detektörler sürüklenme odaları, zaman projeksiyon odaları, ışığa duyarlı dedektörler ve mikro model gazlı dedektörler olarak sıralanabilir.

2.2. RPC Detektör Yapısı ve Özellikleri

İlk RPC (Resistive Plate Chamber-Dirençli Plaka Odası) prototipleri dirençli elektrotlara sahip düzlemsel kıvılcım sayaçlarını (Planar Spark Chambers, PSC) icat eden Babykin ve arkadaşlarının çalışmasına dayanmakla beraber ki bu zamanla “Pestov sayaçları” olarak anılır; dirençli elektrotlara sahip ilk düzlemsel dedektörlerin Novosibirsk grubu tarafından geliştirildiği genel olarak kabul edilmektedir.

Ancak bu detektörler olağanüstü zaman çözünürlüklerine rağmen sadece birkaç deneyde kullanılabildiler. Çünkü detektörleri atmosfer basıncından daha yüksek basınçlarda çalıştırmak gerekiyordu ve elektrot yüzeylerinin her kullanımda uzun bir hazırlık süreci vardı (Abbrescia, Peskov, ve Fonte, 2018).

1980’lerin başlarında Rinaldo Santonico ve Roberto Cardarelli, yüksek basınçta sıkıştırılmış fenolik laminat (fenol ve formaldehitin polimerizasyonu ile elde edilen

reçinelerle kaplanmış neme, yüksek sıcaklıklara dayanıklı kâğıt veya cam katmanların yüksek sıcaklıkta preslenmesiyle oluşturulmuş laminat. (Şenel, 1996)) kullandılar. Bu detektör, atmosfer basıncında çalışıyordu ve uzun bir elektrot hazırlama sürecine gerek duymuyordu.

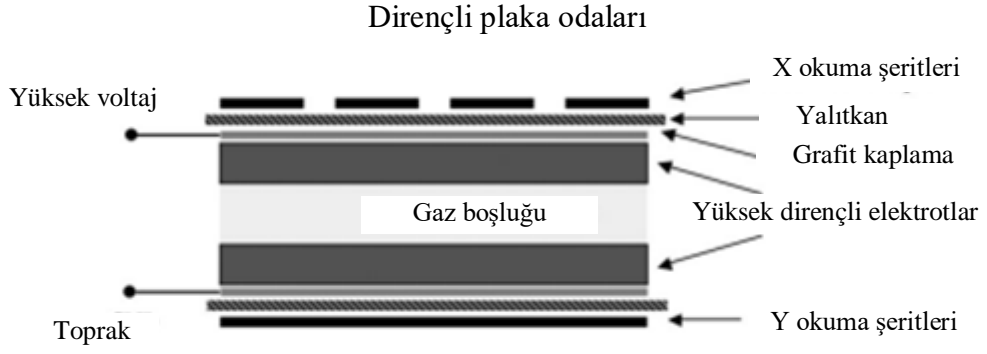
Sonuç olarak, modern bir RPC' nin temel fikri şu noktalarda birleşmiştir:

- Düzlemsel geometri,
- Dirençli elektrotların kullanımı,
- Yüksek gerilimin dirençli elektrotlara sinyal geçirgen dirençli bir katman aracılığıyla uygulanması,
- Büyük yüzeyleri kaplamaya uygun hale getirmek için yapımı kolay detektör üretme fikri.

Bu bölümde yukarıda sayılan hususlara özetle ve karşılaştırmalı olarak değinilecek, ayrıntılar ileriki bölümlerde ele alınacaktır.

İlk gaz detektörleri silindirik bir geometriye sahiptir. Gaz boşluğuna giren iyonlaştırıcı bir parçacık tarafından oluşturulan birincil elektronlar merkezde bulunan bir telde toplanır. Çığ süreçleri ise bu teli çevreleyen bölgede meydana gelir. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı deneylerinde kullanılan karmaşık detektör sistemlerinde silindirik geometrili sayaçlar hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Düzlemsel geometriye sahip detektörler silindirik geometrili detektörlere göre daha sonra geliştirilmiştir. Örneğin Geiger- Muller detektörü gibi silindirik sayaçlarda elde edilenden daha iyi zaman çözünürlüğüne sahip detektör geliştirme ihtiyacı bu detektörlerin geliştirilmesinde etkili olmuştur (Abbrescia ve diğerleri, 2018). Paralel plakalı bir gaz detektörü kabaca, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yüksek gerilim uygulanan düzlemsel plakalar arasındaki gaz boşluğundan ibarettir.



Şekil 2.1. Bir dirençli plaka odasının şeması (Lippmann 2003'ten değiştirilerek alınmıştır)

Paralel plakalı bir gaz detektörü silindirik bir gaz detektörüne göre çok daha iyi zaman çözünürlüğüne sahiptir. Bunun temel nedeni geometrisinden kaynaklanır. Silindirik detektörde elektrik alan merkezi telden yani anottan uzaklaştıkça ters orantılı olarak azalır. Fakat paralel plakalı detektörde elektrik alan -ileriki konularda bahsedilecek olan küçük değişkenler hesaba katılmazsa- tüm geometride aynıdır.

Detektör içindeki gaz boşluğunda oluşan birincil elektronlar eğer ortamdaki elektrik alan düşükse boşlukta sürüklenme (difüzyon) ve tekrar birleşme (rekombinasyon) olayları çok daha fazla gözlenir. Eğer yeterli seviyede elektrik alan varsa birincil elektronlar gaz molekülleri ile birçok çarpışmaya maruz kalır. Yükler daha fazla hızlandırıldıkça çarpışmalar arasında daha büyük kinetik enerjiler elde ederler, öyle ki bu enerji gaz moleküllerinin iyonlaşma potansiyelini aşabilir. Bu durumda, yüklerin diğer nötr moleküllerle çarpışması ve ikincil iyonlaşmaların meydana gelme olasılığı yüksektir. Gaz içinde çarpışmalar arasındaki elektronları, gazın iyonlaşma potansiyelinin üzerindeki enerjilere hızlandırmaya yetecek kadar büyük elektrik alanının bir eşik seviyesi olacağı sonucu çıkarılabilir. Elektrik alanın önemi bu sebebe dayanır. Bu, gazdaki elektronların ortalama serbest yolu ile ilgilidir, ancak bu tür uygulamalarda kullanılan gazların çoğu için bu eşik yaklaşık 10 KV/cm'dir (Cardoso, 2014).

İkincil iyonlaşma ürünleri de yüksek elektrik alanına maruz kalacak ve bu nedenle diğer nötr molekülleri iyonlaştırma şansına sahip olacaklardır. Sonuç olarak, şarj çoğalması bir çağlayan şeklini alacak ve Townsend çığı olarak bilinen şeyle sonuçlanacaktır.

Bu süreç, bir diferansiyel denklem kullanılarak kolayca tanımlanır:

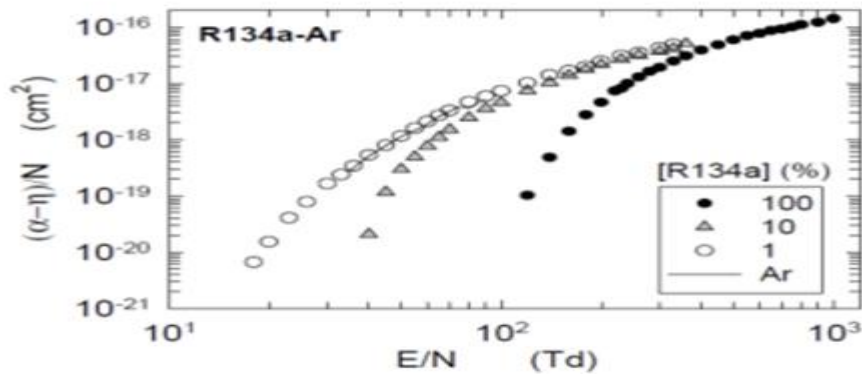
$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (2.1)$$

Burada n elektron sayısını, dn elektron sayısındaki artışı, α Townsend katsayısını ve dx uzunluk artışını temsil eder. Paralel dedektör yapısı için α bir sabittir (Cardoso, 2014).

Ve böylece denklemin çözümü teorik olarak aşağıdaki gibi bir üstel olacaktır:

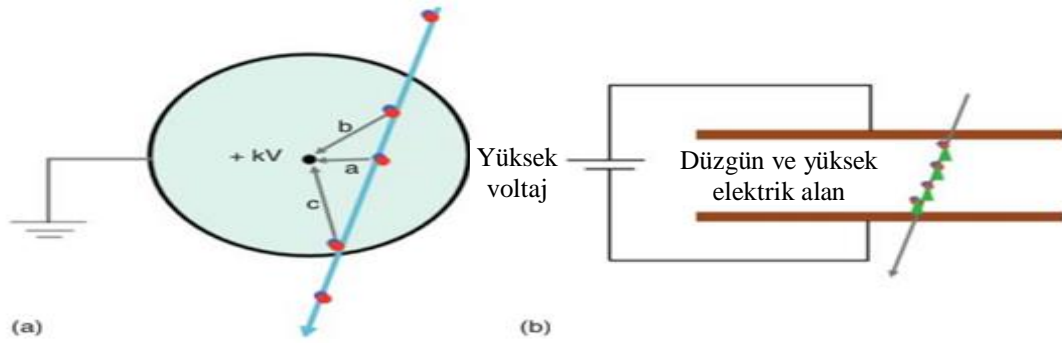
$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.2)$$

Burada n_0 ilk elektron sayısı ve x , başlangıç konumundan olan mesafedir. Townsend katsayısı, yükün dedektör içinde nasıl çoğaldığını yansıtan fiziksel sabittir. Bu sabit, farklı gaz karışımları için tipik bir eğriye sahiptir ve uygulanan elektrik alana göre değişir. Şekil 2.2'de bir cm^3 'teki parçacıkların sayısı ile normalize edilmiş elektrik alanın fonksiyonu olarak etkili Townsend katsayısının deneysel olarak ölçülen eğrisinin (siyah noktalar) bir örneği vardır (R134a için $6.67 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 'tür). Normalleştirilmiş elektrik alan Td cinsindedir ($1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ V.cm}^2$) (Cardoso, 2014). Etkili Townsend katsayısı, oda içindeki rekombinasyon oranını ifade eden Townsend (α) ile bağlantı katsayısı (η) arasındaki farkla tanımlanır.



Şekil 2.2. Çeşitli R134-a karışımları için Td'deki normalleştirilmiş elektrik alanın bir fonksiyonu olarak normalleştirilmiş etkili Townsend katsayısı (Cardoso, 2014)

Silindirik sayaçlarda elektrik alan, merkezi anot teline yakın bölgelerde daha fazla olduğundan, örneğin katoda yakın bir bölgedeki serbest kalmış bir elektronun yeterli enerjiye sahip olup çığ oluşum sürecini başlatabilmesi için anot civarındaki bölgeye kadar elektrik alanın etkisiyle sürüklenmesi gerekir ve bu bölgede elektron çığı oluşturabilir. Dolayısıyla silindirik sayaçta çığ oluşumu anota yakın küçük bir bölgede kısıtlanır. Aynı zamanda Şekil 2.3.a'da gösterildiği gibi birincil elektronların oluşturulması ile çıkış sinyalinin üretilmesi arasındaki süre, farklı birincil elektronların üretildikleri yere bağlı olarak farklı mesafeler kat etmesi gerekeceğinden dolayı, dalgalanmalardan doğal olarak etkilenecektir. Paralel plakalı bir detektörde ise tüm gaz hacmi elektron çığının oluşumu için uygundur. Yani detektörün tüm hacmi bu süreç için kullanışlıdır. (bkz. Şekil 2.3.b)

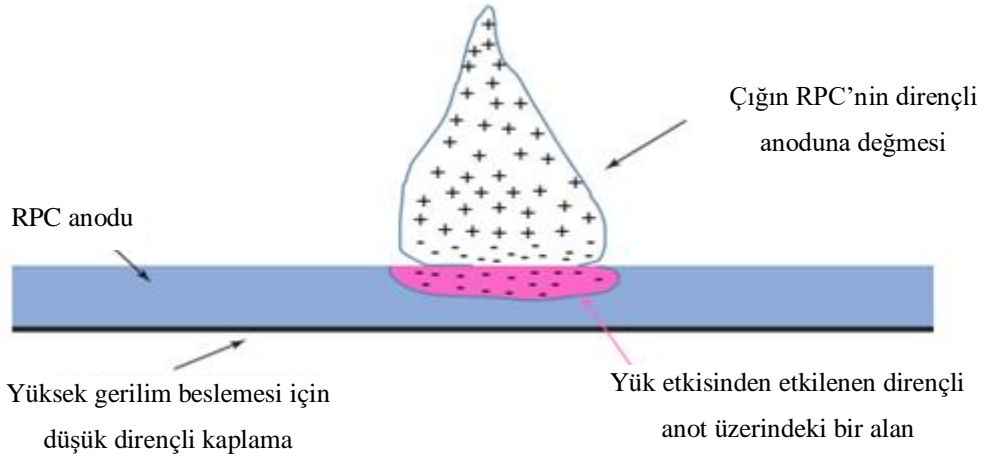


Şekil 2.3. (a) Silindirik bir detektörün şematik gösterimi, birincil elektronların anoda varma süreci. **(b)** Paralel plakalı bir detektör, oluşan birincil elektronlar ve çığ oluşumu (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Diğer bir şekilde ifade etmek gerekirse, paralel plakalı bir detektörde sürüklenme bölgesi ve çoğalma bölgesi gibi ayırım yoktur. Alınan sinyal çeşitli bölgelerde meydana gelen çığ süreçlerinin toplamıdır. Bu da zamanlama dalgalanmalarını azaltır. Sonuç olarak, düzlemsel dedektörler şimdiye kadar gaz dedektörleri ailesinde yüklü parçacıklar için 1 ns' den daha iyi zaman çözünürlüklerine ulaşan yegâne dedektörlerdir. Çok boşluklu dirençli plaka odası (MRPC) detektörü 35 ps' ye ulaşabilen bir zaman çözünürlüğü ile gaz dedektörleri arasında ön sırada yerini almaktadır (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

RPC detektörlerini diğerlerinden ayıran en önemli özelliklerden biri de dirençli elektrotların kullanımınıdır. RPC'lerin bu özelliği, klasik kıvılcım sayaçlarıyla karşılaştırma yapılarak daha net anlaşılabilir. Kıvılcım odası paralel levhalı bir detektördür ve yapı itibarıyla RPC detektörüne benzer. Ancak kıvılcım sayacında kullanılan elektrotlar metaldir. Oysa RPC'de yüksek özdirençli (10¹⁰- 10¹²Ωcm) elektrotlar kullanılır. Bu elektrotlara yüksek gerilim uygulamak için yarı iletken bir kaplama yapılır. Plakalar arası uygun bir gazla doldurulur. Elektrotlardan birine yüksek gerilim uygulanarak plakalar arasında düzgün bir elektrik alan elde edilir. Yukarıda bahsedildiği gibi elektrik alan yeterince güçlüyse, detektör içine giren iyonlaştırıcı parçacık tarafından üretilen birincil elektronlar, elektron çığları oluşturur. Buraya kadar kıvılcım sayaçları ile aynı olaylar meydana gelir.

Çığdaki toplam yük, belirli bir sınırı aşarsa çığ bir flamaya dönüşür. Flama kıvılcım sayaçlarındaki metallere yerine yüksek özdirençli katot plakasına dokunduğunda plakada yüksek bir akım yoğunluğu oluşturmaz. Çünkü dirençli elektrotlar elektronları yayamazlar. Ayrıca anot plakası sıradan bir yalıtkan değil, yüksek gerilim altında pozitif yüklü bir tabakadır. Bu yüzden bir çığ ya da flama anot yüzeyine ulaştığında Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi lokal olarak boşalır. Bu da elektrik alanında bölgesel bir azalmaya neden olur. Boşalan yük azalan elektrik alanla desteklenemediği için yerel kısmi boşalma olsa bile akım yoğunluğunun kısıtlanmasına neden olur. Bu durum, katodu metalik ve anodu dirençli olan hibrit bir RPC ile her iki elektrodu dirençli plakadan oluşan bir RPC karşılaştırıldığında her ikisinde de deşarjda dağılan gücün, hemen hemen aynı olduğu görülmüştür (Abbrescia ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.4. Çıgın dielektrik anoda temas ettiği anda çıgın ve lokal kısmi anot boşalmasının şematik gösterimi (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Deşarjdan sonra voltajın tüm boşlukta düştüğü klasik kıvılcım sayaçlarının aksine, RPC'ler yerel kısmi deşarj etkisinden etkilenmeden tüm alan üzerinde gelen parçacıklara karşı duyarlı kalır. Bu nedenle, ilk günlerde bu dedektöre genellikle sürekli çalışan bir kıvılcım sayacı olarak atıfta bulunulmuştur.

RPC'lerde bir diğer özellik, yüksek gerilimin dirençli elektrotlara sinyal geçiren dirençli bir katman aracılığıyla uygulanmasıdır. Elektrot yüzeylerini elektrotlara göre daha düşük özdirençli hale getirmek için kaplama yapılır. Böylece elektrotlar tarafından indüklenen yük, elektrot yüzeyine eşit olarak daha kolay dağılır ve okuma şeritlerine bu katman aracılığıyla iletilir. Aynı zamanda bu kaplama sayesinde detektörün konum çözünürlüğü de artar.

RPC detektörlerinin basit ve kullanışlı yapısı, elektrotların ucuz ve temin edilebilir olması, bazı küçük pürüzler olsa bile bunlar en aza indirilerek daha büyük yüzeylerde uygulama ve istikrarlı kullanım imkânı sağlamıştır. Örneğin birçok büyük parçacık fiziği deneyinde müon dedektörleri olarak kullanılmak üzere endüstriyel olarak büyük miktarlarda üretilmiştir ve literatürde fazlasıyla açıklanmıştır: BaBar, OPERA, CMS, CERN'de ATLAS ve ALICE, Pekin Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısında BESIII, Tibet'teki kozmik hava sağanağını tespit etmeyi amaçlayan ARGO-YBJ RPC dizisi, 6700 m² 'lik hassas bir alanı kapsayan yaklaşık 2000 RPC modülü kullanır (Sauli, 1977).

RPC'lerde kullanılacak gazların ve gaz karışımlarının seçimi de önemli bir faktördür. Çünkü olayların birçoğu gaz boşluğunda gerçekleşir. Kullanılacak gazlar detektör sistemine zarar vermemelidir. Aynı zamanda seçilecek gazlar çevre dostu olmalıdır. Yani Kyoto Protokolü'nün ardından Avrupa Topluluğu ve diğer ülkelerin düzenlemelerinde öngörüldüğü gibi, ozon tabakasına zarar verme ve küresel ısınmaya neden olma etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Özetle, RPC'lerin benzersiz özellikleri aşağıdaki gibidir:

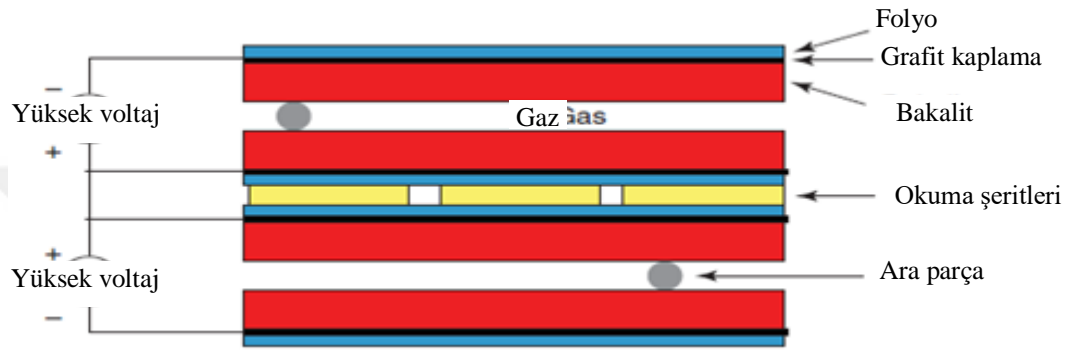
- 1) Sürekli çalışan bir dedektördür (parçacık geçtikten sonra HV (Yüksek Voltaj)'ın kaldırılmasına gerek yoktur).
- 2) İyi konum çözünürlüğü sayesinde (bazı son teknoloji tasarımlarda 30–50 μm) görüntüleme yeteneğine sahiptir.
- 3) Çoklu vuruş yeteneğine sahiptir, yani birçok olayı aynı anda algılayabilir.
- 4) Üstün bir zaman çözünürlüğüne sahiptir. (En gelişmiş konfigürasyonlarda genellikle 50 ps'nin altındadır.)
- 5) RPC'lerdeki deşarjlar sınırlı enerjiye sahiptir ve bu nedenle zararlı değildir ne dedektörü ne de ön uç elektronığı bozarlar.
- 6) Yükleme etkisinin olduğu bölgenin boyutu nispeten küçüktür, bu nedenle odanın geri kalanı aktif kalır.
- 7) RPC'ler elektronik olarak okunabilir ve bunun, örneğin hız ve görüntü işlemede optik kayda kıyasla birçok avantajı vardır.
- 8) RPC'lerin inşa edilmesi nispeten kolaydır ve bazı deneylerde binlerce metrekareye kadar geniş hassas alanları kapsamaya uygundur.

2.2.1. Multigaplı RPC

RPC detektörlerinin geometrik yapısının basit, kullanışlı ve ucuz olması onları farklı tasarımlarda yaparak çalışma performansının değerlendirilmesine olanak tanır. 1990'ların başında RPC'lerin özellikle kozmik ışın deneylerinde kullanılma anlayışının yerleşmiş olması da geometrik yapılarının çeşitlenmesinde etkili olmuştur.

Bir RPC'ye ait okuma setiyle indüklenecek şekilde düzenlenmiş iki boşluklu RPC yapılırsa, bu detektörü geçen bir parçacık her iki boşlukta da elektron-iyon çiftleri oluşturacağı için daha çok indüklenmiş yük demektir.

Çift aralıklı tasarım tek katmanlı RPC'nin %90 ila %95'lik verimliliğine karşılık %98'in üzerinde bir verimlilik sağlar (Grupen ve Shwartz, 2008).



Şekil 2.5. Çift boşluklu bir RPC düzeneği (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Şekil 2.5.'te görülen çift boşluklu RPC'de voltaj, her iki boşlukta üretilen elektronların merkezi okuma şeritlerine doğru hareket edecek şekilde uygulanmıştır. Bu durumda indüklenen her iki sinyal de pratik olarak eş zamanlı olacak yani aynı polariteye sahip olacaktır. Ve merkezi okuma şeritlerinde toplanacaktır. Bu da cihazın verimini artıracaktır. Toplam verimsizlik, her iki odanın da verimsiz olma olasılığı olduğundan, yani:

$$(1-\epsilon_{tot}) = (1-\epsilon_1)(1-\epsilon_2)$$

Basit bir yaklaşımla;

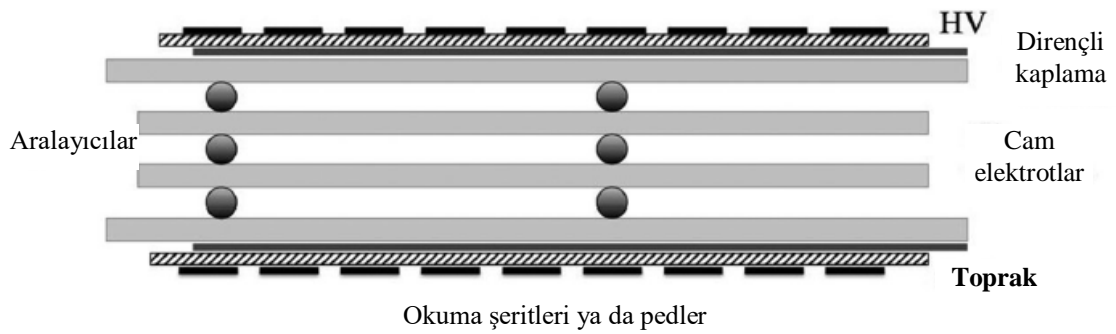
$$\epsilon_{tot} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1\epsilon_2 \quad (2.3)$$

Bağıntısıyla verilebilir. Burada toplam verimlilik standart verimlilik formülüne göre daha yüksektir. Çünkü okuma elektrotlarına gelen sinyal, yalnızca her iki boşlukta gelen sinyallerin dijital toplamı değil, aynı zamanda analog toplamdır. Yani iki sinyalin

anlık değerlerini toplar. Toplam genlik eşiği geçebilir, bu nedenle her iki boşluktan gelen her iki sinyal de eşiğin altında olsa bile sinyal algılanır. Detektör geometrisi, kullanılan gaz ve elektrik alanı sabit tutularak tek boşluklu bir RPC ile karşılaştırıldığında, çift boşluklu bir RPC'nin zaman çözünürlüğünün tek boşluklu bir RPC'nin zaman çözünürlüğünden en az $1/(2-\sqrt{2})$ kat daha iyidir. Bunun nedeni aynı çarpan parçacıklara ait iki bağımsız sinyalin detektörle ölçülen eşik geçiş süresini en hızlı belirlemesidir (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Çift boşluklu RPC, ilk olarak Büyük Elektron Pozitronu arpıştırıcısı (LEP) L3 deneyinde, daha sonra CERN'deki Büyük Hadron arpıştırıcısı'ndaki (LHC) Kompakt Müon Selenoidi (CMS) deneyinin müon sisteminde kullanıldı.

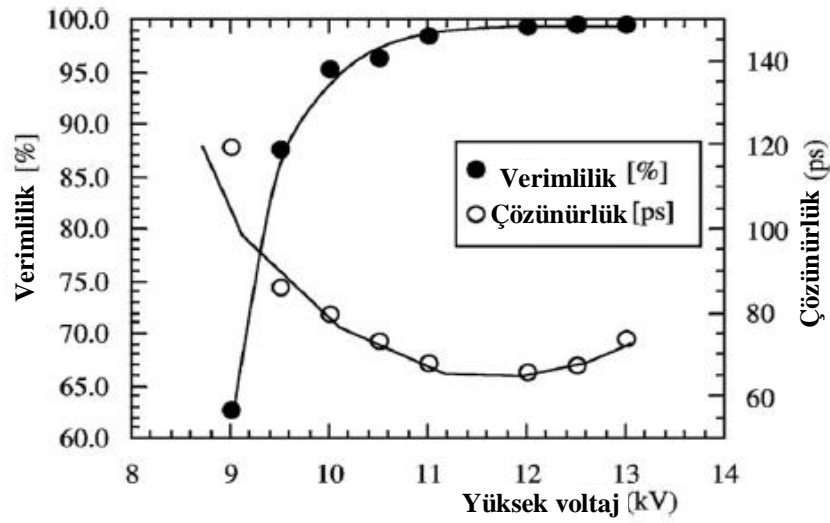
Başlangıçta ayrı ayrı güçlendirilmiş dirençli plakalarla üretilen bu konsept, yüksek voltajın yalnızca çok boşluklu bir istifteki dış plakalara uygulanması üzerine, ara yüzen elektrotların dinamik olarak uygun denge potansiyeline ulaştığının ve bunların gerekli olmadığının keşfedilmesiyle gelişti. Şekil 2.6'te Şematik olarak gösterildiği gibi tasarlanan bu dedektör, yapısını büyük ölçüde basitleştirir. Büyük ebatlar için boşluklara gerilen ince misinalar homojenlik sağlar ve elektrostatik kuvvetlerden kaynaklanan deşormasyonları önler (Sauli, 1977).



Şekil 2.6. Beş boşluklu bir MRPC'nin Şeması. Đalışma voltajı, dış plakalara uygulanan dirençli katmanlara uygulanır; harici yalıtımlı devrelerde sinyaller algılanır (Sauli, 1977)

Çok boşluklu RPC'ler (Multigap RPC), MRPC olarak adlandırılır.

Her boşluk daha sonra bağımsız olarak çalışır; iyonizasyonun başlamasının ardından çığlar gelişir ve dış elektrotlar üzerindeki yük birikimi yoluyla eşit ve zıt kutup sinyalleri indüklenir; daha büyük ve daha hızlı sinyaller yapının zaman çözünürlüğünü belirler. Şekil 2.7, ince yüksek dirençli cam plakalar üzerine inşa edilmiş beş adet 220 µm kalınlığında boşluklu MRPC ile voltajın bir fonksiyonu olarak hızlı parçacıklar için ölçülen verimliliği ve zaman çözünürlüğünü gösterir; gaz dolumu %90 C₂F₄H₂, %5 i-C₄H₁₀ ve %5 CF₄ karışımıdır (Sauli, 1977).



Şekil 2.7. Beş boşluklu bir MRPC için voltajın bir fonksiyonu olarak verimlilik ve zaman çözünürlüğü (Sauli, 1977)

Burada cam elektrotların çok yüksek direnci nedeniyle hızı sınırlı olur. Buna rağmen yapısı gereği, yüksek alan yüküne sahip bölgelerin oluşmasına bölgesel bir kazanç azalmasıyla tepki vererek işlemi kararlı hale getirir.

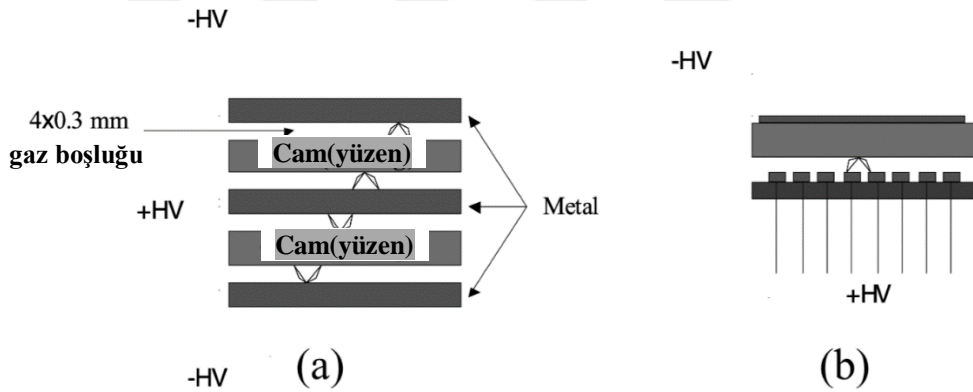
Sonuç olarak daha büyük boşluklarla büyük verimlilikler elde edilebilir, ancak bu aynı zamanda flama olma olasılığını da artıracaktır. Çok sayıda daha küçük boşluk, flama olasılığını azaltmakla birlikte iyi verimlilik elde edilmesini sağlar. Dikkate alınması gereken bir başka değişken, elektrotlara uygulanan voltajın ne kadar yüksek olması gerektiğidir. Daha yüksek bir voltaj, daha iyi bir verime katkıda bulunacak, ancak aynı zamanda akış olasılığını da artıracaktır. Günümüzde, düşük fiyat yüksek kalite oranı

nedeniyle RPC teknolojisi kullanılarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Özellikle nükleer ve parçacık fiziği deneylerinde kullanılırlar (Cardoso, 2014).

2.2.2. Hibrit Tasarımlar

İki veya daha fazla dedektör tipini aynı tasarımda birleştiren dedektörler hibrit dedektörler olarak anılır. Hibrit (melez) RPC, metalik ve dirençli elektrotların birleştirilmesiyle yapılan RPC'dir.

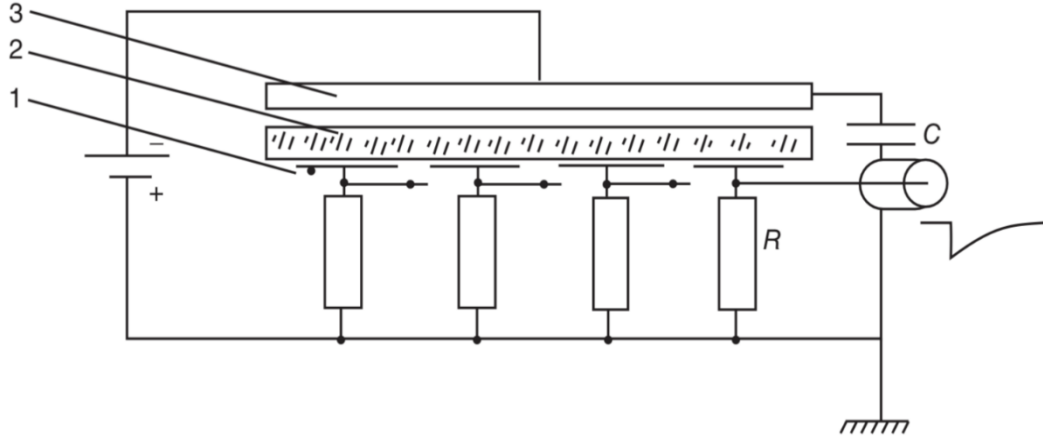
Metalik ve dirençli elektrotlar birleştirilebilir ve bu tasarım RPC'nin ana özelliğini korur. Çünkü bu şekilde de şiddetli deşarjlar engellenebilir. Sadece dikkat edilmesi gereken nokta, hiçbir gaz boşluğunun iki metalik elektrotla sınırlandırılmamasıdır.



Şekil 2.8. Hibrit (metalik+ dirençli elektrotlar) RPC'lerin birkaç şematik örneği a) Dört boşluklu bir zamanlama sayacı b) MikroRPC (Fonte, 2000)

Aslında, bir gaz boşluğunu tanımlayan iki paralel metalik elektrottan oluşan gaz sayacı, ağır iyonların tespitinde geniş bir uygulama bulan Paralel Plaka Odası (PPC) olarak adlandırılır ve uzun zaman önce yüksek oranlı uygulamalar için önerilen tel örgü elektrotlarla uygulandı. Fakat deşarjların olumsuz sonuçları nedeniyle, bu tür bir sayacı yüksek enerji fiziği deneylerinde hiçbir zaman geniş bir kabul görmedi (Fonte, 2000).

Bu arada 1970'lerde ilk RPC prototipleri tasarlanırken yani kıvılcım sayaçlarından (PSC) dirençli elektrotla dedektör tasarımına geçerken hibrit RPC'ler denendi. Bunlardan biri, Şekil 2.9. Bakır katodlu cam anotlu RPC (Abbrescia ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.9. Parkhomcuk ve arkadaşları tarafından tasarlanan ve test edilen RPC'nin ilk tasarımının şeması. Şekilde numaralandırılan malzemeler; 1-iletken katman, 2-yarı iletken cam, 3- bakır katot (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi bakır bir katoda ve Yu tarafından geliştirilen özel bir camdan yapılmış anoda sahipti. Pestov; ilk testlerde özdirenci sırasıyla 2×10^8 ve 4×10^9 Ωcm olan ve aktif alanı 600 cm^2 olan iki numune kullanıldı (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Bu dönemlerdeki yeni tasarımlarda sadece bir dirençli plaka kullanılması yaygınlaşmıştır ve sinyal alımı haznenin içinde gerçekleştirilir. Anot düzleminin iç yüzeyine ince film kaplama yapılarak gaz katmanından anoda ulaşan elektronlar önce bu katı hal katmanına aktarılarak da hibrit RPC'ler geliştirilebilir. Bu ve benzer tasarımlar RPC'leri daha fonksiyonel hale getirebilir. Örneğin RPC'lerde yaygın olarak kullanılan r134a ve SF6 gazlarının olumsuz etkilerini yok etmek için alternatif olarak sera etkisi ihmal edilebilir düzeyde olan gaz veya gaz karışımları keşfetmemize olanak sağlar. Ayrıca daha yüksek hız kapasitesi ve daha yüksek kolimasyona sahip çığlar oluşturulmasına izin verir (Tosun, Bilki ve Sahbaz, 2023).

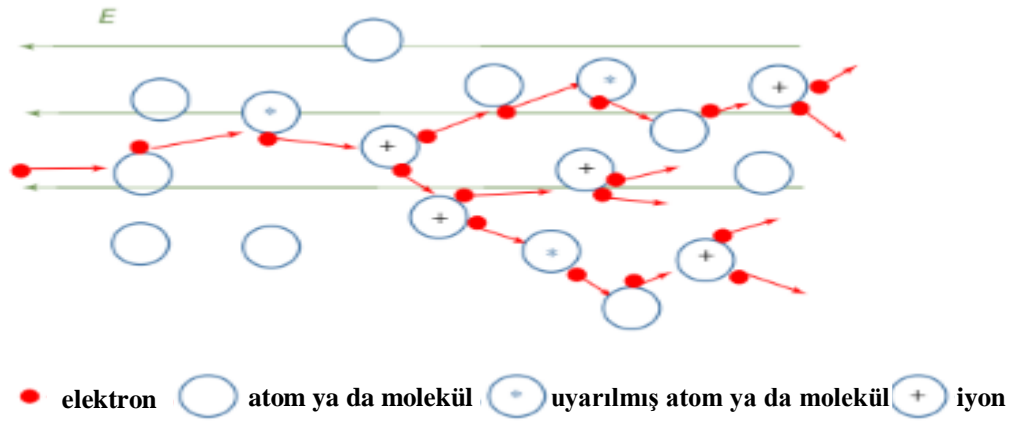
2.3. Dirençli Plaka Odası Çalışma Modları

Gazlarda elektron çığ çoğalması ilk olarak 1897 ile 1901 yılları arasında John Sealy Townsend tarafından gözlemlendi ve daha sonra dikkatlice incelendi. Metreküp başına molekül veya atom sayısı, bu olayların gerçekleştiği gazla dolu alanın geometrisine bağlıdır. Elektrik alanının etkisi altında gaz içinde sürüklenen serbest bir elektron, etrafındaki atomlar ve moleküller ile elastik ve elastik olmayan şekilde iki kategoriye ayrılabilir çeşitli çarpışmalar yapar. Esnek çarpışmalarda elektron sadece hareket yönünü değiştirir, ancak kinetik enerjisini kaybetmez. Sonuç olarak, elektron, ΔV potansiyel farkı ile karakterize edilen bir bölgeyi geçtikten sonra bir kinetik enerji kazanacaktır:

$$E_k = |q_e| \Delta V \quad (2.4)$$

Burada q_e , elektronun temel elektrik yüküdür (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Esnek olmayan çarpışmalar, yüksek elektrik alanıyla ilgilidir; bu durumda elektron, kinetik enerjisinin bir kısmını kaybeder ve bu, ya çeşitli seviyelerde atomların veya moleküllerin uyarılmasına (atomlar için elektronik, moleküller için dönme, titreşim ve elektronik) veya bunların iyonlaşmasına yol açar. İkinci durumda, gaz hacminde Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi öncekine ek olarak başka bir serbest elektron ortaya çıkar (Abbrescia ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.10. Bir gazda Townsend çığ gelişiminin şeması: Yeterince yoğun bir elektrik alanında sürüklenen (soldan gelen) serbest bir elektron, atomlar ve moleküller ile elastik ve elastik olmayan çarpışmalar yaşar, bu da yeni serbest elektronların yanı sıra uyarılmış veya iyonize atomik veya moleküler türlerin oluşmasıyla sonuçlanır (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Çığın oluşma sürecinin, Townsend katsayısına bağlı ifadesi Denklem 2.1. ve Denklem 2.2.'de verilmişti. Buna göre n_0 tane birincil elektron bir çığ başlatırsa, o zaman oluşturulan elektronların toplam sayısı, n_0 ile orantılı olacaktır. "Orantılı sayaç" terimi bu yüzden kullanılır.

$$n_e = n_0 \exp(ad)$$

ve değer;

$$A = \exp(ad)$$

Burada A, genellikle çarpma faktörü veya "gaz kazancı" veya basitçe "kazanç" olarak adlandırılır (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

$$A = \exp \int_a^b \alpha(E(x)) dx \quad (2.5)$$

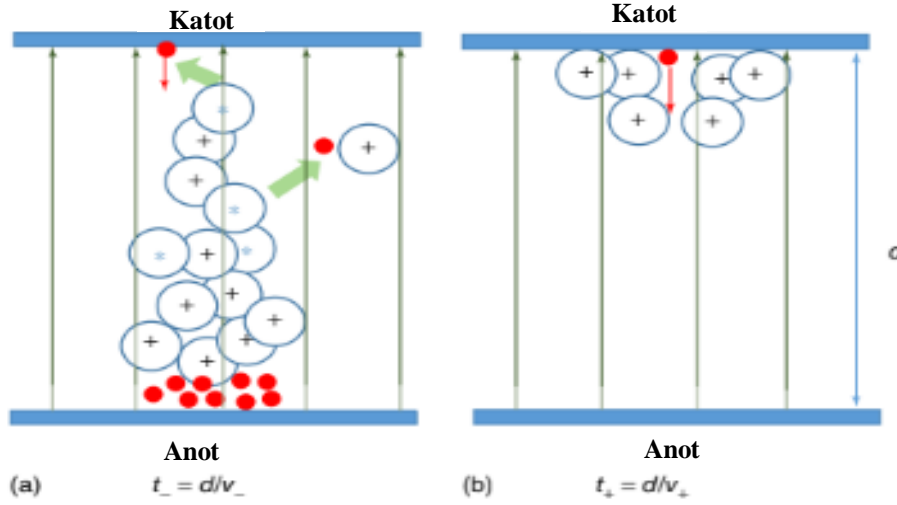
Bu denklemde a ve b çığın ilk ve son noktasının koordinatlarını temsil eder.

Bir elektrik alanındaki elektron sürüklenme hızı (v^-) iyon sürüklenme hızından (v^+) - tipik olarak 1000 mertebesinde bir faktör- daha büyüktür. Sonuç olarak, bir çığ, enerjisi yüksek elektronlar tarafından oluşturulan anoda doğru hareket eden hızlı bir "baş" ve geride kalan, yavaşça ters yönde sürüklenen pozitif iyonlardan oluşan konik şekilli bir "gövde" den oluşur (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Paralel levha geometrisi durumundaki çığ yapısı, iki temel moment için Şekil 2.10.'da gösterilmektedir:

- 1) $t^- = d/v^-$, çığ elektronları anoda ulaştığında;
- 2) $t^+ = d/v^+$, son pozitif iyonlar katoda ulaştığında.

RPC'lerde kullanılan elektrik alan 50–100 kV/cm mertebesindedir ve bu nedenle elektronların anoda ulaşma süresi birkaç nanosaniye, pozitif iyonların katoda ulaşması ise birkaç mikrosaniye mertebesindedir. Uyarılmış atom ve molekül seviyelerinin uyarılması farklı kanallarla olabilir. Bunların en önemlilerinden bir tanesi de ultraviyole (UV) foton emisyonudur. Fotonların yüksek enerjisi sebebiyle etrafındaki atom ve moleküllerin fotoiyonlaşmasına neden olabilir ve böylece fotoelektronlar denilen ikincil elektronlar da oluşabilir. Buna bazen foton-elektron geri besleme süreci de denir. Bu durum Şekil 2.11.a'da gösterilmiştir.



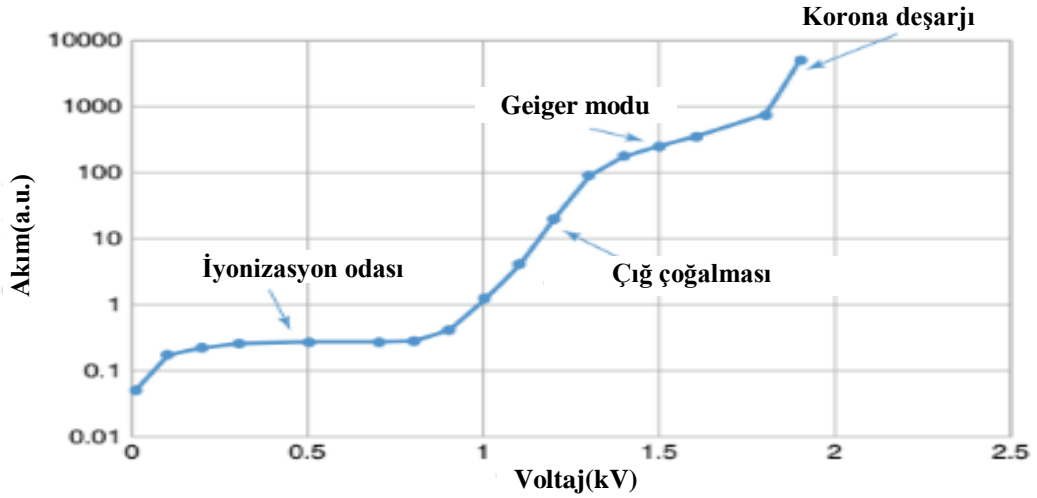
Şekil 2.11. Çığ yapısının iki zaman aralığındaki şematik gösterimi. (a) $t^- = d/v^-$ ayrıc gazın kendi kendine fotoiyonlaşmasıyla oluşturulan bir elektronu da gösterir ve (b) $t^+ = d/v^+$, olası bir iyon fırlatılmış elektronu da gösterir. $t = 0$, çığın katotta tek bir elektron tarafından başlatıldığı zamana karşılık gelir. Küçük dolu daireler elektronları, ortasında “+” işareti bulunan açık daireler ise pozitif iyonları temsil eder (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Tüm çığ elektronları anoda ulaştıktan sonra (t^- sürede), Şekil 2.11.b’de gösterildiği gibi iyonlar hala yavaş sürüklenmelerine devam ederler ve bir t^+ anında son iyonlar katoda ulaşır.

Çığların gelişimi boyutlarına bağlıdır. Eğer küçük boyutlardaysa, detektör içindeki elektrik alanın tamamının kullanılan elektrot konfigürasyonuna ve uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan elektrik alandan oluştuğu söylenebilir. Bu arada çığın “kafa” kısmı negatif elektron, “gövde” kısmı ise pozitif iyon yoğunluklu olduğu için detektör içindeki elektrik alana ters yönde bir elektrik alan oluşturduğuna dikkat edilmelidir. “Uzay yükü etkisi” denilen bu durum, yeterince büyük çığlar oluştuğunda ihmal edilemez ve çığ gelişimini etkiler. Şekil 2.12.’de uzay yükü etkilerinin görünümü gaz kazanç eğrisinin düz çizgiden logaritmik olarak saptmaya başlamasıyla belirtilir.

Burada bahsedilen uzay yükü etkileri, dirençli dedektörlerin çalışmasında çok önemli bir rol oynar. Şekil 2.12.’de "Geiger modu" olarak etiketlenen aralıkta uygulanan voltajı orantısal bölgenin ötesine yükselterek, dedektörden gelen tüm darbelerin genliği,

birincil iyonlaşma n_0 'dan bağımsız olarak neredeyse birbirine eşit olur. Kullanılan gaz da bağı olarak, bu bölgede her birincil elektrona “ardıllar” adı verilen bir veya daha fazla ikincil çığ eşlik eder. Böylece Şekil 2.12.’da “korona deşarjı” olarak belirtilen bölgede sürekli bir deşarj belirir (Abbrescia ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.12. Fotonlar veya yüklü parçacıklar tarafından ışınlanan tek telli bir sayaç için tipik voltaj-akım özellikleri (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

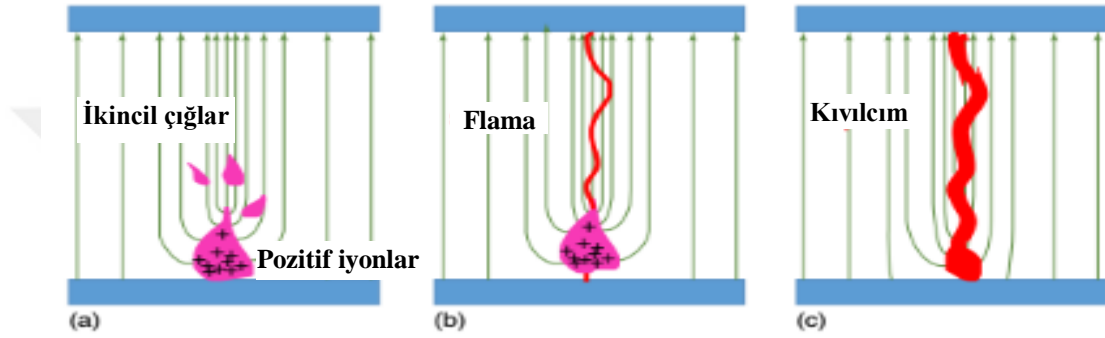
Dolayısıyla iki çalışma modu arasında net bir ayırım yoktur. RPC’de kullanılan dirençli elektrotlar sayesinde- RPC’den önce harici dirençler kullanılarak yapılıyordu- önemli ölçüde voltaj düşer (ΔV) ve gazdaki elektrik alanını da geçici olarak düşürür. (Bu durum Bölüm 2.2.’de açıklanmıştı.) Bu da sonuç olarak korona deşarjının kesintiye uğramasına neden olur. Buna deşarj söndürme etkisi denir.

Düşük gaz kazanımlarında çığ oluşumu silindirik ve paralel plakalı detektörler için oldukça benzerdir. Fakat yüksek gaz kazançlarında farklılıklar ortaya çıkar. Özellikle RPC gibi paralel plakalı detektörde hızlı ve yavaş bozulma şeklinde iki durum ortaya çıkar. Hızlı bozulma durumunda, birincil çığlardan kıvılcıma geçiş gözlenir.

$$An_0 \geq 10^8 \text{ elektron} \quad (2.6)$$

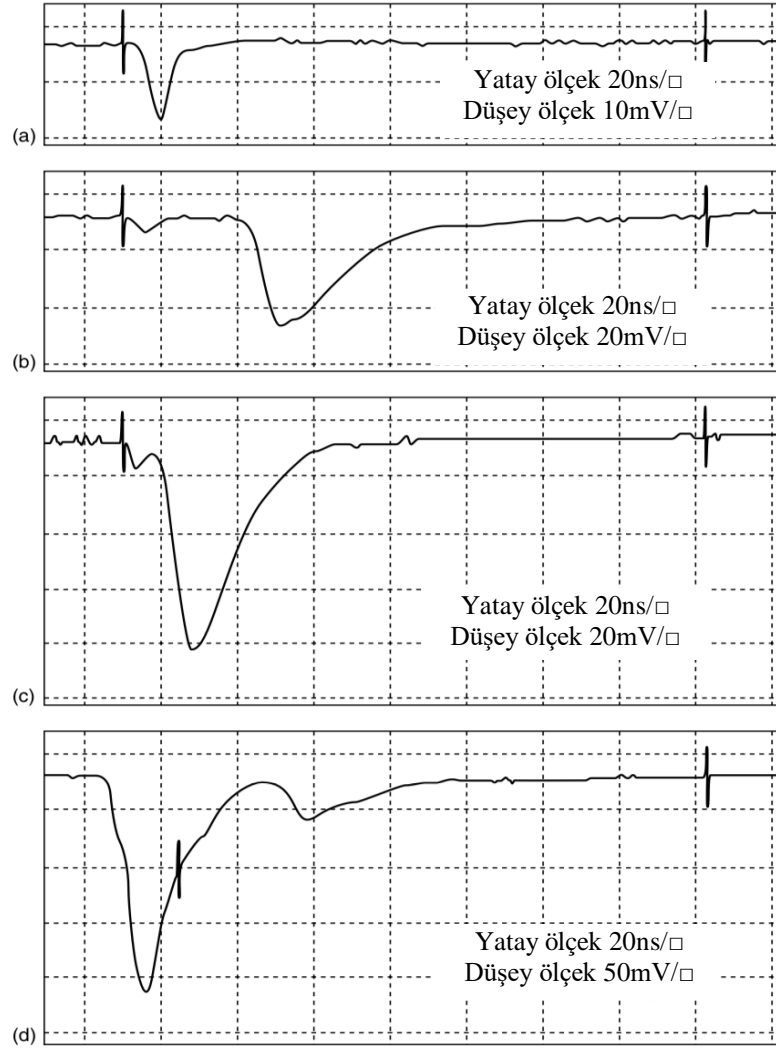
“Raether limiti” olarak adlandırılan bu koşulda yukarıda bahsedilen uzay yükü etkisiyle oluşan elektrik alan, harici olarak uygulanan elektrik alanla karşılaştırılabilir hale gelir.

Sonuç olarak, çığ çevresindeki alan çizgileri, çığın "pozitif" gövdesine doğru bükülür, dolayısıyla birincil çığın hacmine yakın başlayan ikincil çılgar, cisme doğru sürüklenmeye başlarken, yakınlardaki artan elektrik alan nedeniyle güçlü bir şekilde çoğalırlar. Böylece iyonik kolon oldukça hızlı bir şekilde katoda doğru büyüyerek, Şekil 2.13.b'de şematik olarak gösterilen, flama (Kanal veya Kanal mekanizması) adı verilen ince bir plazma kanalının oluşumuna yol açar. Flama katoda değdiğinde bu iletken kanal vasıtasıyla güçlü bir kıvılcım oluşur (Şekil 2.13.c).



Şekil 2.13. Çıgdaki toplam yük Raether sınırına ulaştığında kıvılcım gelişiminin üç aşaması: (a) çığa yakın alan çizgileri bir odaklanma etkisi yaşar ve bazı ikincil çılgar pozitif iyonların "gövdesine" doğru hareket etmeye başlar; (b) ince bir plazma filamanı – bir flama (veya Kanal) – oluşur; (c) Flama elektrotlara ulaştığında bu şekilde açılan kanaldan bir kıvılcım oluşur (Abbrescia ve diğerleri, 2018)

Bu sürece hızlı bozulma denir. Sonunda, herhangi bir söndürme mekanizması mevcut değilse, kıvılcım, detektör anot-katot kapasitansını tamamen boşaltacaktır. Elektrotlar arasındaki voltaj daha da artırılırsa, flama yalnızca katoda değil anoda da yayılabilir. Yavaş bozulma mikrosaniyeler veya hatta daha uzun bir zaman ölçeğinde geliştiği için bu şekilde adlandırılır. Örneğin çok temiz asal gazlarla doldurulduklarında veya yüksek UV ve görünür foton hassasiyetine sahip foto katotlarla yapıldıklarında flama oluşma şartları Raether sınırından çok daha önce gerçekleşir. Yavaş yıkım, birkaç veya bazen düzinelerce ikincil sürecin üretilmesi yoluyla gelişir. Çoğu durumda bir kıvılcıma da yol açar, ancak bazı durumlarda bir tür parıldayan deşarj olarak da kabul edilebilir (Abbrescia ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.14. Çeşitli çalışma voltajlarında bir Bakalit RPC'den (10/7/83) oranında Ar/i-C4H10/C2H2F4) kaydedilen sinyal dalga formları: a) sırasıyla V + 9.6 ve 10.2 kV'de bir çığ sinyali (V = 9.4 kV), (b,c) çığ ve kıvılcım sinyalleri ve (d) kıvılcım sinyali ve ardından bir kıvılcım atması (Nappi ve Peskov, 2013)

Şekil 2.14., çeşitli çalışma voltajlarında bir Bakalit RPC'den kaydedilen sinyal dalga formlarını göstermektedir. Şekil 2.14.a, bir çığ sinyalini göstermektedir; tipik bir 4 – 5 ns FWHM süresine sahiptir ve genliği, yaklaşık 10mV doyuma ulaştığı yaklaşık 9,2 kV'a kadar çalışma voltajına üstel olarak bağlıdır. Daha yüksek voltajlarda, çığ sinyalini düşük enerjili bir kıvılcım sinyali takip etmeye başlar (bkz. Şekil 2.14.a, b'de gösterilen dalga biçimlerindeki fark). Daha da yüksek voltajlarda (Şekil 2.14.c), çığdan flama gecikmesine, Şekil 2.14.d'den açıkça görüldüğü gibi kademeli olarak kısalmaya başlar (Nappi ve Peskov, 2013).

Bir dedektörün enerjiyi ölçme yeteneği, enerji çözünürlüğü ile karakterize edilir. Enerji çözünürlüğü, monoenerjik iyonlaştırıcı parçacıkları emen dedektörden elde edilen sinyallerin pik yüksekliği dağılımındaki enerji tepe genişliği olarak ölçülür. Pik genişliğini değerlendirmenin birkaç yolu vardır, en yaygın yol, tam genişlik olarak adlandırılan pikin maksimum yarısı (FWHM) ölçmektir (Aprile, Bolotnikov, Bolozdynya ve Doke, 2006).

Çalışma modu, dirençli bir gaz dedektörünün hız kapasitesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Örneğin, bazı özel çığ RPC tasarımları (microgap-multigap) şu anda dedektör için 50-60 ps zaman çözünürlüğüne ulaşmaktadır. Bu zaman çözünürlüğü, yüksek basınçlı mikro boşluklu RPC'leri kullanan Pestov grubu tarafından daha önce 30 ps gibi rekor bir değere ulaşılmıştır. İyi zamanlama potansiyelinin yanı sıra, gelişmiş çalışma modunun çok önemli başka özellikleri de vardır: çok daha yüksek hız kapasitesi, düşük çalışma voltajı, düşük sahte darbe seviyesi ve çığ modunda olduğundan daha çeşitli gaz karışımlarında çalışma yeteneği (Nappi ve Peskov, 2013).

Streamer(flama) modda çalıştırılan bir RPC'de gaz içinde flamalar geliştirildiğinde, elektrot yüzeylerine taşınan yük miktarı, aynı cihazları çığ modunda çalıştırmaktan çok daha yüksek olan birkaç yüz pC'a kadar ulaşabilir. Bunun sonucu, yerel elektrik alanında daha etkin bir azalmaya neden olur ve elektrotların daha büyük kısımlarını boşaltır. Bu nedenle, streamer modunda çalıştırılan cihazlar, çığ modunda çalıştırılan aynı cihazlara göre çok daha düşük hız yeteneğine sahiptir.

2.4. Timing RPC ve Trigger RPC

2.4.1. Zamanlama RPC'leri (Timing RPC)

Nanosaniye ölçeğinden çok daha iyi bir zaman çözünürlüğü sağlamak için özel olarak tasarlanmış RPC'lerdir. Bu yönde ilk çalışmalar ALICE deneyinin TOF detektörü için Ar-Ge çalışmalarında ortaya çıktı. Çünkü 100 m²'den fazla olan geniş alan, foto çoğaltıcılar tarafından plastik sintilatör çubuğu kullanarak okuma yapmak imkansızdı (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Dolayısıyla zamanlama RPC'lerini daha iyi anlamak için öncelikle TOF'un (Time of Flight-Uçuş Zamanı) tanımlanması gerekli olacaktır.

2.4.2. TOF (Time of Flight-Uçuş Zamanı)

Parçacık hızını belirlemenin doğrudan bir yolu, L mesafesiyle ayrılmış iki nokta arasındaki uçuş süresini (TOF) ölçmektir. Bu iki nokta, "başlangıç" ve "dur" sinyalleri sağlayan iki sayaç veya parçacık üretim anı ve bir durdurma sayacı ile tanımlanabilir. İkinci durumda, ışın-kiriş veya ışın-hedef çarpışması ile senkronize edilen "başlangıç" sinyali, hızlandırıcı sistemi tarafından üretilebilir (Grupen ve Shwartz, 2008).

M_1 ve m_2 kütleli iki parçacık, aynı momentum ve uçuş mesafesi L için uçuş zamanı farkına sahiptir.

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right)$$

Bu formülde $pc = \beta E$ eşitliğini kullanarak aşağıdaki formülü elde edilir (Grupen ve Shwartz, 2008):

$$\Delta t = \frac{L}{pc^2} (E_1 - E_2) = \frac{L}{pc^2} \left(\sqrt{p^2 c^2 + m_1^2 c^4} - \sqrt{p^2 c^2 + m_2^2 c^4} \right)$$

$$p^2 c^2 \gg m_{1,2}^2 c^4$$

Kullanarak kareköklerin açılımı şu ifadeyi verir:

$$\Delta t = \frac{Lc}{2p^2} (m_1^2 - m_2^2). \quad (2.7)$$

Farklı kütleler için $\Delta t = 4\sigma t$ 'lik bir zaman farkının olduğunu varsayalım. Yani, zaman çözünürlüğünün dört katı bir uçuş süresi farkı gereklidir. Bu durumda, 1 m'lik bir uçuş mesafesi için 1 GeV/c'lik bir momentuma ve $\sigma t = 100$ ps'lik bir zaman çözünürlüğüne

kadar bir pion/kaon ayrımı elde edilebilir; bu, örneğin sintilasyon sayaçları ile elde edilebilir. Daha yüksek momentumlar için, uçuş süresi sistemleri $\Delta t \propto 1/p^2$ 'ye bağlı olarak daha da uzar. Yüksek enerji fiziğinde TOF ölçümleri için en gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan teknik, PM-tüp okumalı plastik sintilasyon sayaçlarına dayanmaktadır. Zaman çözünürlüğü için bir başka teknik düzlemsel kıvılcım sayaçlarıdır. Düzlemsel kıvılcım sayaçlarında kullanılan metalik elektrotlar yerine dirençli elektrotların kullanıldığı RPC'lerde ise çok daha iyi zaman çözünürlüğü elde edilir ve yüklü parçacıkların varış zamanı belirlenir (Gruppen ve Shwartz , 2008). Çığlar gazda iyon çiftleri oluştuktan hemen sonra başladığından ve elektronların toplanması gereken mesafeler küçük olduğundan, RPC'ler hızlı zamanlama avantajı sunarlar (Knoll, 2010).

Günümüzde elde edilen mükemmel zaman çözünürlüğü sayesinde, LHC'deki ALICE deneyi ile uçuş süresinin ölçülmesi yoluyla partikül tanımlaması yapmak için, cam MRPC'ler kullanılır (Sauli, 1977).

Ayrıca HARP – CERN'in proton senkrotronunda bulunur. Bu zamanlama RPC sistemi, MeV mertebesinde bir momentuma ve 200 ps'den daha iyi bir zaman çözünürlüğüne sahip parçacıkları tespit etmek için tasarlanmıştır. STAR – CERN'de bulunur. RHIC'de (Göreceli Ağır İyon Çarpıştırıcısı) çalışmak üzere tasarlanmıştır, yine zamanlama RPC'lerini kullanır ve 60 m²'lik bir alanda 100 ps'nin altında bir çözünürlük sağlar.

FOPI – Darmstadt'ta (Almanya) GSI-SIS'de bulunur. Çok aralıklı zamanlama RPC'leri ile çalışır ve bu listedeki diğerleriyle karşılaştırılabilir zaman çözünürlükleri ve verimlilikleri elde etmesine rağmen daha küçük bir alanı (5 m²) kapsar. HADES – Darmstadt'ta (Almanya) GSI-SIS'de bulunmaktadır. Bu bir elektron pozitron spektrometre deneyidir ve kabaca yukarıdakilerle aynı verimlilik ve zaman çözünürlükleriyle 8 m²'lik bir alanı kaplamak için standart bir zamanlama RPC duvarı kullanır (Cardoso, 2014).

2.4.3. Trigger RPC'ler (Tetikleyici RPC'ler)

Yüksek enerji fiziğinde, bir tetikleyici, bir parçacık dedektöründeki hangi olayların seçileceğine ve daha fazla işleyeceğine hızla karar vermek için kriterleri kullanan bir sistem olarak tanımlanabilir (Abbrescia ve diğerleri, 2018). Tetikleyici RPC'ler, tetikleme amacıyla kullanılan geniş boşluklu dedektörlerdir. Gelen parçacık hızına bağlı olarak, düşük oranlı deneylerde flama modunda veya oran daha yüksek olduğunda çıkış modunda kullanılabilirler. Bir tetikleyici RPC, geniş aralığı (1-3 mm) ve yüzlerce pC sırasına göre deşarjda bulunan yüksek yükleri ile karakterize edilir. Bu tür bir RPC'nin zamanlama çözünürlüğü, boşluk genişliği nedeniyle nanosaniye ölçeğindedir. Sinyalleri tespit etmek için özel amplifikasyon elektroniği gerekmediğinden, flama modunda toplanan yüksek yükler tetikleyici RPC'lerin kullanımını kolaylaştırır. Tetikleyici RPC'ler, ATLAS, CMS ve ALICE gibi çalışan birkaç CERN deneyinde kullanılır. Ayrıca LEP'de L3 gibi önceki deneylerde de kullanılmıştır (Garcia, 2014).

ATLAS Muon Tetikleyici

Bir Torodial LHC Aparatı olan ATLAS, CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki (LHC) dört ana deneyden biridir. Temel amacı, yüksek enerjilerde kafa kafaya proton çarpışmalarını araştırmaktır. Dedektör, en dış kısmını kaplayan 3650m²'lik bir alanda ve 355.000 bağımsız okuma kanalıyla donatılmış Dirençli Plaka Odalarından oluşmuştur (Lippmann 2003). Bu şekilde bir Muon Spektrometresi ile bir namlu konfigürasyonunda düzenlenmiştir. RPC'ler, yüksek verimlilik (~ %97), ~ 2-3 ns zaman çözünürlüğü, ~ 100 cm² s⁻¹ hız yetenekleri ve 5-10 mm uzamsal çözünürlüğe sahip azimuthal koordinat ölçümü gereksinimlerini karşılamak için kullanılır. Bu RPC'ler, iç yüzeyleri (1-4) ×10¹⁰ Ωcm kütle direncine sahip keten tohumu yağı ile işlenmiş bakalit elektrotlarla üretilmiştir. Kullanılan gaz karışımı %99.7/5%/0.3'lük fraksiyonlarda C2H2F4/C4H10/SF6'dır (Garcia, 2014).

ALICE Tetikleyici

Bir Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi olan ALICE, LHC'deki nucleus-nucleus collisions çalışmasına adanmıştır. Alt dedektörlerden biri olan di-muon spektrometresi, flama modunda çalıştırılan RPC'leri kullanır. Bu RPC'ler 3×10⁹ Ω cm kütle direncine sahip

bakalitten yapılmıştır. Her biri x veya y yönünde şeritlere sahip dört RPC düzlemi vardır. Böylece iz rekonstrüksiyonu mümkündür. Bu dedektörlerin zaman çözünürlüğü 2 ns'den daha iyidir. Gaz karışımı, RPC flama modu için %50,5/41,3/7,2/7,0,0 yüzdelinde Ar/C₂H₂F₄/i-C₄H₁₀/SF₆'dır. RPC'leri doymuş çığ modunda çalıştırmak için C₂H₂F₄/i-C₄H₁₀/SF₆'nın başka bir başka gaz karışımı 89,5/10/0,5 yüzdelerde kullanılır. İki karışım, hıza bağlı olarak kullanılır, amaçları uzun p-p çarpışma çalışmalarında yaşlanma etkilerinin en aza indirilmesidir (Garcia, 2014).

2.5. RPC'nin Verimini Etkileyen Parametreler

Yüksek enerji fiziği detektörlerinde parametrelere göre zaman ve konum çözünürlükleri, hız, verimlilik, parçacık tanımlama yeteneği değişiklik gösterebilir. Detektörde kullanılan gaz karışımı, elektrot materyalinin özellikleri detektörün verimini etkileyen en önemli faktörlerdendir.

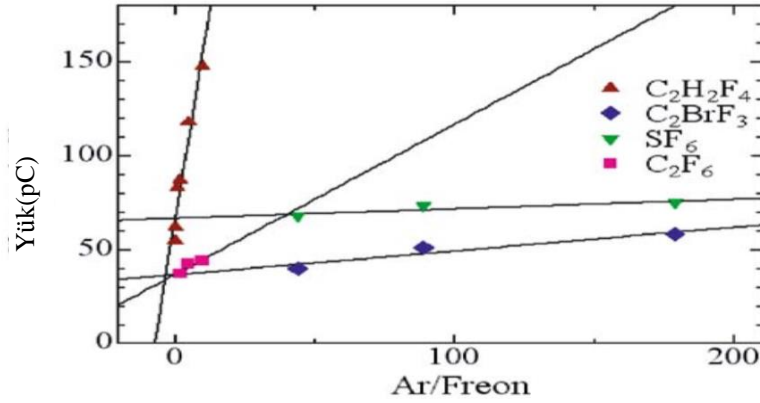
Parçacıklar ve radyasyon ancak maddeyle etkileşim yoluyla tespit edilebilir. Yüklü parçacıklar, nötr parçacıklar ve fotonlardan daha farklı etkileşimler yaparken, fotonlar fotoelektrik etki, Compton saçılması ve elektron çifti üretimi yapar. Bu foton etkileşiminde üretilen elektronlar detektör hacminde iyonlaşmalar yoluyla gözlemlenebilir. Her etkileşim süreci farklı bir detektör tasarımıyla tespit edilebilir (Grupe ve Shwartz, 2008).

2.5.1. RPC'de Kullanılan Gaz Karışımı

Detektörde saf gaz yerine gaz karışımı tercih edilir. Çünkü düşük çalışma voltajında, yüksek kazançlar ve yüksek hız kapasitesi ancak bu şekilde karşılanır. Düşük çalışma voltajı için genellikle soygazlar tercih edilir. Bunun nedeni, çığ oluşumu için daha düşük elektrik alan yoğunluklarına ihtiyaç duymalarıdır. İyonizasyonun yüksek olması ve maliyetinin düşük olması sebebiyle argon tercih edilir. Argonun uyarılma enerjisi (11,6 eV) yüksektir. Bu yüzden çığda oluşan uyarılmış argon atomları katodu iyonize edebilir ve daha fazla çığa neden olan yüksek enerjili fotonların oluşmasına sebep olur. Bu olay, sürekli bir deşarj oluşturabileceğinden elde edilen kazançlar 10^3 - 10^4

mertesinde kalır. Bu sorunu çözmek için metan veya alkol gibi çok atomlu bir gaz kullanılır. CO₂, BF₃ gibi birkaç inorganik gaz da kullanılabilir. Bu gazlar yayılan fotonları emer ve daha sonra bu enerjiyi ayrışmalar veya elastik çarpışmalar yoluyla dağıtarak söndürücü görevi görür. Az miktarda kullanılsa bile 10⁶'ya varan kazançlar sağlar. Geleneksel orantısal sayaçlarda yaygın olarak kullanılan karışım, %90 (Ar) argon, %10 (CH₄) metandır. Bu karışım p10 olarak adlandırılır. Yine fazlaca kullanılan bir diğer gaz izobütandır. Freon (CF₃Br) veya etil bromür (C₂H₅Br) gibi elektronegatif gazlar karışıma eklenerek de kazancın artırılması mümkündür. Bu gazlar hem fotonları emer hem de katottan koparılan elektronları anoda varmadan önce yakalayarak çığ oluşmasını sağlar (Leo, 1948).

Söndürme gazının etkisi üzerine bir çalışmada, CCD kamera sistemi ile flama boyutunu ve parlaklığını ve aynı zamanda osiloskop tarafından darbe dalga formundan gelen yük ölçülmüş ve yükün doğrusal olarak Ar'ın söndürme gazına oranına bağlı olduğu görülmüştür. Dört çeşit söndürme gazı kullanılmış, söndürme gazları arasındaki eğim farkı, eğimin her söndürme gazı için elektron verimliliğinin bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir (Şekil 2.15) (Kumagaia, 2004).



Şekil 2.15. Söndürme gazları için elektron verimliliği (Kumagai, 2004)

Organik yapılu gazların kullanılması veya elektron çarpımı sırasında meydana gelen kimya süreçlerinin hidrojenflorür (HF) gibi agresif kimyasallar olması, hazne ve gaz sistemi bileşenlerine zarar verebilir. Ya da sistemi oluşturan polimerizasyon

malzemeleri üzerinde istenmeyen yabancı birikimlerin oluşmasına yol açabilir (Abbrescia ve diğerleri, 2018). Bu sorun basit bir temizleme işlemi yapılarak çözülebilir.

Başka bir çözüm ise inorganik bileşiklerin kullanılmasıdır fakat daha az verim alınır. Bunun için de karışıma çok az miktarda metilal ($C_3H_8O_2$) veya propilik alkol (C_3H_8O) gibi polimerize edici olmayan maddeler eklenebilir (Leo, 1948).

Gaz karışımının uygun bir şekilde seçilmesiyle birlikte gaz boşluğunun kalınlığı da verim için etkin bir faktördür. Gaz aralığının azaltılmasıyla aynı verim daha düşük voltajlarda alınabilir, aynı zamanda detektör hacmi küçülür. Zaman çözünürlüğü artar. Belli bir verimlilik için gazda üretilen sinyal başına toplam yük azalır (Aielli ve ark., 2020).

Son olarak ve belki de en önemlisi insan sağlığı için tehlikeli olmamalıdır. Gaz karışımları çevre dostu olmalıdır. Örneğin, Kyoto Protokolü'nü takiben Avrupa Topluluğu ve diğer ülkelerin düzenlemeleri sonucu öngörüldüğü gibi, sırasıyla ozon tabakasına veya sera etkisine verilen zararı azaltmak için, atmosfere atıldığında ihmal edilebilir bir ozon tükenme gücü (ODP) ve düşük küresel ısınma potansiyeli (GWP) ile ölçeklendirilmiştir. (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

2.5.2. RPC'de Kullanılan Elektrotların Seçimi

RPC'nin çalışma prensibi, öz direnci yüksek elektrotlar ve bunların arasındaki gaz boşluğundaki yük çoğalmasına dayanır. Bu da onu diğer gazlı detektörlere göre farklı kılar. Radyasyon ya da parçacık detektöre geldiğinde detektörün malzemesiyle yani kullanılan gaz karışımı ve elektrotlarla etkileşir.

Elektrotlar yüksek öz dirence sahip olduklarında daha çok sinyal toplanabilir. Çünkü sürüklenen iyonlar ve elektronlar tarafından üretilen sinyaller, metal elektrot kullanıldığında gibi perdelenmez. Dirençli tabaka sayesinde indüklenen sinyaller kaybolmadan okunabilir. Bu okuma elektrotlar üzerine tutturulan iletken okuma şeritleri

sayesinde yapılır. Aynı zamanda sinyali toplamakla birlikte sinyalin olduğu bölgenin konumu da belirlenmiş olur (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

Yüksek özdirençli elektrot sayesinde detektör yüksek voltajlarda bile flama moduna geçmeden kendi kendine sönebilir ve böylece çığ çalışma moduna imkân tanır. Bir parçacığın geçişinin ardından gelen deşarjdan dolayı yüksek voltajın devre dışı bırakılmasına gerek kalmaz.

Seksenli yılların sonlarında geliştirilen ilk RPC'den itibaren, birkaç yüksek dirençli elektrot malzemesi geliştirildi ve test edilmiştir. Silika cam (şamandıra cam olarak da bilinir), bakalit, yarı iletken katkılı cam ve seramik bu malzemelerden bazılarıdır (Garcia 2014). Ayrıca genelde teflon olarak bilinen karbon yüklü politetrafluo-roetilen (PTFE) malzemeye sahip bir prototip RPC de tasarlandı (Chakraborty, 2018). Başka bir çalışmada, bir plastik türü olan PLA, ekstrüzyon sıcaklığı 200 C'de nispeten düşük, çevre dostu ve mekanik anlamda ihtiyacı karşılayabilir olması sayesinde, grafin ile katkılanarak 3D yazıcı kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir (Colafranceschi, 2022).

Bakalit, sentetik reçineyle emprenye edilmiş, çok katmanlı bir kâğıt yapısıdır. Isı ve basınç uygulandığında polimerizasyon bu yapıyı sert bir fenolik tabakaya dönüştürür. Seramikler çoğunlukla kristalimsi bir moleküler yapı ile karakterize edilirler ancak camsı ve kristal fazların bir kombinasyonunu da içerebilirler (Abbrescia ve diğerleri, 2018).

İlk RPC prototipinde Fe katkılı olarak kullanılan cam, moleküler yapısı genel olarak düzensiz, ancak güçlü bir mekanik sağlamlık sağlamak için yeterli kohezyona sahip bir maddedir. Bu durumda birçok farklı kimyasal bileşime sahip cam malzemeler yapılabilir. Camın kimyasal bileşimi onun fiziksel ve kimyasal özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Başka bir deyişle, benzersiz bir şekilde cam olan tek bir madde yoktur. Camın bu özelliği avantaja çevrilerek istenilen standartlarda katkılı cam elde etmek mümkündür. Nicole Johnson ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptığı çalışmada geliştirdiği vanadyum(V₂O₅) katkılı camlar buna örnek verilebilir. Yine K.

Raveendrababu ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı çalışmada Asahi ve Saint-Gobain camlarını üreterek RPC inşa edilmiştir.

RPC’de kullanılan elektrot malzemelerinin yüksek özdirençli olmasının yanında, fazla yüklerin lokalizasyonunu önlemek için ve detektörün sabit çalışması için iç yüzeyinin pürüzsüz olması gerekir (Meghna ve ark., 2012). Yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, özellikle yüzey morfolojik yapısındaki keskin pim benzeri kenar, RPC içindeki elektrik alanı yaklaşık %5–12 oranında değiştirebilir. Pürüzlü yüzey, yüksek karanlık akım ve yüksek sayma oranları kaynağı olan alan emisyonuna karşı çok hassastır. Bu nedenle bakalit elektrotların pürüzlü iç yüzeyleri 2-propanol (veya benzeri kimyasal çözelti) ile kaplanır (Chakraborty, 2018). Camın ya da seramiğin yüzey pürüzlülüğü ise bakalite göre çok daha azdır. Bu yüzden ayrı bir işlem gerektirmez. Yalnız elektrot malzemesinin temiz olması önemlidir. Parmak izi ya da toz bırakılmamalıdır.

Başka bir parametre olarak elektrotların kalınlığı sayılabilir. Elektrot kalınlığı, 1m^2 ‘den geniş yüzeylerde elektrotun mekanik stabilitesini ve yüzey düzgünlüğünü korumak için en aza düşürülmesi gerekir. Daha ince bir elektrot, gaz aralığından toplama şeritlerine daha hızlı sinyal aktarır. Ayrıca genel yapıyı hafifleterek mekanik düzeni basitleştirir (Aielli ve ark., 2020).

2.5.3. Verimi Etkileyen Diğer Değişkenler

Ortam sıcaklığı ve nem gibi çalışma koşulları da RPC dedektörlerinin performansını etkiler, bu nedenle performansı optimize etmek için RPC'yi çalıştırmak için uygun çevre koşullarını bulmak çok önemlidir (Kumar, 2014).

Tek aralıklı bir RPC’de iki elektrot ve bir gaz boşluğu dışında, geometrik yapının oluşturulmasında ve esnemeyi önlemek için kullanılan, yan taraflar ve ara düğme parçaları gibi başka dielektrik katmanlar, geometrik düzensizlikler oluşturabilir. Bu tür geometrilerdeki elektrik alanı, diğerlerinin yanı sıra neBEM, COMSOL gibi sayısal çözümler kullanılarak elde edilebilir (Dey ve ark., 2021).

Yüksek öz dirençli elektrotlardan alınan indüklenmiş yükün okuma şeritlerine aktarılması, elektrot üzerine çeşitli yöntemlerle uygulanan yarı iletken bir kaplama sayesinde olur.

Cam yüzeylerini kaplamak için kimyasal buhar kaplama (CVD), fiziksel buhar kaplama (PVD), termal buharlaşma, reaktif termal buharlaşma, sol-jel, sprej piroliz, reaktif dc magnetron sıçratma yöntemleri kullanılır (Akkaya Arıer, 2007). Ayrıca yine cam yüzey üzerine RF, grafit veya sentetik kaplama gibi belirli sayıda malzemeden, belirli sırada ve kalınlıkta homojen katmanlar oluşturulması sonucu kaplamalı cam elde edilir. Bu katmanlar ince olduğu için söz konusu iletkenlik bir yüzey iletkenliğidir. Katmanları oluşturmada kullanılan malzemeye ve bunların katman kalınlıklarına bağlı olarak istenilen değerler verilebilir.

Yapılan kaplamanın yüzey direnci RPC'nin verimlilik, okuma hızı, sinyal şekli, konum çözünürlüğü ve indüklenen yükün uzay dağılımı gibi temel parametreleri üzerinde dikkate değer bir etki göstermiştir. RPC'nin çalışma gerilimleri yüzey direnci azaldıkça artar (Thoker ve ark.). Bu tür yüksek dirençli elektrotlar yüzey direncini 0,1-1M Ω aralığına getiren kaplamanın yardımıyla sinyal toplama panelinde yükü indüklemek için iletken hale getirilir. Yüzey kaplamasının aynı zamanda homojen olması alınan sinyalin kalitesini etkiler. Yüzey direnci belirli aralıklarla ölçülür. Değişim, %10'dan küçük ise kabul edilmiştir. Bu aralıkta değilse yüzey temizlenip kaplama işlemi tekrarlanmıştır (Manisha ,2016).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, yapılacak olan RPC’de kullanılmak üzere elektrot materyali üzerine inceleme yapılmıştır. Elektrot olarak $7 \times 7 \text{cm}^2$ ebatlarında 2mm ve 3mm kalınlıklı olmak üzere iki farklı kalınlıkta düz camlar kullanılmıştır.

Düz cam elektrotun bileşimi ve yüzde oranları EDXRF ile belirlendi. Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektroskopisi, malzemelerin niteliksel ve niceliksel elementel analizi için kullanılan güçlü, tahribatsız bir tekniktir. Tipik olarak EDXRF, periyodik tablonun $_{11}\text{Na}$ ’dan $_{92}\text{U}$ ’ya kadar tüm elemanları kapsar. Konsantrasyonlarını ise, tespit aralığı %100’den ppm’ye ve hatta belirli koşullar altında ppm’nin altındaki seviyelere kadar değişir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi EDXRF sistemi, $_{47}\text{Ag}$ anotlu X-ışını tüpü ve silikon sürüklenme detektörü, dijital sinyal işlemcisi ve çok kanallı analizörden oluşur (Tsompopoulou, Mergia, 2019).



Şekil 3.1. Bir EDXRF sistemi (Tsompopoulou, Mergia, 2019)

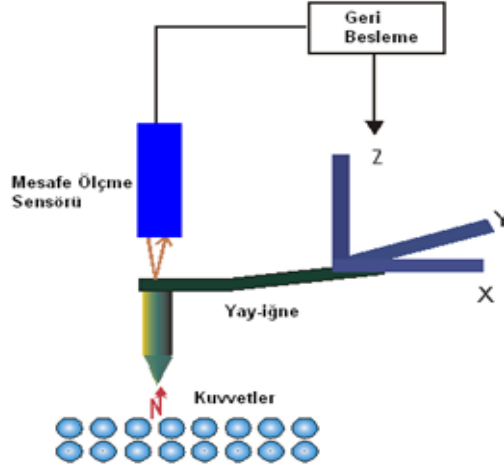
Düz camın majör bileşen tayini aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan düz camın EDXRF spektrometresi ile analiz sonuçları

Çalışılan Parametreler	Birim (m/m)	Sonuç ortalama±ss
Sodyum (Na)	%	10,7 ± 0,2
Magnezyum (Mg)	%	<1
Alüminyum (Al)	%	0,671 ± 0,017
Silisyum (Si)	%	34,2 ± 1,2
Fosfor (P)	%	<1
Potasyum (K)	%	<1
Kalsiyum (Ca)	%	7,75 ± 0,26
Titanyum (Ti)	%	<1
Krom (Cr)	%	<1
Mangan (Mn)	%	<1
Demir (Fe)	%	<1

Oksitler	Birim (m/m)	Sonuç ortalama±ss
Na ₂ O	%	14,4 ± 0,2
MgO	%	<1
Al ₂ O ₃	%	1,27 ± 0,03
SiO ₂	%	73,1 ± 2,6
P ₂ O ₅	%	<1
K ₂ O	%	<1
CaO	%	10,8 ± 0,4
TiO ₂	%	<1
Cr ₂ O ₃	%	<1
MnO	%	<1
Fe ₂ O ₃	%	<1

Kullanılan camın yüzey pürüzlülüğü AKM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile tespit edildi. Atomik Kuvvet Mikroskobu, TTM (Taramalı Tünelleme Mikroskobu)'nun iletken yüzeylerde atomları görüntülemeyi yaptığı hassasiyette, yalıtkan yüzeylerde görüntüleme yapan bir araçtır. 1986 yılında Binnig, Quate ve Gerber tarafından AKM geliştirildi. AKM'de incelenecek yüzeye değen piezoelektrik malzeme sayesinde iğne-yay sistemi tarama yapar. Voltaj piezoelektrik malzemeye uygulanır. Tarama iğnesi ile örnek arasındaki atomlar arası etkileşme kuvvetinden dolayı iğne-yay sisteminde sapmalar meydana gelir. Bu sapmalar elektriksel veya optik yöntemlerle belirlenerek geri besleme mekanizmasına gönderilir ve görüntü elde edilirken referans olarak kullanılır (Şahin, 2009).

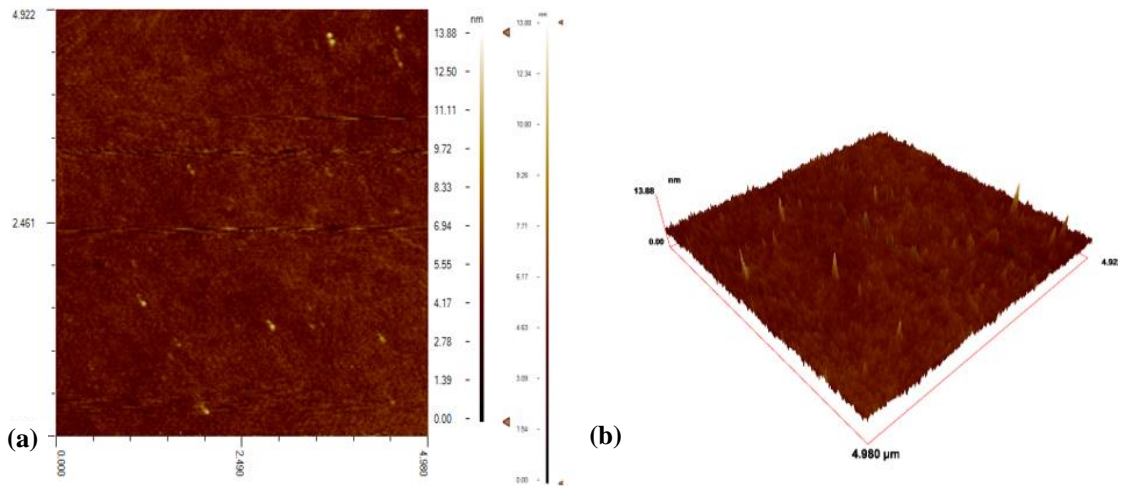


Şekil 3.2. AKM şeması (Şahin, 2009)

Şekilde görülen iğne-yay sistemi mikroskoptaki en önemli elemandır. Burada kuvvet sensörü olarak görev alır ve ölçtüğü kuvvetler sayesinde yüzeyin fiziksel özellikleri ve topografisi belirlenir (Şahin, 2009).

Kullanılan düz camın 2D ve 3D AKM görüntüleri Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b'de verilmiştir:

Ortalama yüzey pürüzlülüğü: 0,5752372 nm



Şekil 3.3. Elektrot olarak kullanılan düz camın iki boyutlu(a), üç boyutlu(b) AKM görüntüsü

Elektrotları kaplama malzemesi olarak grafit tozu, bakır mikron tozu ($3\mu\text{m}$), bor karbür ($25\mu\text{m}$) seçildi. Bu malzemeleri ölçmek için dijital hassas terazi kullanıldı. Çok yoğun olan serigrafi boyasını inceltmek için serigrafi tineri kullanıldı. Karışımın homojen bir şekilde karışması için, manyetik karıştırıcı kullanıldı. Camların boya öncesi yüzey temizliği izopropil alkol ile yapıldı.

Çizelge 3.2. Kaplamada kullanılan malzemelerin boyutu ve elektriksel iletkenlikleri

Malzemeler	Boyutu	Elektriksel iletkenliği
Bor karbür	$<60\ \mu\text{m}$	$10^{-2}-10^{-1}\ (\Omega.\text{cm})^{-1}$
Grafit tozu	$<44\ \mu\text{m}$	$10^2-10^3\ (\Omega.\text{cm})^{-1}$
Bakır mikron tozu	$0-75\ \mu\text{m}$	$\sim 5,96 \times 10^5\ (\Omega.\text{cm})^{-1}$

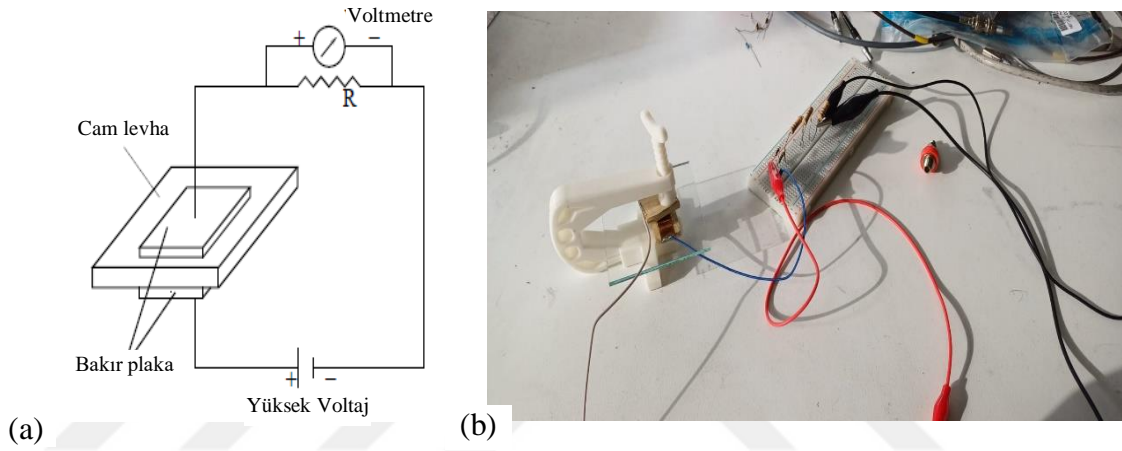
Serigrafi tekniğini el ile uygulamak için, Şekil 3.4'te görseli verilen serigrafi kasnağı ve raglesi kullanıldı. Serigrafi kasnağı ahşap çerçeveye gerilmiş, farklı dokuma sıklıklarına sahip ipek kumaştan oluşur. Bu çalışmada 77-T numaralı tekstil ithal ipek malzeme kullanıldı. Dokumalar arası boşluk $55-60\mu\text{m}$ aralığındadır. Çekecek 20 cm alüminyum ve 8 mm kalınlıklı ragle lastiğinden oluşmaktadır.



Şekil 3.4. Serigrafi kasnağı ve raglesi

3.2. Yöntem

7x7cm² alana sahip 2mm ve 3mm kalınlıklı düz cam örnekleri herhangi bir kaplama işlemine tabi tutulmadan hacimsel direnci ölçüldü. Daha sonra kaplamalı camlar aynı metotla ölçüldü. Her ölçümden önce cam yüzeyler izopropil alkol ile temizlendi. Hacimsel direnç ölçümü için Şekil 3.5(a) ve Şekil 3.5(b)'de verilen şematik gösterim ve buna göre yapılan düzenek kullanıldı.



Şekil 3.5.a) Hacimsel direnç ölçüm şeması (Meghna ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır) **b)** Hacimsel direnç ölçüm düzeneği

Burada cam elektrodun iki tarafına yerleştirilen, 1x1cm² alana sahip ahşap parçalar üzerine yine aynı alana sahip bakır bant yapıştırılarak üretilen problemler sayesinde okuma yapıldı. Kablolardan biri CAEN1482 yüksek voltajlı güç kaynağına bağlandı. 18MΩ veya 30MΩ'luk dirençler seri olarak bağlandı. R boyunca voltaj düşüşü (ΔV), uygulanan voltajın fonksiyonu olarak multimetre yardımıyla ölçüldü. Cam numunesinin hacimsel direnci (R_v), aşağıdaki ilişkiden elde edildi:

$$R_v = \frac{(HV - \Delta V)R}{\Delta V} \quad (3.1)$$

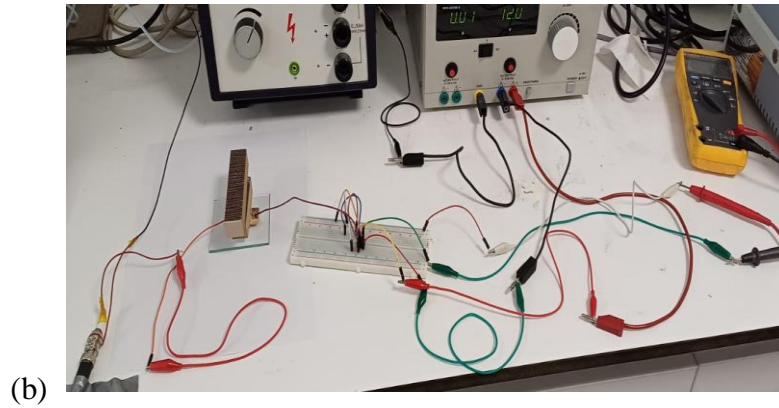
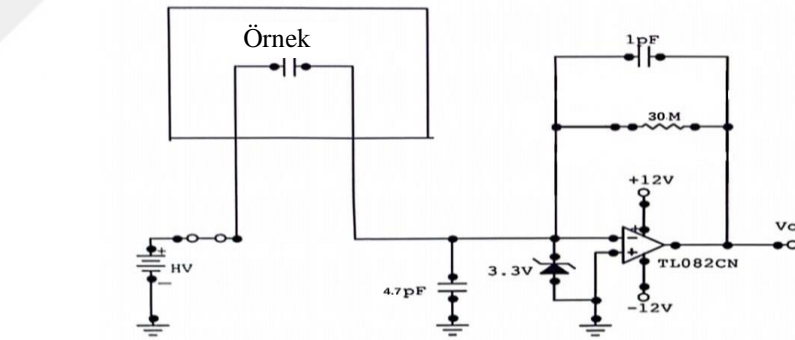
Burada, HV , yüksek voltaj kaynağından sağlanan voltajdır. Cam malzemenin hacimsel direnci, numuneye uygulanan yüksek voltaj değiştirilerek sistematik olarak ölçülmüştür.

Hacimsel özdirenç değerleri ise,

$$\rho_v = \frac{R_v A}{\ell} \quad (3.2)$$

Denklemini kullanılarak hesaplanmıştır. Burada, ρ_v , hacimsel özdirenç; A, okuma probleminin alanı ve ℓ , cam numunelerin kalınlığı olarak alınmıştır.

2mm ve 3mm kalınlıklı düz camların ve 2mm kalınlıklı kaplamalı camların yüzey direnç ölçümü, Şekil 3.6a'da verilen şemaya göre Şekil 3.6b'deki görselde olduğu gibi hazırlandı. Burada cam üzerine yerleştirilen zig sistemi, problemleri arasında 1cm aralık bulunan ahşap parçalar üzerine, 1cm genişlikli bakır bant yapıştırılarak üretildi. Zig üzerine sabit kalması amacıyla ahşap parçalar konularak desteklendi. Konulan ahşap parçaların ağırlıklarından dolayı yüzey üzerinde oluşturduğu basınç değerlendirmeye alınmayacak kadar küçük olacak şekilde ayarlandı.



Şekil 3.6. a) Yüzeysel direnç ölçümü şematik gösterimi. **b)** Yüzeysel direnç ölçüm deney düzeneği

Sistemden alınan çıkış voltajının (V_0), uygulanan yüksek voltaja (HV)'a göre değişim verileri alınarak aşağıdaki denkleme göre yüzey direnç değerleri hesaplanmıştır:

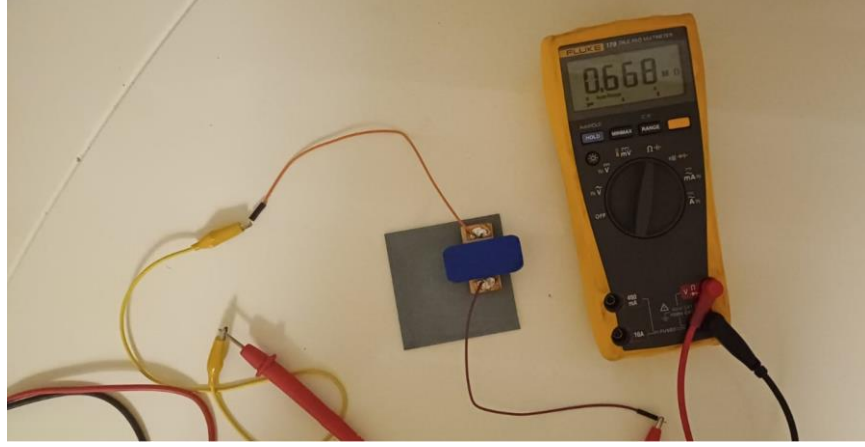
$$R_s = \frac{HV}{V_0} R_{ref} \quad (3.3)$$

Burada, referans olarak alınan direnç (R_{ref}), şekil 3.6a'da görüldüğü gibi $30M\Omega$ değerindedir.

Kaplama yapmak üzere düz cam örneklerin her birinin üzeri izopropil alkol ile temizlenerek serigrafı kasmağının altına gelecek şekilde sabitlendi. Yukarıda ismi verilen malzemeler, dijital hassas terazi ile ölçüm yapılarak serigrafı boyası ile belirli oranlarda karıştırıldı. Boya çok yoğun olduğundan serigrafı tineri ile inceltildi. Karışımın tamamen homojen olması ve çökme yaşanmaması için, voltaj ayarlı manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırma işleminin sürekliliği sağlandı.

Kasmağın kumaş kısmına boya karışımı dökülerek ragle ile tek seferde cam üzerine uygulandı. Kuruması için uygun bir yere bırakıldı. Tamamen kuruma gerçekteşmeden bazı numunelere iki kat, üç kat ve dört kat olmak üzere işlemler tekrar edildi.

Boyama işleminin itibaren yirmi dört saat beklendikten sonra, kaplamaların yüzey dirençleri şekil 3.7'de görseli verilen multimetre ve zig sistemi ile ölçüldü. Kaplama yüzeyi üzerine, belirli aralıklarla zig yerleştirilerek her bir kaplama için on ölçüm alındı. Alınan ölçümlerin ortalaması kaydedildi. Bu işlemlere ortalama yüzeysel direnç değeri sabit değere gelinceye kadar her yirmi dört saatte bir ölçüm alınarak devam edildi. Ölçümler alınırken ortamın sıcaklık ve nem değerleri not edildi.



Şekil 3.7. Yüzey direnci ölçümünde kullanılan sistem



4. BULGULAR

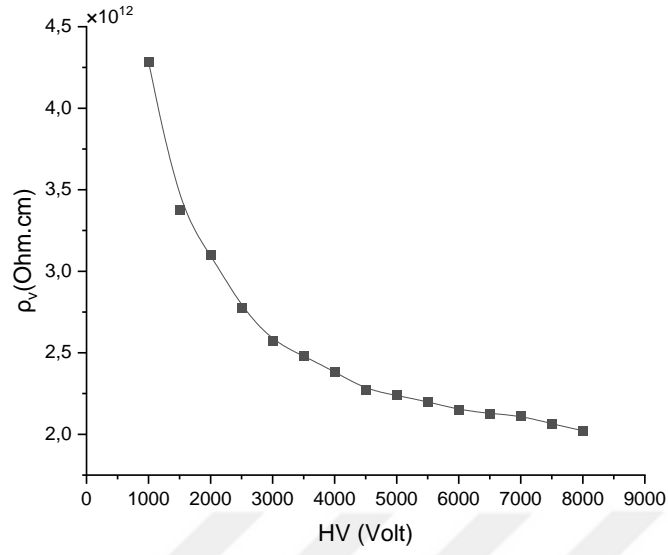
4.1. Düz Cam Bulguları

Bu bölümde $7 \times 7 \text{cm}^2$ alana sahip, 2mm ve 3mm kalınlıklı düz cam için yüzeysel direnç ve hacimsel direnç ölçümleri yapılmış, aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanılarak bulunan direnç değerleri ve uygulanan voltaja bağlı $\Omega \cdot \text{cm}$ cinsinden öz direnç değişimleri hesaplanmış, Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'deki verilerden yararlanılarak elde edilen grafikler Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

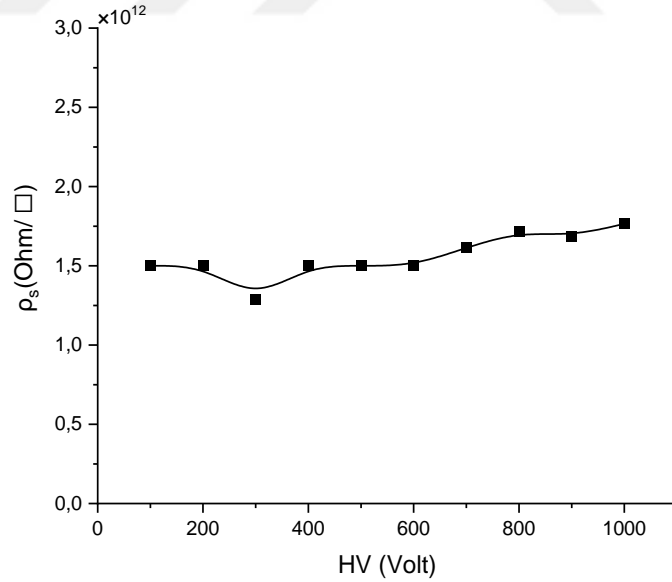
Çizelge 4.1. 2mm düz cam hacimsel öz direnç-voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^{11}$	ρ (Ohm.cm) $\times 10^{12}$
1000	0,021	8,5712	4,2856
1500	0,04	6,7498	3,3749
2000	0,058	6,2067	3,1033
2500	0,081	5,5553	2,7776
3000	0,105	5,1426	2,5713
3500	0,127	4,9604	2,4802
4000	0,151	4,768	2,384
4500	0,178	4,5503	2,2751
5000	0,201	4,4774	2,2387
5500	0,225	4,3998	2,1999
6000	0,251	4,3026	2,1513
6500	0,275	4,2543	2,1271
7000	0,298	4,228	2,1145
7500	0,327	4,1282	2,0641
8000	0,356	4,0447	2,0223



Şekil 4.1. 2mm düz cam hacimsel özdirenç-voltaj grafiği

Şekil 4.1.'de 2mm düz camın hacimsel özdirençinin düşük voltajlarda $4,35 \times 10^{12}$ Ohm.cm değerinden, yüksek voltajlara çıkıldıkça azalarak $2,25 \times 10^{12}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

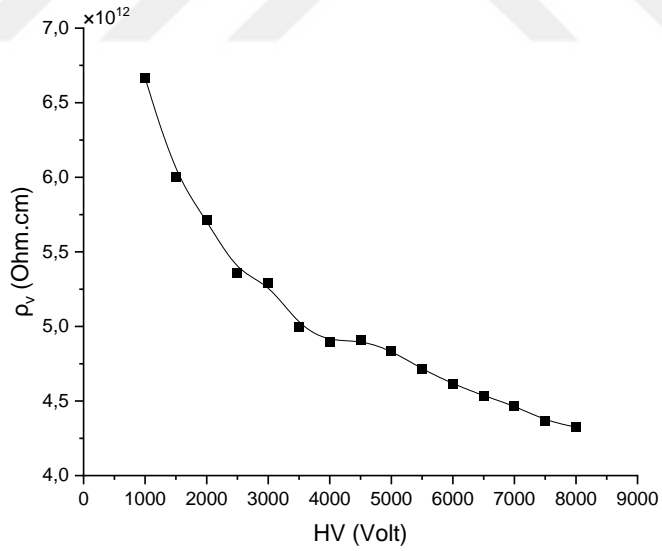


Şekil 4.2. 2mm düz cam yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.2.'de 2mm düz cam için yüzey özdirençinin voltaja bağlı değişiminin $1,5 \times 10^{12}$ Ohm/□ civarında olduğu görülmektedir.

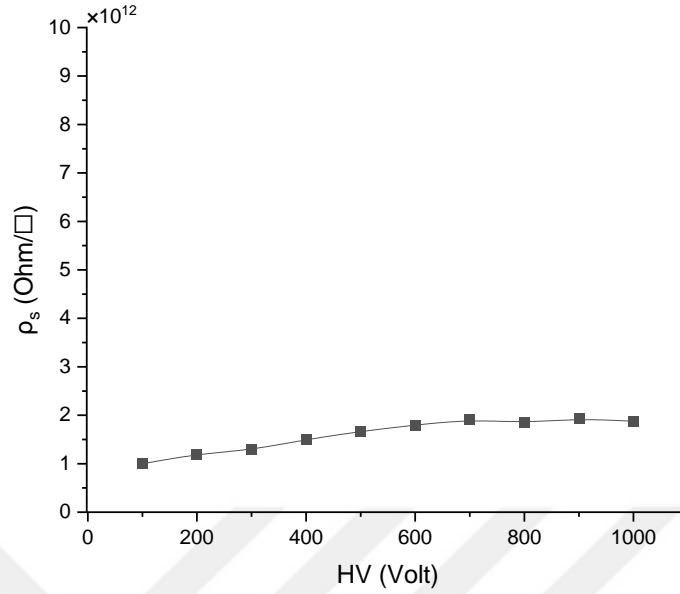
Çizelge 4.2. 3mm düz cam için hacimsel öz direnç-voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹²	ρ (Ohm.cm) x10 ¹²
1000	0,009	1,9999	6,6666
1500	0,015	1,7999	5,9999
2000	0,021	1,7142	5,7142
2500	0,028	1,6071	5,357
3000	0,034	1,5882	5,294
3500	0,042	1,4999	4,9999
4000	0,049	1,4693	4,8979
4500	0,055	1,4727	4,909
5000	0,062	1,4515	4,8386
5500	0,07	1,4142	4,7142
6000	0,078	1,3846	4,6153
6500	0,086	1,3604	4,5348
7000	0,094	1,3404	4,468
7500	0,103	1,3106	4,3688
8000	0,111	1,2972	4,3242



Şekil 4.3. 3mm düz cam için hacimsel öz direnç-voltaj grafiği

Şekil 4.3.'te 3mm düz camın voltaja bağlı hacimsel öz direncin $6,7 \times 10^{12}$ - $4,35 \times 10^{12}$ Ohm.cm değer aralığında, 2mm düz cama kıyasla daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. 3mm düz cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi 3mm düz cam için yüzey özdirenci yaklaşık $2 \times 10^{12} \text{ Ohm}/\square$ değerine ulaşmıştır. 2mm ve 3mm düz cam yüzey özdirençleri karşılaştırıldığında her iki kalınlıktaki cam için değerlerin yakın olduğu görülür.

4.2. Grafit Kaplamalı Cam Bulguları

Aşağıdaki çizelgede yapılan kaplamaların kütlece grafit oranları ve atılan kat sayıları verilmiştir. Her orandan dört örnek alınarak her bir örneğe sırasıyla bir kat, iki kat, üç kat ve dört kat boya yapıldı. Bir kat ve iki kat boya atılan örneklerden okuma yapılamadı. Bu yüzden üç kat ve dört kat boya atılan numuneler üzerinde çalışma yapıldı. Elektrotların ince olması indüklenen yükleri daha hızlı okuma elektrotlarına aktaracağı için, tüm kaplamalar 2mm kalınlıklı camlar üzerine yapıldı. Çizelge 4.3. kaplama kodlarını, grafit oranlarını ve atılan kat sayılarını göstermektedir:

Çizelge 4.3. Grafit kaplamaların kütlece grafit oranları ve atılan kat sayıları

Kaplama Kodu	Grafit oranı (%)	Kat Sayısı
G3	19,44	3 kat
G4	19,44	4 kat
GG3	22,7	3 kat
GG4	22,7	4 kat

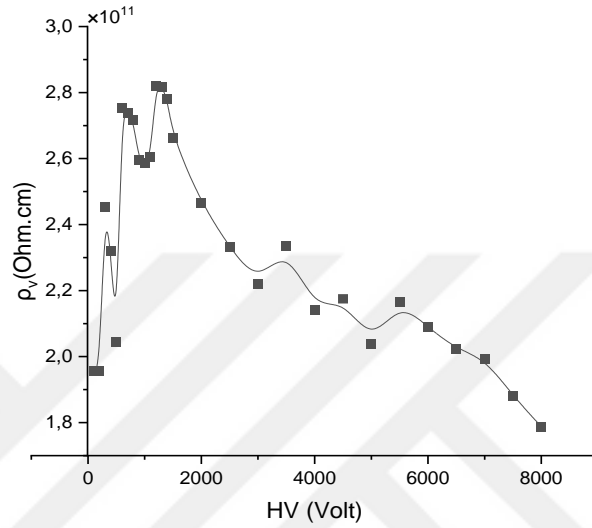
G kaplamalı cam elektrotlara ait hacimsel özdirenç-voltaj, akım-voltaj, yüzey özdirenç-voltaj, gün bazında yüzey direnç değişimi ve yüzey direnç haritaları gösterilmektedir:

Çizelge 4.4. G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹⁰	ρ (Ohm.cm)x10 ¹¹
100	0,046	3,9112	1,9556
200	0,092	3,9112	1,9556
300	0,11	4,9072	2,4536
400	0,155	4,6433	2,3216
500	0,22	4,0891	2,0445
600	0,196	5,5084	2,7542
700	0,23	5,4764	2,7382
800	0,265	5,4321	2,716
900	0,312	5,1905	2,5952
1000	0,348	5,1706	2,5853
1100	0,38	5,2087	2,6043
1200	0,383	5,6378	2,8189
1300	0,415	5,6367	2,8183
1400	0,453	5,5611	2,7805
1500	0,507	5,3236	2,6618
2000	0,73	4,9297	2,4648
2500	0,965	4,6614	2,3307
3000	1,215	4,4426	2,2213
3500	1,348	4,6717	2,3359
4000	1,68	4,2839	2,1419
4500	1,861	4,3506	2,1753
5000	2,205	4,0798	2,0399
5500	2,285	4,3308	2,1654
6000	2,584	4,1777	2,0888

Çizelge 4.4. G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri(devamı)

6500	2,89	4,0466	2,0233
7000	3,158	3,988	1,994
7500	3,587	3,7617	1,8809
8000	4,025	3,5758	1,7879

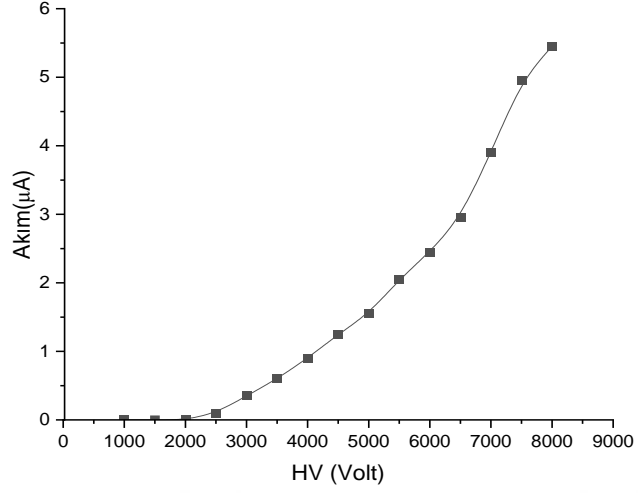


Şekil 4.5. G3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği

Şekil 4.5.'te hacimsel özdirenç yaklaşık 2000V'ta en yüksek değerde iken daha yüksek voltajlarda değerinin $1,8 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerlerine düştüğü görülmektedir.

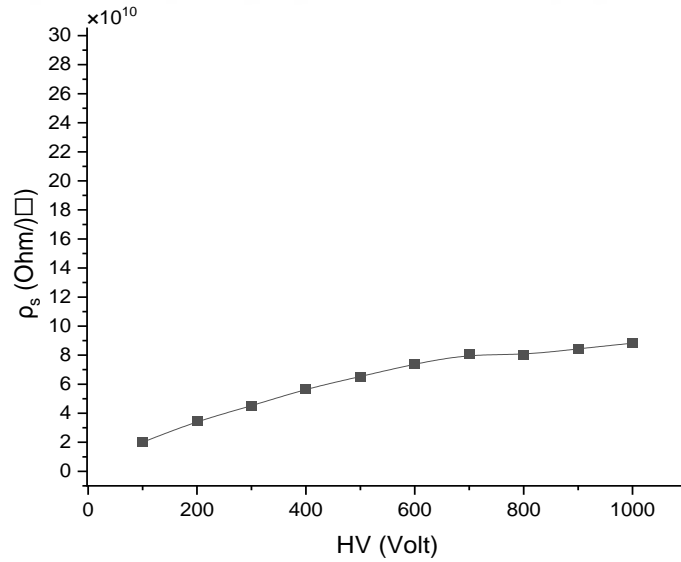
Çizelge 4.5. G3 kaplamalı cam için akım-voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μA)
1000	0
1500	0
2000	0
2500	0,1
3000	0,35
3500	0,6
4000	0,9
4500	1,25
5000	1,55
5500	2,05
6000	2,45
6500	2,95
7000	3,9
7500	4,95
8000	5,45



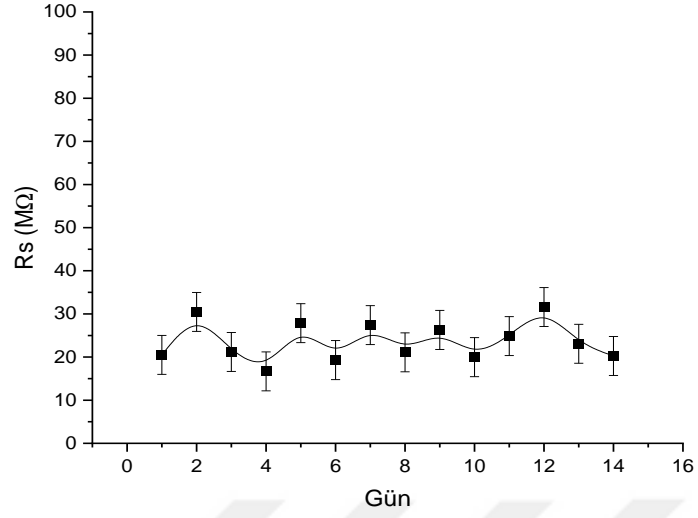
Şekil 4.6. G3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği

Şekil 4.6.'da 2000V'a kadar kaçak akımın okunamadığı görülmektedir. Bu durum aynı kaplamaya ait hacimsel özdirenç grafiğinde yaklaşık 2000V'a kadar hacimsel özdirencin artış göstermesinden kaynaklanır. Bu değerden sonra hacimsel özdirencin düşmesine bağlı olarak kaçak akımın arttığı görülmektedir.



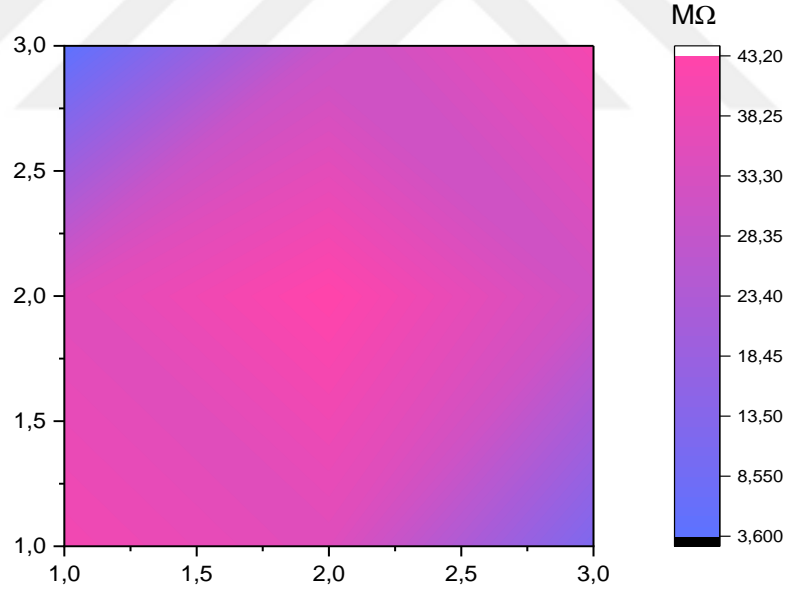
Şekil 4.7. G3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.7.'de G3 kaplamanın yüzey özdirencinin yaklaşık 8×10^{10} Ohm/□ değerinde kararlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 4.8. G3 için gün bazında yüzey direnç değışimi

Şekil 4.8.'de G3 kaplamanın gün bazında belirli bir artma ya da azalma göstermediği ~25MΩ değerlerinde olduğu görölmektedir.

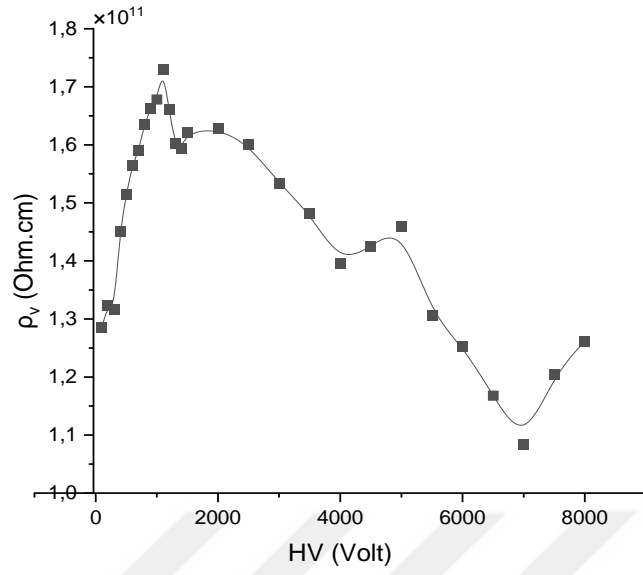


Şekil 4.9. G3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.9.'da kaplamanın köşe kısımlar haricinde homojen dağıldığı, direncin~ 25MΩ değerlerinde olduğu görölmektedir.

Çizelge 4.6. G4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10¹⁰	ρ (Ohm.cm) x10¹¹
100	0,07	2,5696	1,2848
200	0,136	2,6452	1,3226
300	0,205	2,6323	1,3161
400	0,248	2,9014	1,4507
500	0,297	3,0285	1,5142
600	0,345	3,1286	1,5643
700	0,396	3,18	1,59
800	0,44	3,2709	1,6354
900	0,487	3,3246	1,6623
1000	0,536	3,3564	1,6782
1100	0,572	3,4597	1,7298
1200	0,65	3,3212	1,6606
1300	0,73	3,2036	1,6018
1400	0,79	3,188	1,594
1500	0,832	3,2433	1,6217
2000	1,105	3,2561	1,628
2500	1,405	3,201	1,6005
3000	1,76	3,0663	1,5331
3500	2,124	2,9643	1,4821
4000	2,578	2,791	1,3955
4500	2,84	2,8503	1,4251
5000	3,08	2,9202	1,4601
5500	3,786	2,613	1,3065
6000	4,305	2,5069	1,2534
6500	5,005	2,3358	1,1679
7000	5,81	2,1668	1,0834
7500	5,6	2,4089	1,2044
8000	5,704	2,5227	1,2613

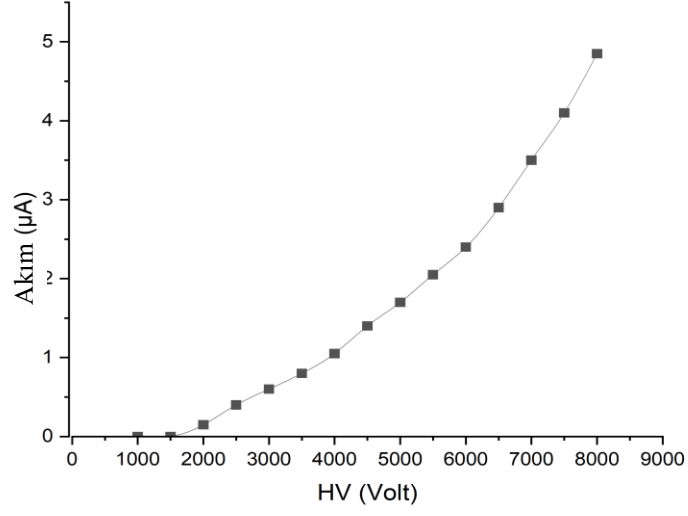


Şekil 4.10. G4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi 1100V'tan itibaren daha yüksek voltajlara çıkıldıkça $1,73 \times 10^{11}$ değerinden 10^{11} değerine düşüş eğilimi göstermektedir.

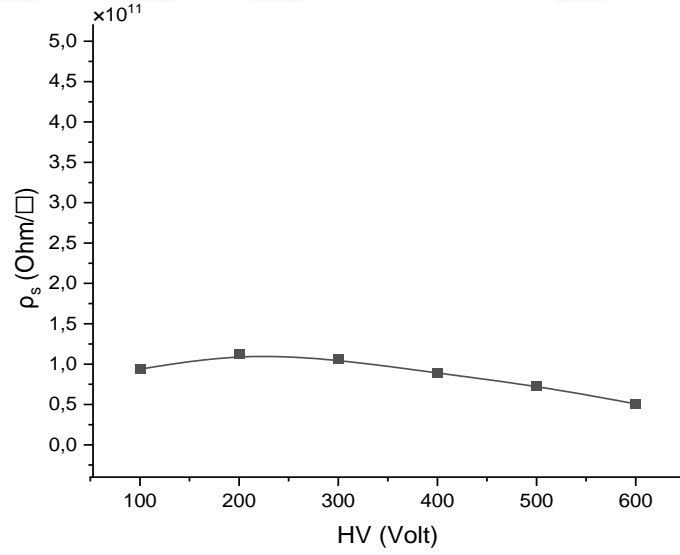
Çizelge 4.7. G4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μA)
1000	0
1500	0
2000	0,15
2500	0,4
3000	0,6
3500	0,8
4000	1,05
4500	1,4
5000	1,7
5500	2,05
6000	2,4
6500	2,9
7000	3,5
7500	4,1
8000	4,85



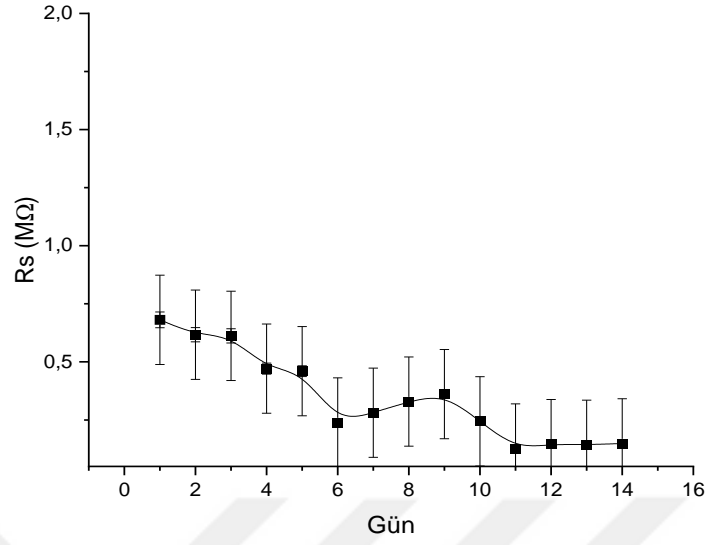
Şekil 4.11. G4 kaplamalı cam için akım- voltaj grafiği

Şekil 4.11.'de Şekil 4.10'a bağlı olarak yaklaşık 1500V'tan itibaren kaçak akım okunmuş değerinin en yüksek ~5µA değerine ulaştığı görülmektedir.



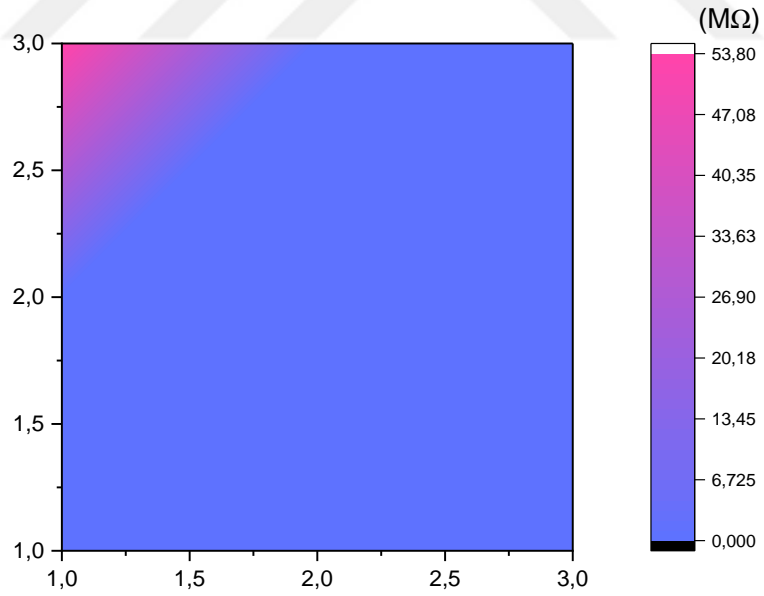
Şekil 4.12. G4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.12.'de ölçülen değer aralığında ~0,5x10¹¹ Ohm/□ değerine düştüğü görülür. Bu değişimler küçük değer aralıklarına sahiptir.



Şekil 4.13. G4 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.13.'te G4 kaplamanın altıncı günde belirli bir değere düştüğü, on birinci günden itibaren ~100kΩ gibi sabit bir değer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.14. G4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

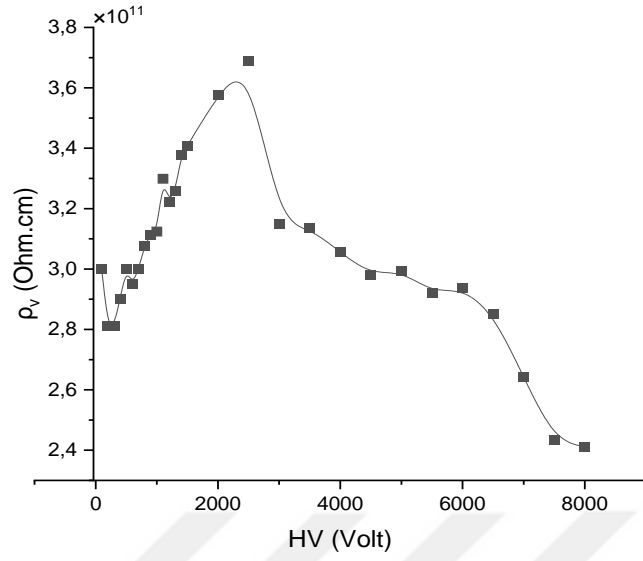
G3 ve G4 kaplamaların hacimsel öz direnç grafiklerinde ve benzer şekilde yüzey öz dirençlerinde görüldüğü gibi, her boyama katıyla beraber elektrot yüzeyinde daha

fazla grafit birikimi olduğu için, boyama kat sayısı artışına bağlı olarak hacimsel ve yüzey özdirençlerinde azalma görülmektedir. Ayrıca G4 kaplamanın yüzey direncinin G3 kaplamaya göre daha homojen dağıldığı görülmektedir.

GG3 ve GG4 kaplamalı cam elektrotlara ait hacimsel özdirenç-voltaj, akım-voltaj, yüzey özdirenci-voltaj, gün bazında yüzey direnç değişimi ve yüzey direnç haritaları gösterilmektedir:

Çizelge 4.8. GG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹⁰	ρ (Ohm.cm) x10 ¹¹
100	0,03	5,9982	2,9991
200	0,064	5,6232	2,8116
300	0,096	5,6232	2,8116
400	0,124	5,8046	2,9023
500	0,15	5,9982	2,9991
600	0,183	5,8998	2,9499
700	0,21	5,9982	2,9991
800	0,234	6,152	3,076
900	0,26	6,2289	3,1144
1000	0,288	6,2482	3,1241
1100	0,3	6,5982	3,2991
1200	0,335	6,4459	3,2229
1300	0,359	6,5163	3,2581
1400	0,373	6,7542	3,3771
1500	0,396	6,8163	3,4081
2000	0,503	7,1552	3,5776
2500	0,61	7,3752	3,6876
3000	0,857	6,2992	3,1496
3500	1,004	6,2731	3,1365
4000	1,178	6,1102	3,0551
4500	1,358	5,9628	2,9814
5000	1,502	5,9902	2,9951
5500	1,694	5,8423	2,9211
6000	1,838	5,8741	2,937
6500	2,05	5,7055	2,8527
7000	2,384	5,2834	2,6417
7500	2,773	4,8665	2,4332
8000	2,985	4,8223	2,4111

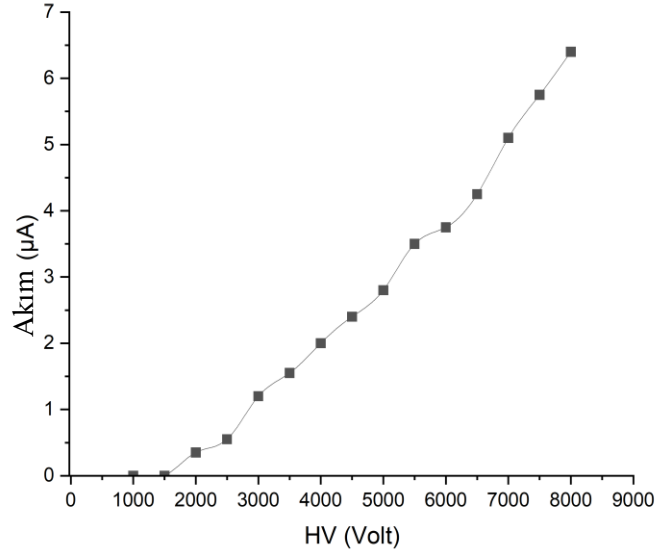


Şekil 4.15. GG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç-voltaj grafiği

Şekil 4.15.'te 2500V'ta $3,68 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerinden $2,41 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

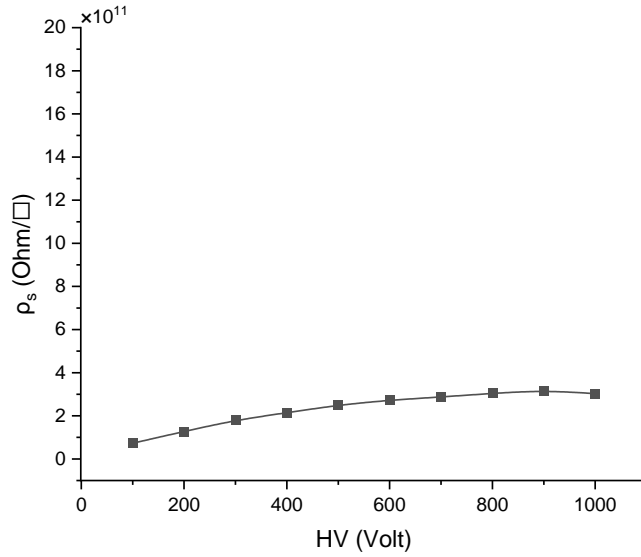
Çizelge 4.9. GG3 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0
1500	0
2000	0,35
2500	0,55
3000	1,2
3500	1,55
4000	2
4500	2,4
5000	2,8
5500	3,5
6000	3,75
6500	4,25
7000	5,1
7500	5,75
8000	6,4



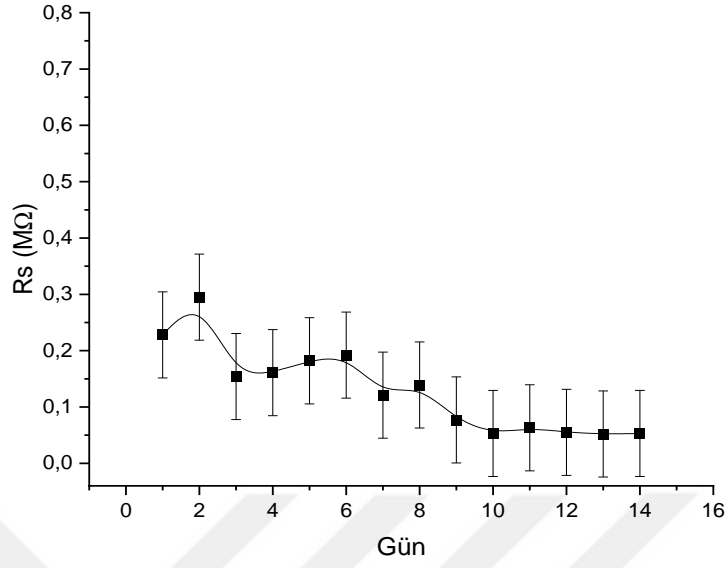
Şekil 4.16. 2mm GG3 kaplamalı cam için akım- voltaj grafiği

Şekil 4.16.'da yaklaşık 1500V'tan sonra kaçak akımın okunmaya başlandığı, maksimum 6,4 µA değerine ulaştığı görülmektedir.



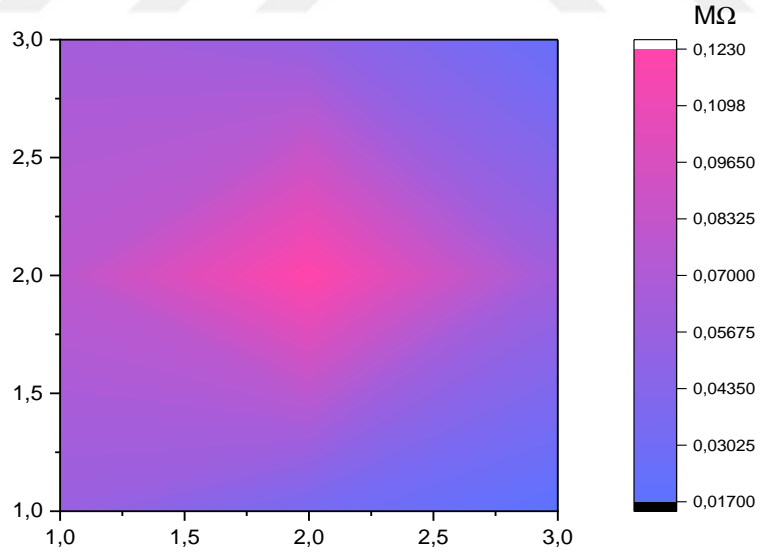
Şekil 4.17. GG3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.17.'de yüzey özdirencin yaklaşık 3×10^{11} Ohm/□ değerlerinde olduğu görülür.



Şekil 4.18. GG3 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.18.'de kaplamanın direnç değerinin onuncu güne kadar düştüğü, bugünden itibaren ~70kΩ gibi sabit bir değere ulaştığı görülmektedir.

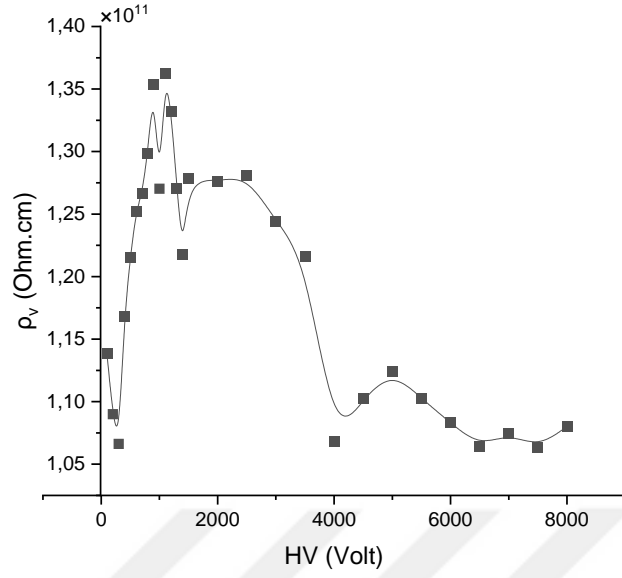


Şekil 4.19. GG3 kaplama için yüzey direnç haritası

Şekil 4.19. kaplamanın yüzey direnç değerinin orta bölümlerde daha yüksek olduğu, yüzey genelinde direncin ortalama ~70kΩ değerinde olduğu görülür.

Çizelge 4.10. GG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^{10}$	ρ (Ohm.m) $\times 10^{11}$
100	0,079	2,2766	1,1383
200	0,165	2,18	1,09
300	0,253	2,1325	1,0662
400	0,308	2,3358	1,1679
500	0,37	2,4306	1,2153
600	0,431	2,504	1,252
700	0,497	2,5334	1,2667
800	0,554	2,5974	1,2987
900	0,598	2,7072	1,3536
1000	0,708	2,5405	1,2702
1100	0,726	2,7254	1,3627
1200	0,81	2,6648	1,3324
1300	0,92	2,5416	1,2708
1400	1,034	2,4353	1,2176
1500	1,055	2,5574	1,2787
2000	1,41	2,5513	1,2757
2500	1,755	2,5623	1,2811
3000	2,169	2,4878	1,2439
3500	2,589	2,4315	1,2157
4000	3,367	2,1366	1,0683
4500	3,67	2,2052	1,1026
5000	4	2,2482	1,1241
5500	4,486	2,205	1,1025
6000	4,982	2,166	1,083
6500	5,492	2,1285	1,0642
7000	5,857	2,1494	1,0747
7500	6,343	2,1265	1,0632
8000	6,66	2,1603	1,0801

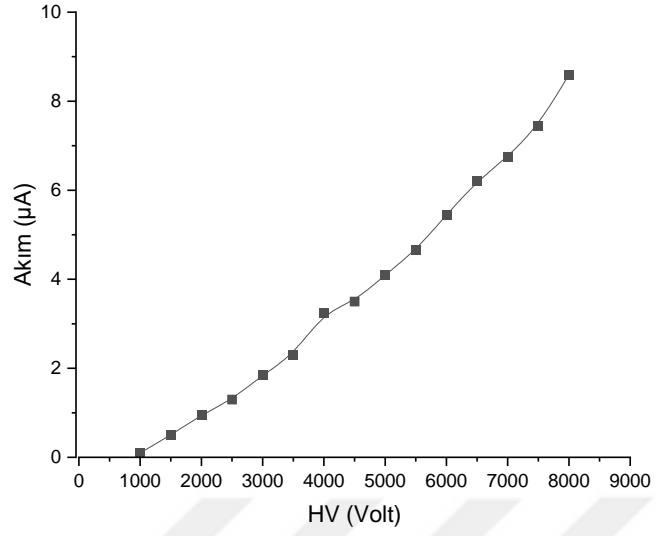


Şekil 4.20. GG4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenc – voltaj grafiği

Şekil 4.20.'de GG4 kaplamasının nispeten daha düşük voltajlarda maksimum direnc gösterdiği, 6000V'tan sonra ise $\sim 1,5 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerinde olduğu görülmektedir.

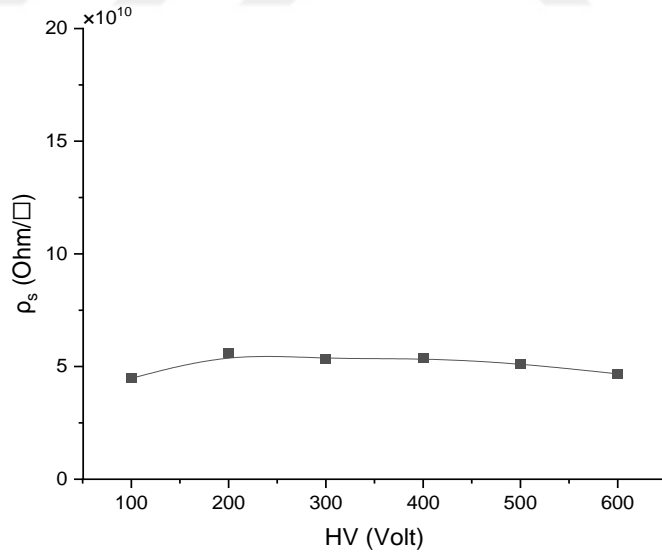
Çizelge 4.11. GG4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0,1
1500	0,5
2000	0,95
2500	1,3
3000	1,85
3500	2,3
4000	3,25
4500	3,5
5000	4,1
5500	4,65
6000	5,45
6500	6,2
7000	6,75
7500	7,45
8000	8,6



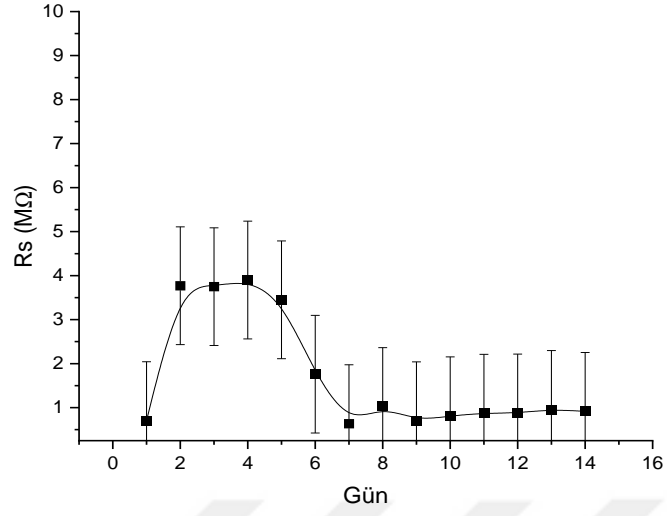
Şekil 4.21. GG4 kaplamalı cam için akım- voltaj grafiği

Şekil 4.21.'de 1000V'tan itibaren kaçak akım okunmaya başlanmış, maksimum 8,6 µA değerine ulaşmıştır.



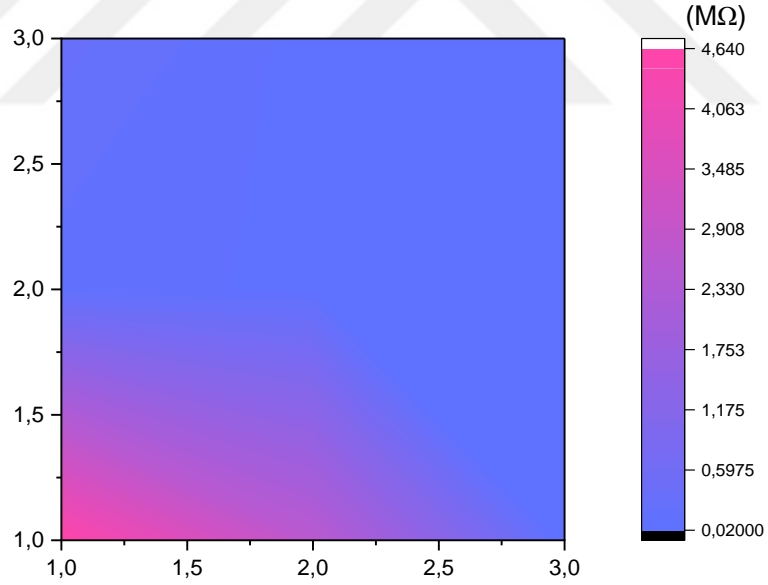
Şekil 4.22. GG4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci-voltaj grafiği

Şekil 4.22.'de kaplamanın yüzey özdirencinin $\sim 5 \times 10^{10}$ Ohm/□ değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.23. GG4 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.23.'te yüzey direncin yedinci güne kadar değişim gösterdiği, bugünden itibaren yaklaşık (0,5-1)MΩ değerinde kaldığı görülür.



Şekil 4.24. GG4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.24.'te görüldüğü gibi kaplamanın yüzeye görece homojen dağıldığı, yüzey direncinin ortalama (0,5-1)MΩ değerinde olduğu görülmektedir.

4.3. Bakır + Grafit Kaplamalı Cam Bulguları

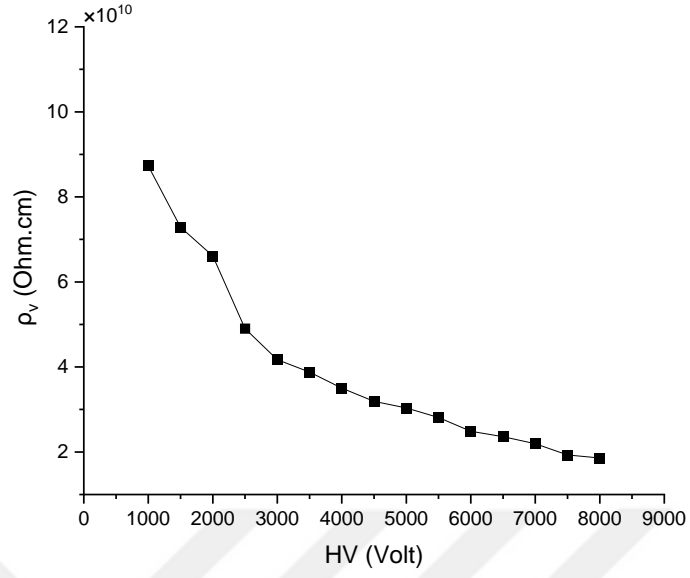
Aşağıdaki çizelgede yapılan kaplamaların kütlece bakır, grafit oranları ve boyama kat sayıları verilmiştir:

Çizelge 4.12. Bakır + grafit kaplamaların kütlece bakır, grafit oranları ve atılan kat sayıları

Kaplama Kodu	Bakır oranı (%)	Grafit oranı (%)	Kat sayısı
BG1	51,2	21,53	1 kat
BG2	51,2	21,53	2 kat
BG3	57,38	12,1	1 kat
BG(D1)2	39,53	19,76	2 kat
BG(D1)3	39,53	19,76	3 kat
BG(D1)4	39,53	19,76	4 kat
BG(D3)4	33,3	13,33	4 kat
BG(D4)2	46,13	13,69	2 kat

Çizelge 4.13. BG1 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç- voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^9$	ρ (Ohm.cm) $\times 10^{10}$
1000	1,03	17,458	8,729
1500	1,85	14,577	7,288
2000	2,72	13,217	6,609
2500	4,58	9,8073	4,904
3000	6,46	8,3411	4,171
3500	8,1	7,7597	3,88
4000	10,25	7,0063	3,503
4500	12,65	6,3851	3,193
5000	14,78	6,0713	3,036
5500	17,55	5,623	2,812
6000	21,63	4,975	2,488
6500	24,68	4,7226	2,361
7000	28,57	4,3922	2,196
7500	34,8	3,8613	1,931
8000	38,53	3,7193	1,86

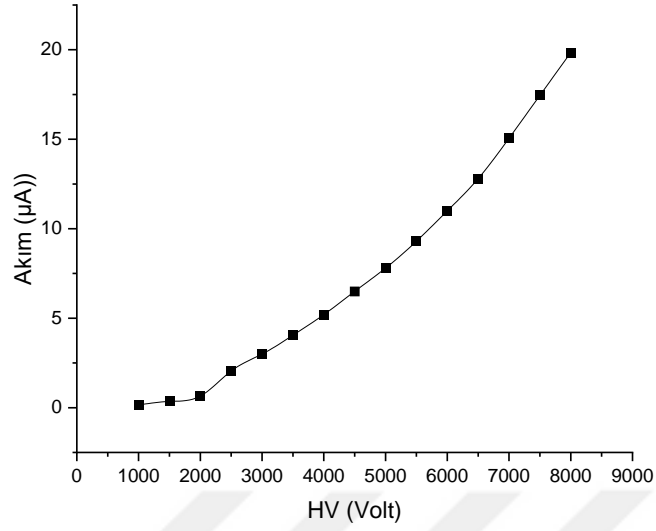


Şekil 4.25. BG1 kaplamalı cam için hacimsel özdirenc – voltaj grafiği

Şekil 4.25.’te elektrodun hacimsel özdirencinin 1000V’ta $\sim 9 \times 10^{10}$ Ohm.cm değerinden yüksek voltajlarda $\sim 2 \times 10^{10}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir. Bu kaplamada 7500V-8000V’ta sabit değere ulaşmıştır.

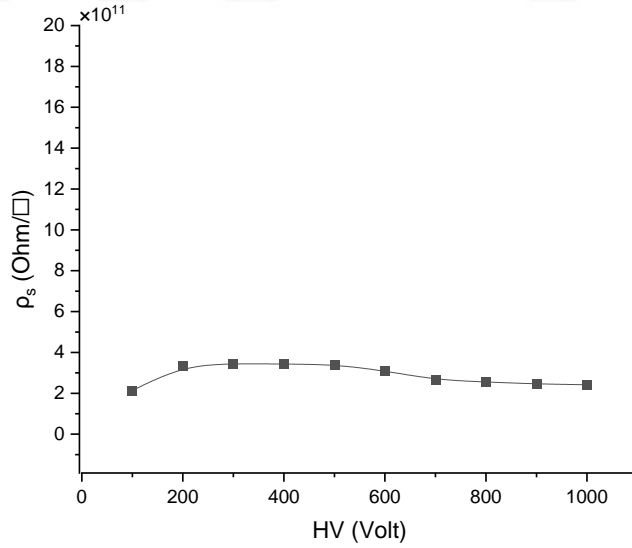
Çizelge 4.14. BG1 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0,15
1500	0,35
2000	0,65
2500	2,05
3000	3
3500	4,05
4000	5,2
4500	6,5
5000	7,8
5500	9,3
6000	11
6500	12,8
7000	15,05
7500	17,45
8000	19,85



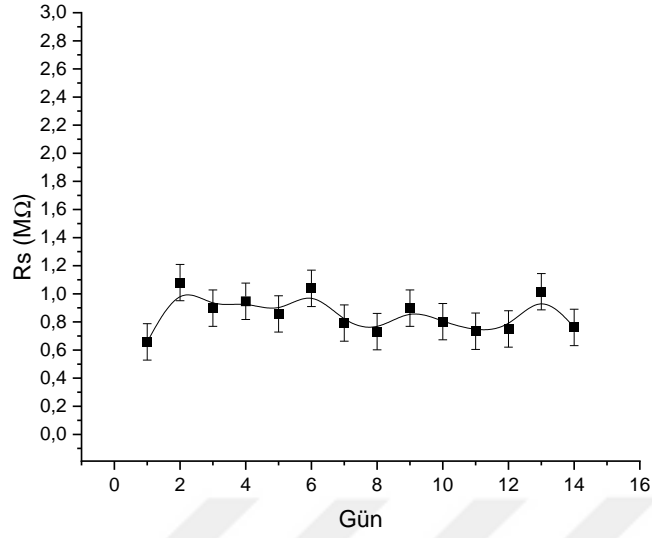
Şekil 4.26. BG1 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.26.'da BG1 kaplamanın hacimsel özdirencine bağlı olarak daha düşük voltajlarda kaçak akım okunmaya başlandığı ve değerinin diğerlerine göre daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir.



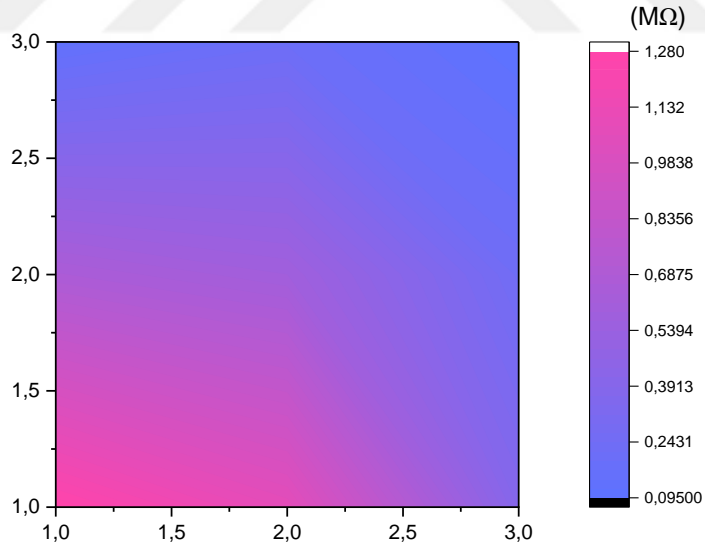
Şekil 4.27. BG1 kaplamalı cam için yüzey özdirenci – voltaj grafiği

Şekil 4.27.'de kaplamanın yüzey özdirencinin $\sim 2 \times 10^{11}$ Ohm/□ değerlerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28. BG1 kaplama için gün bazında yüzey direnç değişim grafiği

Şekil 4.28. incelendiğinde kaplamanın yüzey direncinin güne bağlı belirli bir düşüş göstermediği, $\sim 0,7M\Omega$ değerlerinde kaldığı görülür.

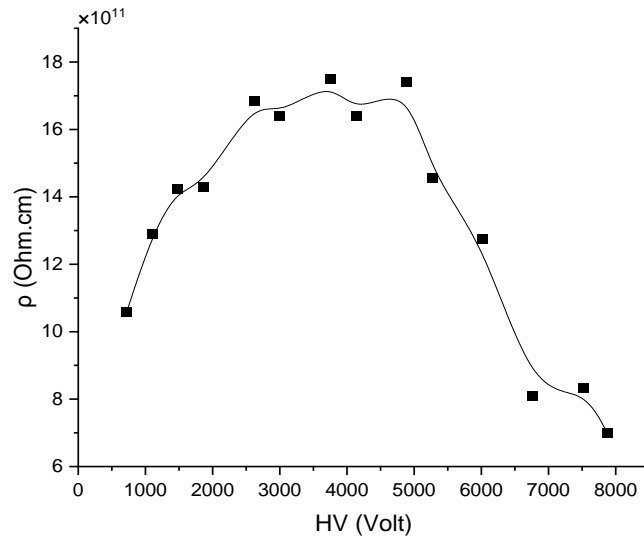


Şekil 4.29. BG1 kaplamalı cam yüzey direnç haritası

Şekil 4.29., kaplamanın sol alt köşesinin diğer bölgelerine göre daha yüksek dirence sahip olduğunu, tüm yüzey için ortalama direncin $\sim 0,7M\Omega$ değerinde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.15. BG2 kaplamalı cama ait hacimsel özdirenc – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^{11}$	ρ (Ohm.cm) $\times 10^{12}$
720	0,102	2,1173	1,0587
1100	0,128	2,5778	1,2889
1480	0,156	2,8458	1,4229
1860	0,195	2,8612	1,4306
2619	0,233	3,3718	1,6859
2997	0,274	3,281	1,6405
3754	0,322	3,4972	1,7486
4133	0,378	3,2798	1,6399
4887	0,421	3,4821	1,7411
5265	0,542	2,9139	1,457
6017	0,708	2,5492	1,2746
6768	1,253	1,6201	0,81
7518	1,352	1,6679	0,8339
7872	1,686	1,4004	0,7002

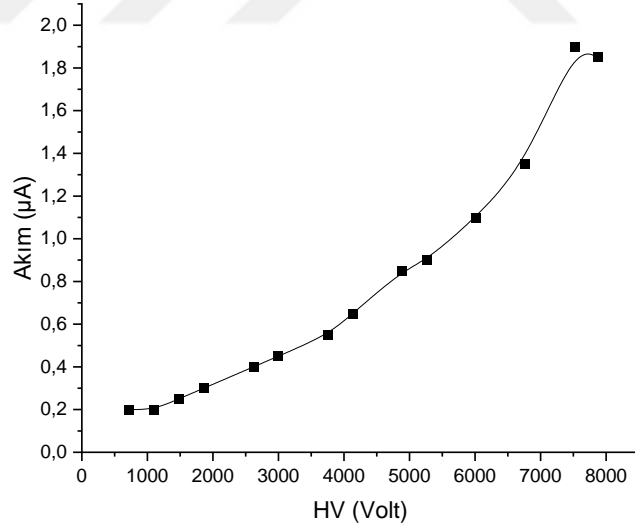


Şekil 4.30. BG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenc – voltaj grafiği

Şekil 4.30.'da hacimsel özdirencin 4000V-5000V'larda maksimum değerine ulaştığı ve $\sim 7 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

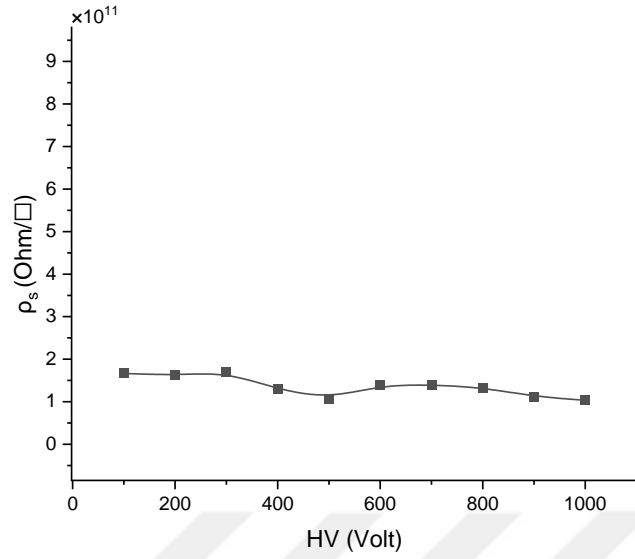
Çizelge 4.16. BG2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

HV (Volt)	Akım (μA)
720	0,2
1100	0,2
1480	0,25
1860	0,3
2619	0,4
2997	0,45
3754	0,55
4133	0,65
4887	0,85
5265	0,9
6017	1,1
6768	1,35
7518	1,9
7872	1,85



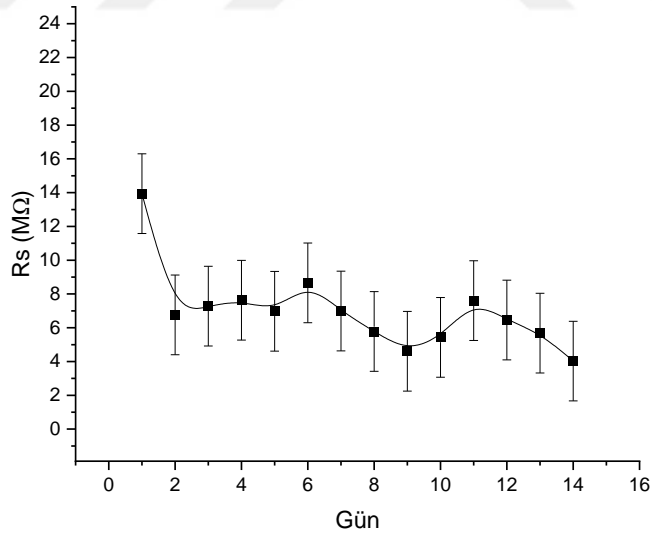
Şekil 4.31. BG2 kaplamalı cam için akım- voltaj grafiği

Şekil 4.31.'de de görüldüğü gibi hacimsel öz direncin büyüklüğüne bağlı olarak daha küçük kaçak akım değerleri ölçülmüştür.



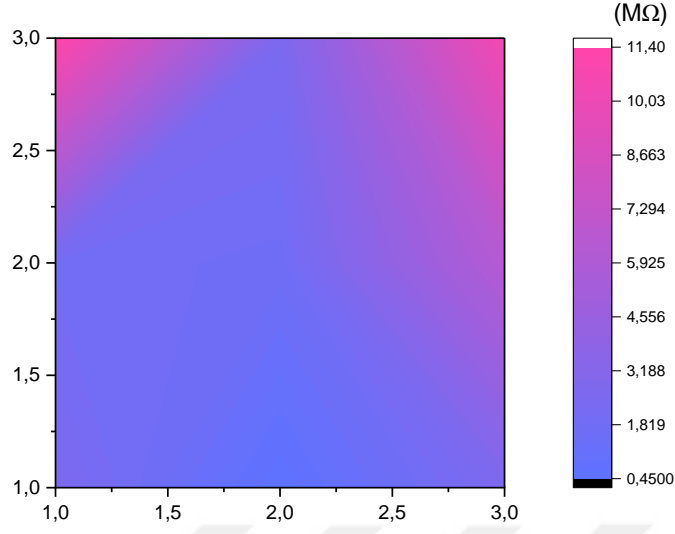
Şekil 4.32. BG2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci- voltaj grafiği

Şekil.4.32.'de kaplamanın yüzey özdirencinin $\sim 1 \times 10^{11} \text{ Ohm}/\square$ değerlerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.33. BG2 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Yukarıdaki grafikte BG2 kaplamanın ikinci günde belirgin bir düşüşten sonra $\sim 5\text{-}6 \text{ M}\Omega$ değerlerine ulaştığı görülmektedir.

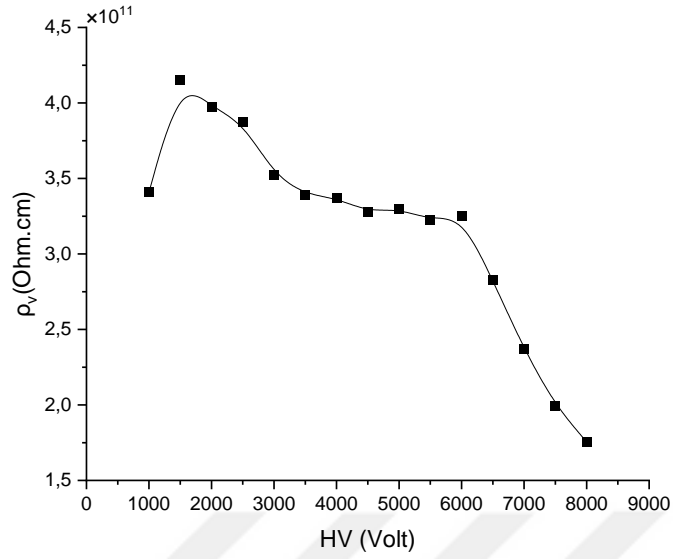


Şekil 4.34. BG2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.34.'te boyanın yüzeye üst iki köşe haricinde homojen dağılım gösterdiği, ortalama ~5-6MΩ değer aldığı görülmektedir.

Çizelge 4.17. BG3 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹⁰	ρ (Ohm.cm) x10 ¹¹
1000	0,264	6,8163	3,408
1500	0,325	8,3058	4,153
2000	0,453	7,9452	3,973
2500	0,581	7,7434	3,872
3000	0,766	7,0478	3,524
3500	0,928	6,7869	3,393
4000	1,068	6,7397	3,37
4500	1,235	6,5569	3,278
5000	1,363	6,6012	3,301
5500	1,535	6,4477	3,224
6000	1,66	6,5042	3,252
6500	2,07	5,6503	2,825
7000	2,66	4,735	2,368
7500	3,38	3,9922	1,996
8000	4,1	3,5103	1,755

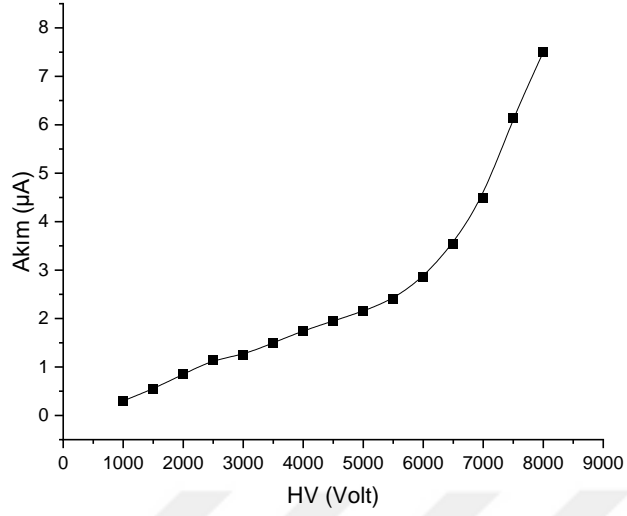


Şekil 4.35. BG3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenc – voltaj grafiği

Şekil 4.35.'te hacimsel özdirencin maksimum $4,15 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerinden $1,76 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

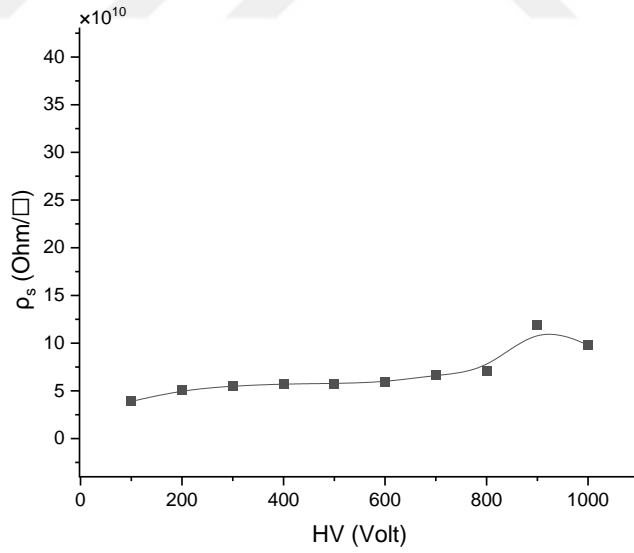
Çizelge 4.18. BG3 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0,3
1500	0,55
2000	0,85
2500	1,15
3000	1,25
3500	1,5
4000	1,75
4500	1,95
5000	2,15
5500	2,4
6000	2,85
6500	3,55
7000	4,5
7500	6,15
8000	7,5



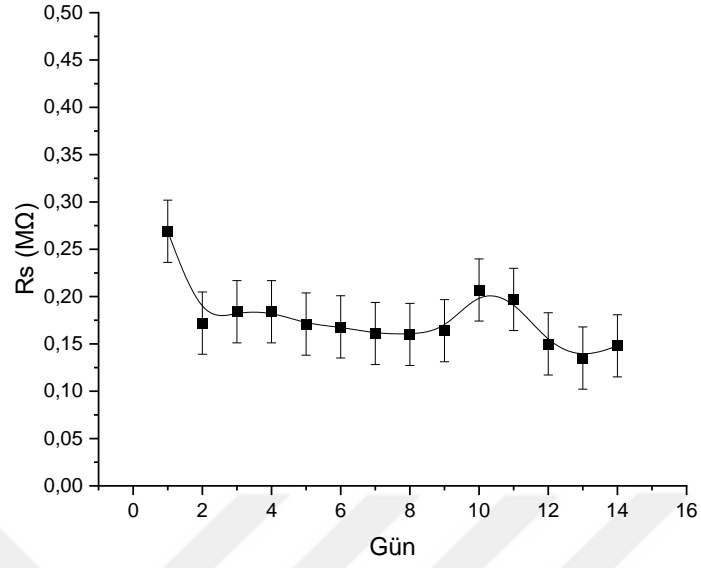
Şekil 4.36. BG3 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.36.'da kaçak akımın 0,3µA- 7,5µA değerleri arasında bir değişim gösterdiği görülmektedir.



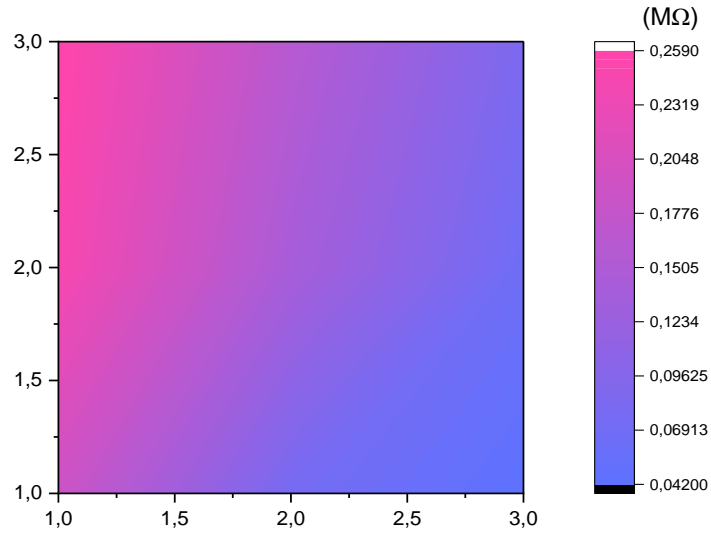
Şekil 4.37. BG3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci- voltaj grafiği

Şekil 4.37.'de kaplamanın yüzey özdirencinin $\sim 1,1 \times 10^{11}$ Ohm/□ değerine ulaştığı görülür.



Şekil 4.38. BG3 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.38. kaplamanın yüzey direncinin ikinci günden itibaren belirli bir değere ulaştığı, on ve on birinci günlerde daha yüksek değerler okunduğu, sonraki günlerde 0,15MΩ değerini aldığı görülmektedir.

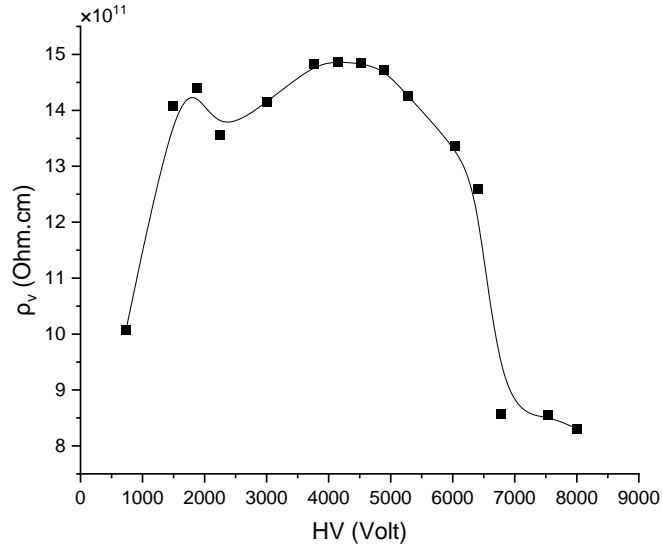


Şekil 4.39. BG3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.39., kaplamanın sol üst bölgesinde direncinin ortalama değerinin (~ 0,15MΩ) daha üstünde bir değer aldığını göstermektedir.

Çizelge 4.19. BG(D1)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç- voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm) x10 ¹²
732	0,109	2,0143	1,0071
1492	0,159	2,8147	1,4074
1872	0,195	2,8797	1,4398
2251	0,249	2,7117	1,3558
3009	0,319	2,8294	1,4147
3766	0,381	2,965	1,4825
4144	0,418	2,9738	1,4869
4522	0,457	2,9681	1,4841
4899	0,499	2,9449	1,4725
5276	0,555	2,8515	1,4258
6029	0,677	2,6713	1,3356
6405	0,763	2,518	1,259
6780	1,185	1,7161	0,858
7529	1,321	1,7095	0,8547
7994	1,443	1,6616	0,8308

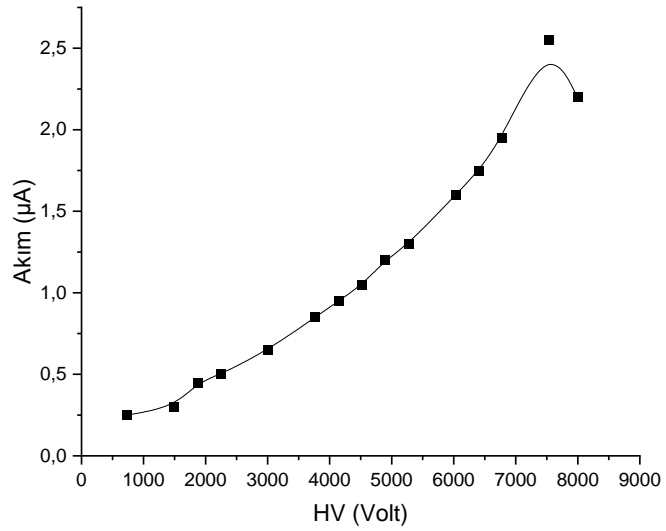


Şekil 4.40. BG(D1)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.40., diğer bakır kaplama grafiklerinin benzeri bir değişim eğrisi göstermiş, ~5000V’lardan sonra değeri düşme eğilimi göstermiştir.

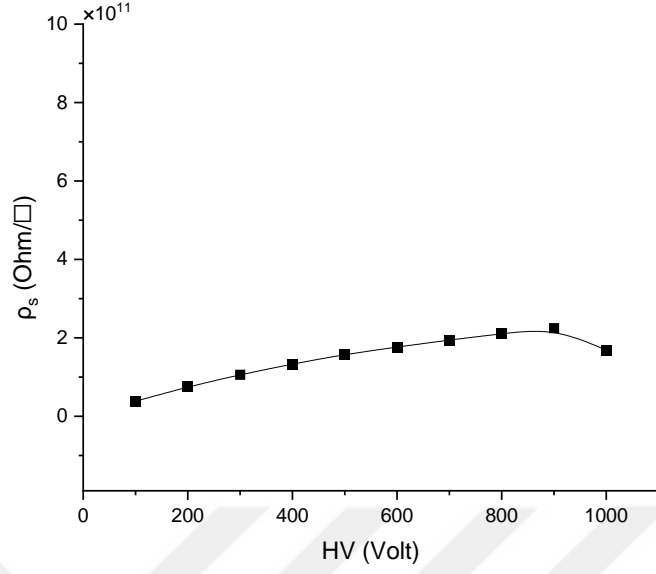
Çizelge 4.20. BG(D1)2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

HV (Volt)	Akım (μA)
732	0,25
1492	0,3
1872	0,45
2251	0,5
3009	0,65
3766	0,85
4144	0,95
4522	1,05
4899	1,2
5276	1,3
6029	1,6
6405	1,75
6780	1,95
7529	2,55
7994	2,2



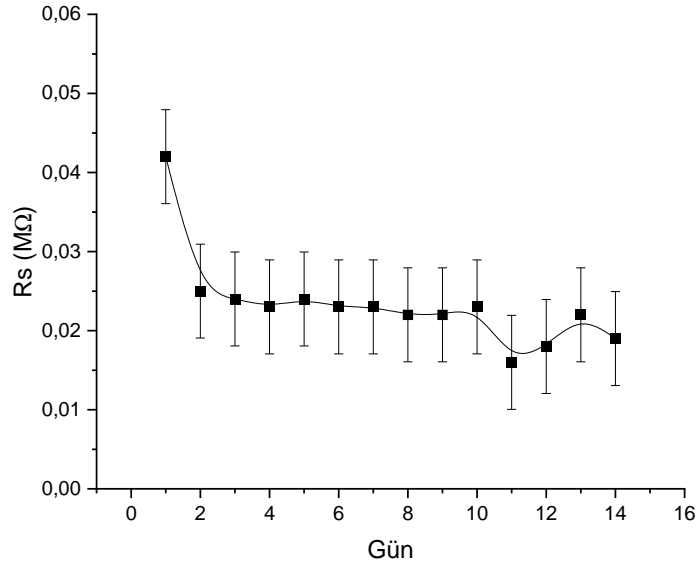
Şekil 4.41. BG(D1)2 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.41.'de kaçak akımın maksimum 2,2 μA değerine yükseldiği görülmektedir.



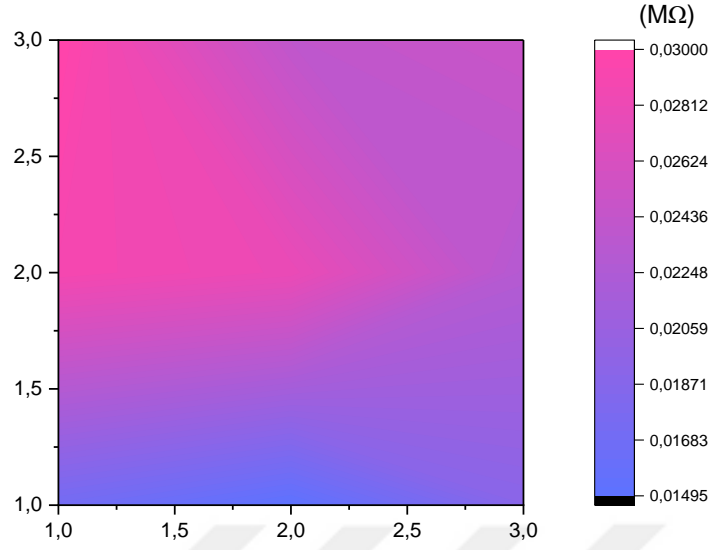
Şekil 4.42. BG(D1)2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci – voltaj grafiği

Şekil 4.42.'de kaplamanın yüzey özdirencinin $\sim 2 \times 10^{11}$ Ohm/□ değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.43. BG(D1)2 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.43.'te yüzey direncinin ikinci günde belirgin bir düşüş gösterdiği ve sonraki günlerde $\sim 0,02 M\Omega$ değerinde kararlı bir değere ulaştığı görülmektedir.

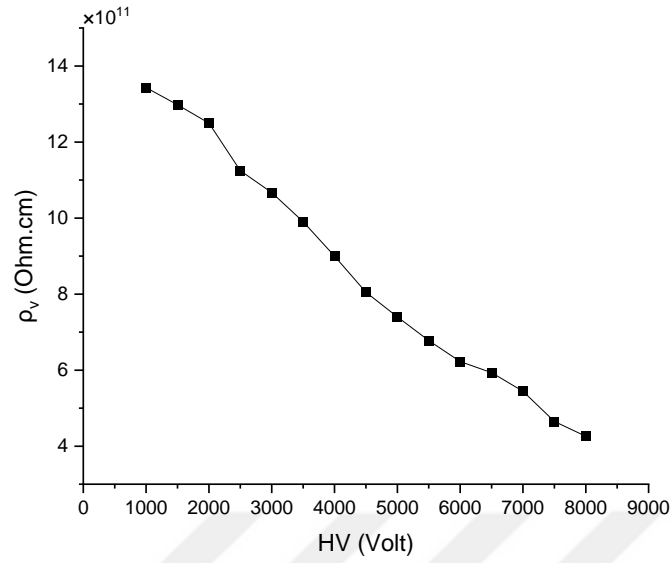


Şekil 4.44. BG(D1)2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

BG(D1)2 kaplamanın yüzey direnç ortalamasının $\sim 0,022\text{M}\Omega$ değerinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.21. BG(D1)3 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^{11}$	ρ (Ohm.cm) $\times 10^{12}$
1000	0,067	2,6863	1,3432
1500	0,104	2,5959	1,298
2000	0,144	2,4998	1,2499
2500	0,2	2,2498	1,1249
3000	0,253	2,1342	1,0671
3500	0,318	1,9809	0,9904
4000	0,4	1,7998	0,8999
4500	0,503	1,6101	0,805
5000	0,608	1,48	0,74
5500	0,73	1,3559	0,6779
6000	0,867	1,2454	0,6227
6500	0,986	1,1864	0,5932
7000	1,157	1,0888	0,5444
7500	1,451	0,9302	0,4651
8000	1,69	0,8518	0,4259

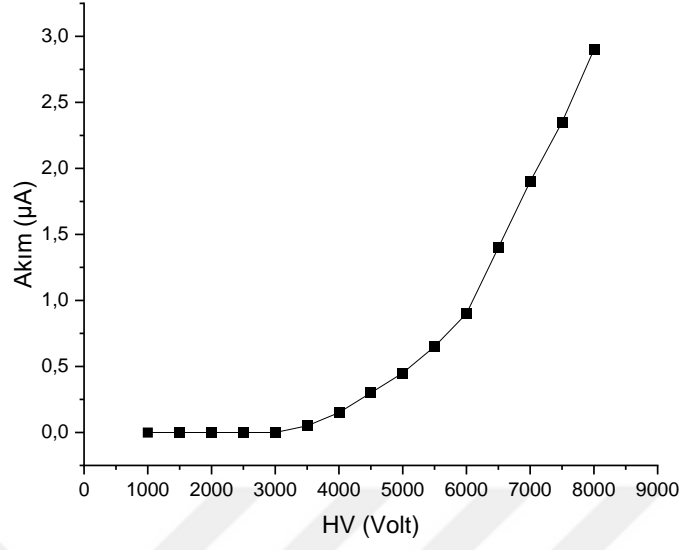


Şekil 4.45. BG(D1)3 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç- voltaj grafiği

Şekil 4.45.'te elektrota ait hacimsel özdirençin $13,4 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerinden $4,2 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düzgün bir düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir.

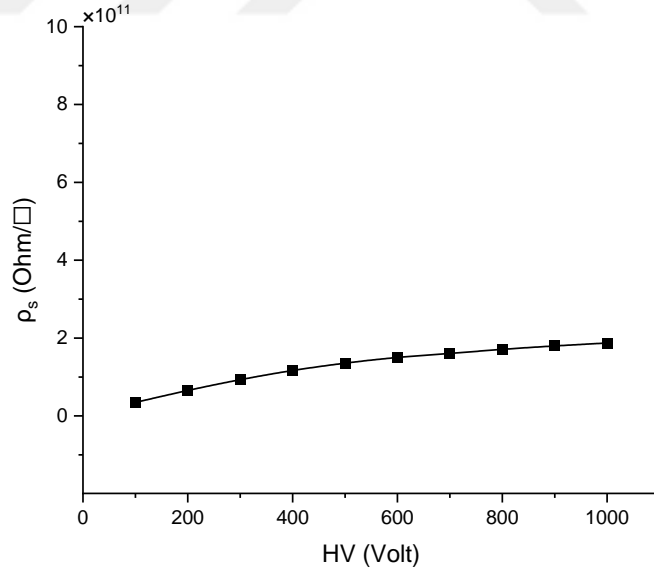
Çizelge 4.22. BG(D1)3 kaplamalı cam için akım-voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0
1500	0
2000	0
2500	0
3000	0
3500	0,05
4000	0,15
4500	0,3
5000	0,45
5500	0,65
6000	0,9
6500	1,4
7000	1,9
7500	2,35
8000	2,9



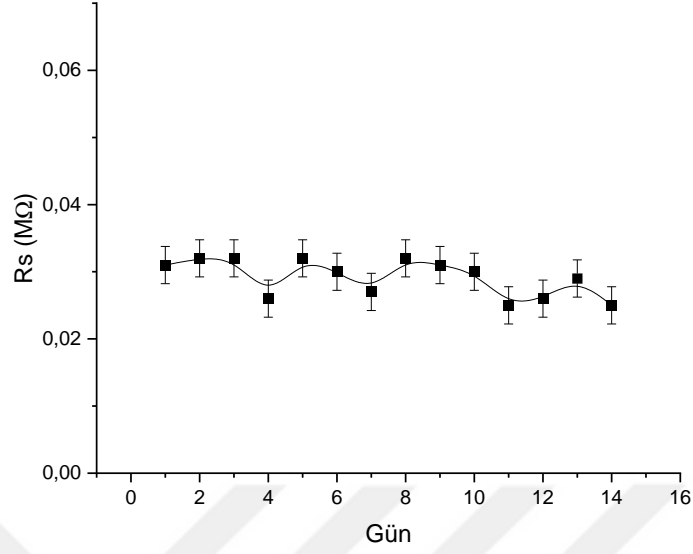
Şekil 4.46. BG(D1)3 kaplamalı cam için akım-voltaj grafiği

Şekil 4.46., elektrottan geçen kaçak akımın maksimum $2,9\mu\text{A}$ değerine ulaştığını göstermektedir.



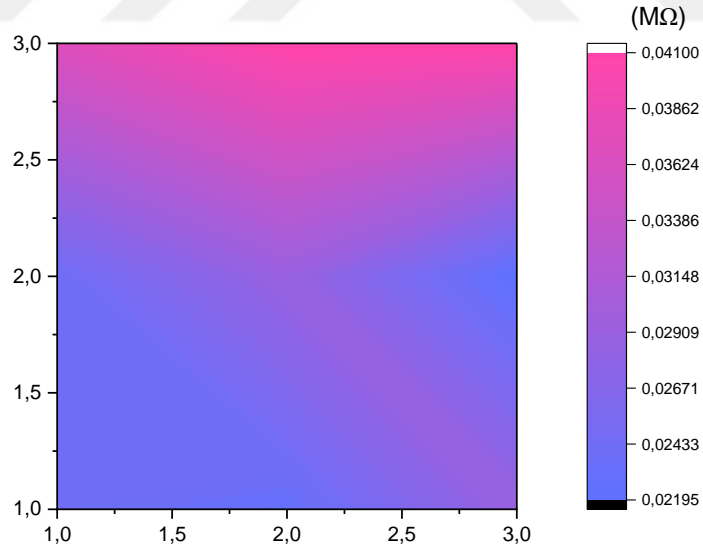
Şekil 4.47. BG(D1)3 kaplamalı cam için yüzey özdirenci – voltaj grafiği

Şekil 4.47.'de yüzey özdirencin $\sim 2 \times 10^{11}$ Ohm/□ değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.48. BG(D1)3 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değışimi

Şekil 4.48.'de kaplamanın güne bağı olarak belirli bir değışim göstermediği ~0,03MΩ değerlerinde kaldığı görülmektedir.

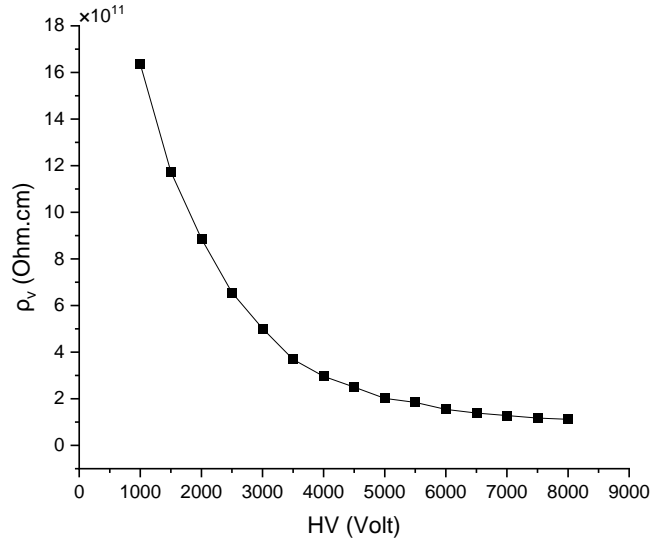


Şekil 4.49. BG(D1)3 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.49., kaplamanın üst kısmında yüzey direnç ortalamasının (~0,03MΩ) üstünde bir değerde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.23. BG(D1)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm) x10 ¹²
1000	0,055	3,2725	1,6362
1500	0,115	2,3476	1,1738
2000	0,203	1,7732	0,8866
2500	0,343	1,3117	0,6558
3000	0,538	1,0035	0,5017
3500	0,854	0,7375	0,3687
4000	1,215	0,5924	0,2962
4500	1,618	0,5004	0,2502
5000	2,233	0,4028	0,2014
5500	2,68	0,3692	0,1846
6000	3,494	0,3089	0,1544
6500	4,22	0,277	0,1385
7000	4,93	0,2553	0,1276
7500	5,76	0,2341	0,117
8000	6,42	0,2241	0,112

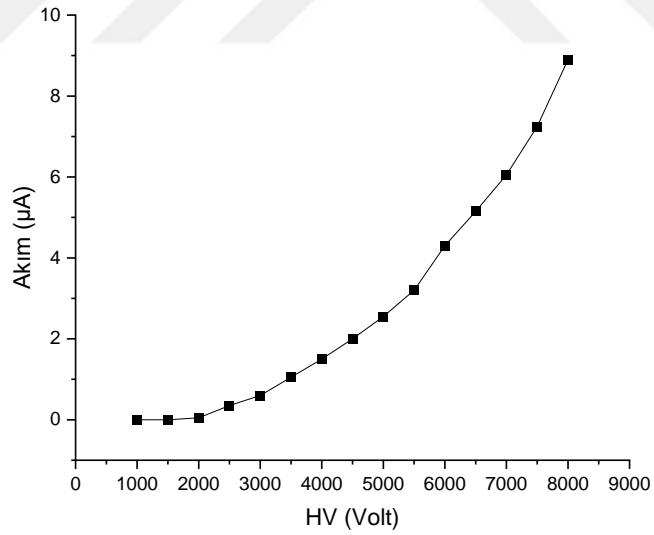


Şekil 4.50. BG(D1)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.50.'de hacimsel özdirençin maksimum $16,3 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerinden $1,12 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düzgün bir düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir.

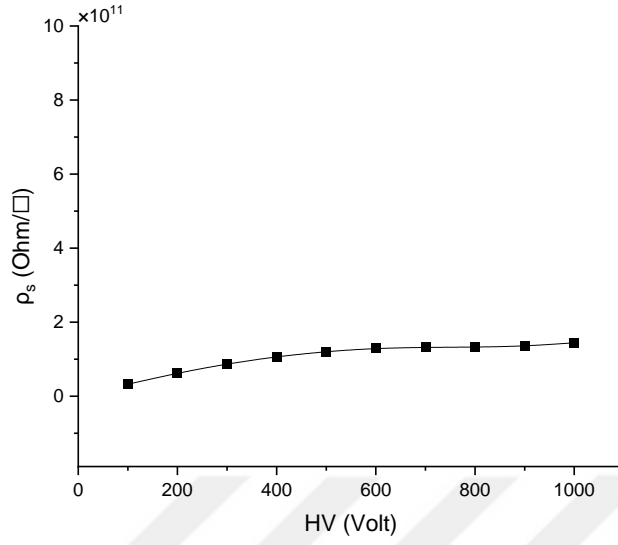
Çizelge 4.24. BG(D1)4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μA)
1000	0
1500	0
2000	0,05
2500	0,35
3000	0,6
3500	1,05
4000	1,5
4500	2
5000	2,55
5500	3,2
6000	4,3
6500	5,15
7000	6,05
7500	7,25
8000	8,9



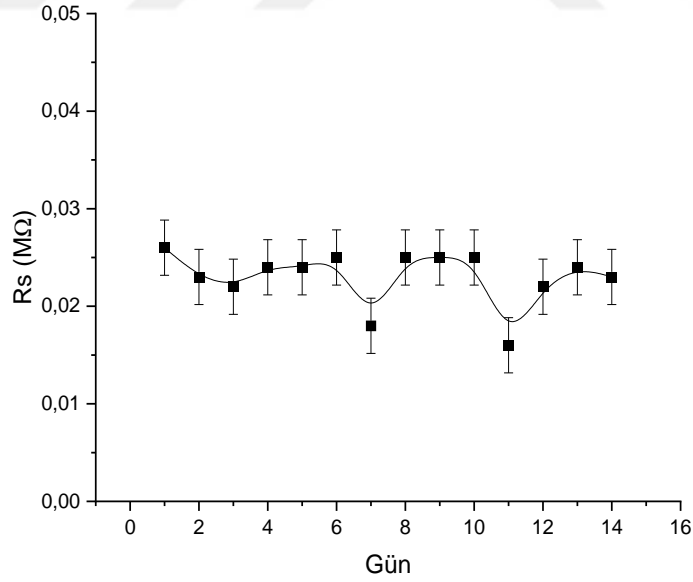
Şekil 4.51. BG(D1)4 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.51.'de elektrot hacminden geçen kaçak akımın maksimum $8,9\mu\text{A}$ değerine ulaştığı görülmektedir.



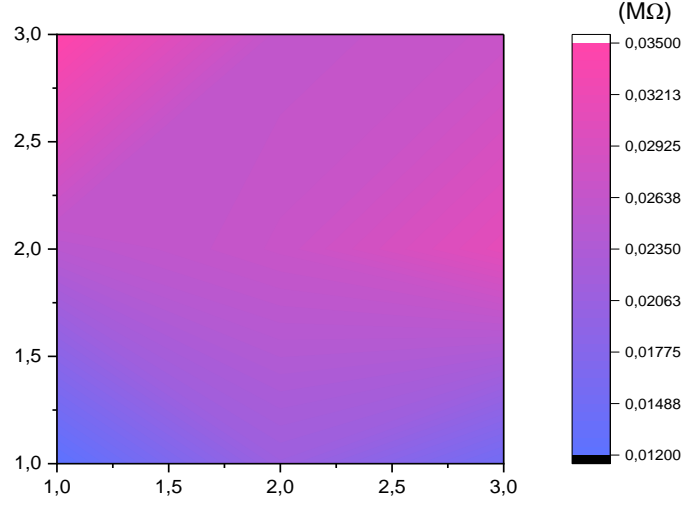
Şekil 4.52. BG(D1)4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci– voltaj grafiği

Şekil 4.52.'de yüzey özdirencin $\sim 1,5 \times 10^{11}$ Ohm/□ değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.53. BG(D1)4 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişim grafiği

Şekil 4.53.'te kaplamanın yüzey direncinin güne bağlı belirgin bir değişim göstermediği, $\sim 0,023$ MΩ değerinde kaldığı görülmektedir.

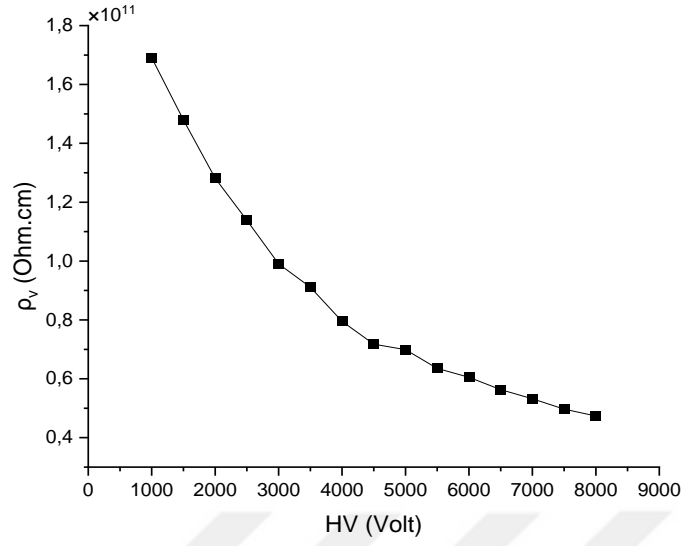


Şekil 4.54. BG(D1)4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.54., yapılan boyamanın genel itibariyle homojenliğinin sağlandığını, ortalama yüzey direncinin $\sim 0,023\text{M}\Omega$ değerinde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.25. BG(D3)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm) $\times 10^{10}$	ρ (Ohm.cm) $\times 10^{11}$
1000	0,532	3,3816	1,6908
1500	0,912	2,9587	1,4794
2000	1,404	2,5623	1,2812
2500	1,974	2,2778	1,1389
3000	2,723	1,9813	0,9906
3500	3,453	1,8227	0,9113
4000	4,521	1,5907	0,7953
4500	5,635	1,4356	0,7178
5000	6,43	1,3978	0,6989
5500	7,78	1,2706	0,6353
6000	8,91	1,2103	0,6051
6500	10,37	1,1264	0,5632
7000	11,82	1,0641	0,532
7500	13,56	0,9937	0,4968
8000	15,18	0,9468	0,4734

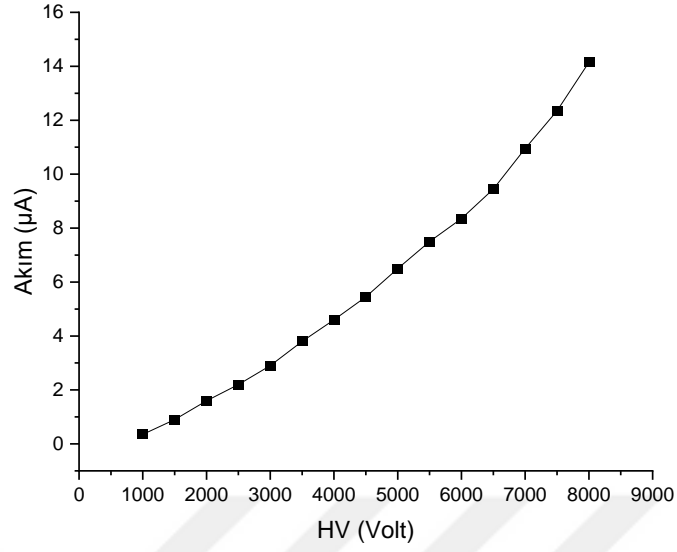


Şekil 4.55. BG(D3)4 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.55.'te elektrota ait hacimsel özdirençin 1000V'ta maksimum değeri aldığı ($1,7 \times 10^{11}$ Ohm.cm), yüksek voltajlarda $0,47 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

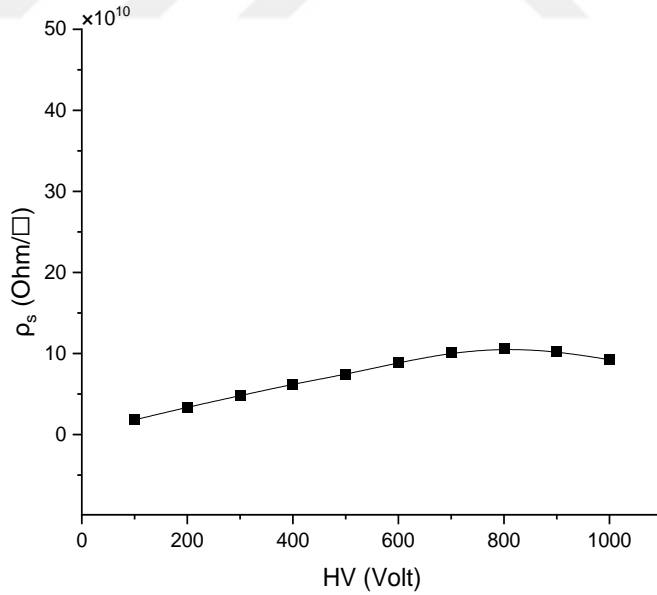
Çizelge 4.26. BG(D3)4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
1000	0,35
1500	0,9
2000	1,6
2500	2,2
3000	2,9
3500	3,8
4000	4,6
4500	5,45
5000	6,5
5500	7,5
6000	8,35
6500	9,45
7000	10,95
7500	12,35
8000	14,15



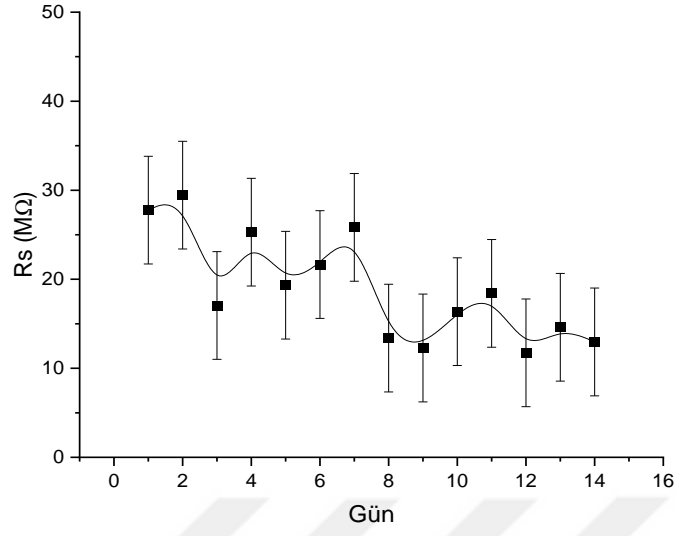
Şekil 4.56. BG(D3)4 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.56.'da elektrot hacminden geçen kaçak akımın maksimum 14,15μA değerine ulaştığı görülmektedir.



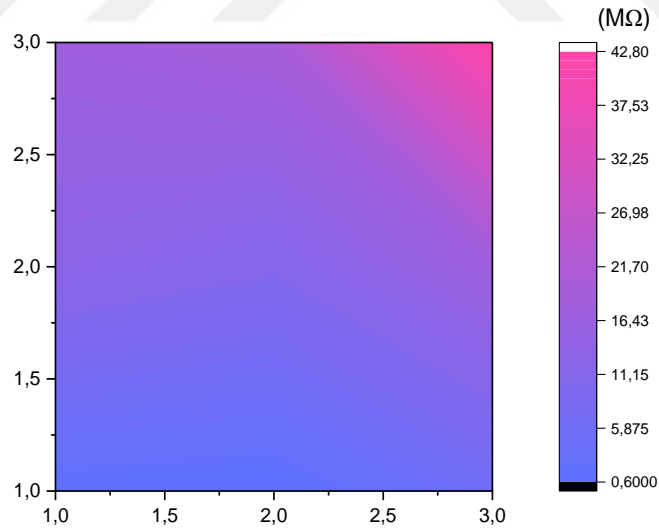
Şekil 4.57. BG(D3)4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci – voltaj grafiği

Şekil 4.57., kaplamaya ait yüzey özdirencinin yüksek voltajlarda ~ 9x10¹⁰Ohm/□ değerini aldığını göstermektedir.



Şekil 4.58. BG(D3)4 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.58.'de kaplamanın yüzey direncinin üçüncü gün ve sekizinci günde belirli bir düşüş gösterdiği, son günlerde ~16MΩ değerinde olduğu görülmektedir.

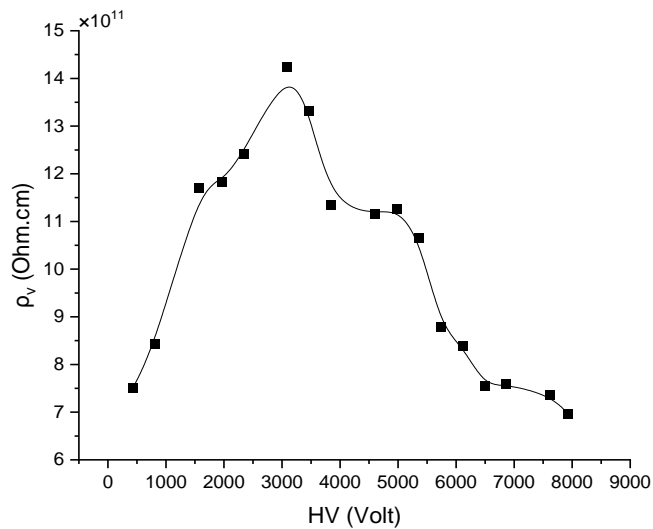


Şekil 4.59. BG(D3)4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.59.'da yapılan kaplamanın sağ üst köşeye bakılacak olursa yüzey direnç değeri aralığının fazla olduğu görülmektedir. Boyanın nispeten homojen dağılımı görülmekle beraber ortalama yüzey direnç değeri açıklanan sebepten dolayı etkilendir.

Çizelge 4.27. BG(D4)2 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm)x10 ¹²
436	0,087	1,5031	0,7515
816	0,145	1,6879	0,8439
1576	0,202	2,3402	1,1701
1956	0,248	2,3658	1,1829
2336	0,282	2,4848	1,2424
3094	0,326	2,8469	1,4234
3473	0,391	2,6644	1,3322
3851	0,509	2,2694	1,1347
4607	0,619	2,2324	1,1162
4984	0,664	2,2515	1,1257
5361	0,754	2,1327	1,0663
5738	0,98	1,7562	0,8781
6114	1,094	1,6763	0,8381
6490	1,29	1,509	0,7545
6865	1,357	1,5173	0,7586
7614	1,552	1,4714	0,7357
7933	1,708	1,393	0,9654

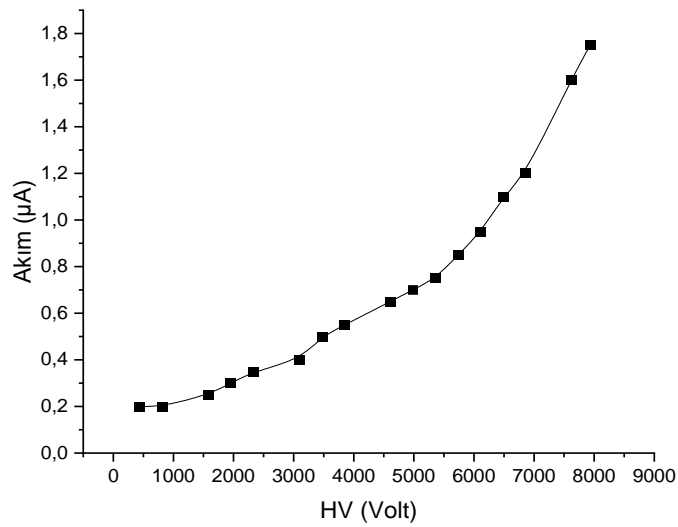


Şekil 4.60. BG(D4)2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.60.'ta elektrotun hacimsel özdirençinin 3500V'a kadar yükseldiği, bu voltajdan sonra düşüşe geçtiği 7000V-8000V'ta 8×10^{11} Ohm.cm değerinde olduğu görülür.

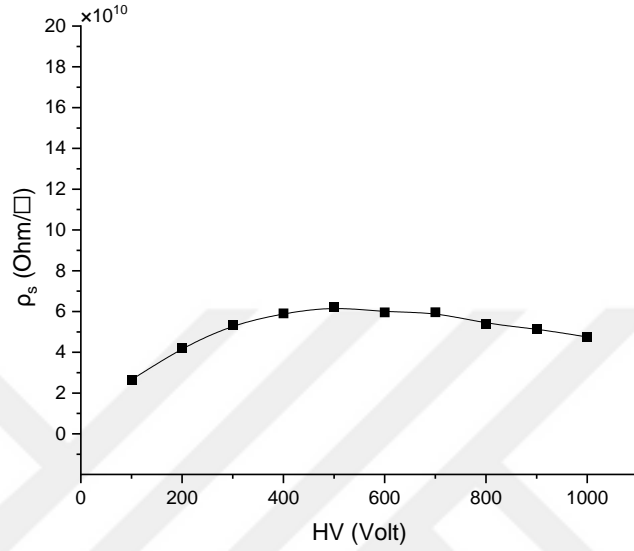
Çizelge 4.28. BG(D4)2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μ A)
436	0,2
816	0,2
1576	0,25
1956	0,3
2336	0,35
3094	0,4
3473	0,5
3851	0,55
4607	0,65
4984	0,7
5361	0,75
5738	0,85
6114	0,95
6490	1,1
6865	1,2
7614	1,6
7933	1,75



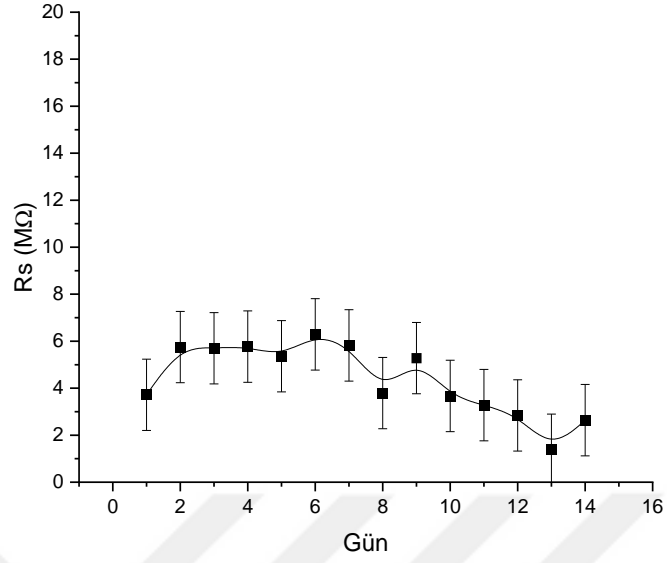
Şekil 4.61. BG(D4)2 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.61.'de elektrot hacminden geçen kaçak akımın diğer kaplamalara göre çok daha küçük değerde olduğu (maksimum $1,75\mu\text{A}$) görülmektedir. Bu sonuç hacimsel öz direncin büyük değerde olduğunu gösterdiği için olumludur.



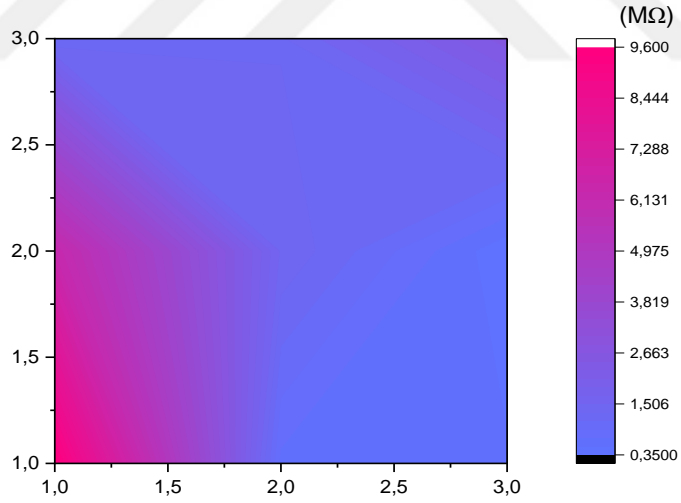
Şekil 4.62. BG(D4)2 kaplamalı cam için yüzey öz direnci – voltaj grafiği

Şekil 4.62., kaplamaya ait yüzey öz direncin $\sim 5 \times 10^{10} \text{ Ohm}/\square$ değerine ulaştığı görülür. Bu değer diğer kaplamalara göre nispeten düşük olduğu için detektörde kullanılmak üzere seçilebilir.



Şekil 4.63. BG(D4)2 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişimi

Şekil 4.63.'te yüzey direncinin on ikinci günden sonra $\sim 2\text{-}3\text{M}\Omega$ değerine düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.64. BG(D4)2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.64.'te yüzey üzerine dağılan boyanın sol alt köşe haricinde homojen olduğu, $\sim 2\text{-}3\text{M}\Omega$ değerinde olduğu görülür. Köşedeki direnç değerinin ortalamayı etkilediği görülmektedir.

4.4. Bor Karbür (B₄C) + Grafit Kaplamalı Cam Bulguları

Aşağıdaki çizelgede hazırlanan boya karışımındaki Bor Karbür, grafit oranları ile atılan kat sayıları verilmiştir:

Çizelge 4.29. Bor Karbür + grafit kaplamaların kütlece Bor Karbür, grafit oranları ve atılan kat sayıları

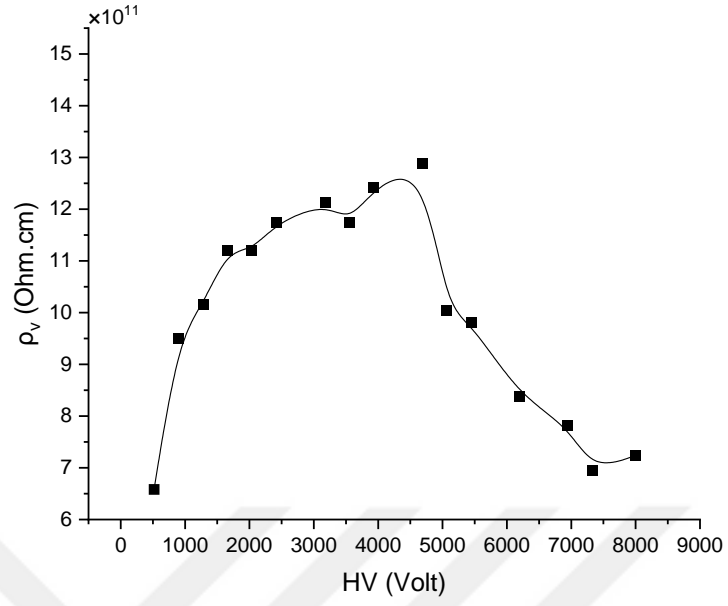
Kaplama kodu	Bor Karbür oranı (%)	Grafit oranı (%)	Kat sayısı
BKG2	37,04	11,11	2 kat
BKG4	37,04	11,11	4 kat
BKG5	37,04	11,11	5 kat

Çizelge 4.30. BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm)x10 ¹²
518	0,118	1,3166	0,6583
899	0,142	1,899	0,9495
1279	0,189	2,0298	1,0149

Çizelge 4.30. BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj değerleri(devamı)

1659	0,222	2,2415	1,1208
2038	0,273	2,2392	1,1196
2418	0,309	2,3472	1,1736
3176	0,393	2,4241	1,2121
3555	0,454	2,3488	1,1744
3933	0,475	2,4837	1,2419
4689	0,546	2,576	1,288
5066	0,756	2,01	1,005
5443	0,832	1,9623	0,9811
6195	1,109	1,6755	0,8377
6946	1,331	1,5652	0,7826
7321	1,581	1,3888	0,6944
7997	1,657	1,4475	0,7237

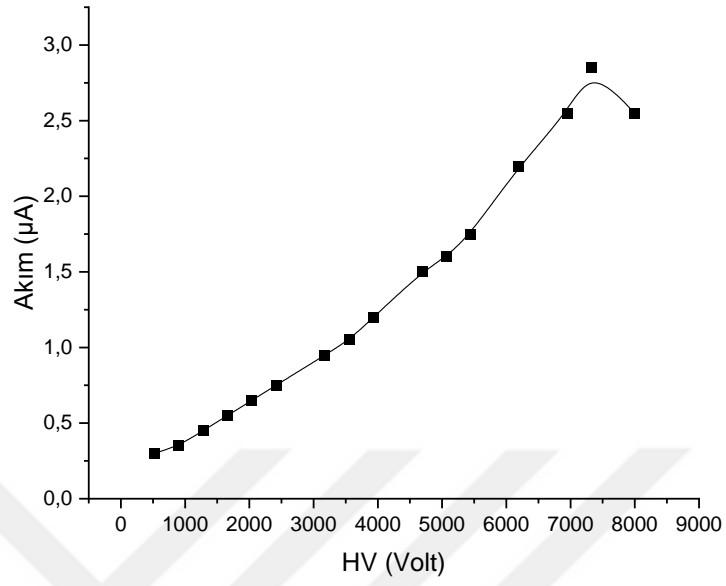


Şekil 4.65. BKG2 kaplamalı cam için hacimsel özdirenc- voltaj grafiği

Şekil 4.65.'te ~ 4500V'ta maksimum değere ulaşan hacimsel özdirencin yüksek voltajlarda ~ 7×10^{11} Ohm.cm değerine düştüğü görülmektedir.

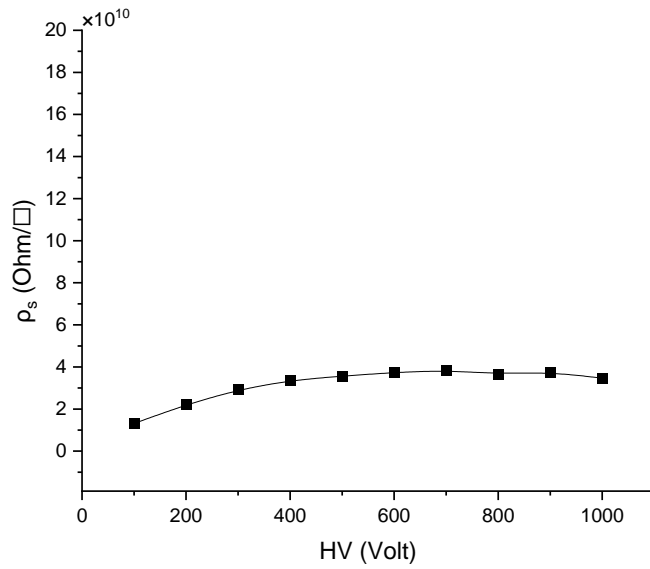
Çizelge 4.31. BKG2 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (µA)
518	0,3
899	0,35
1279	0,45
1659	0,55
2038	0,65
2418	0,75
3176	0,95
3555	1,05
3933	1,2
4689	1,5
5066	1,6
5443	1,75
6195	2,2
6946	2,55
7321	2,85
7997	2,55



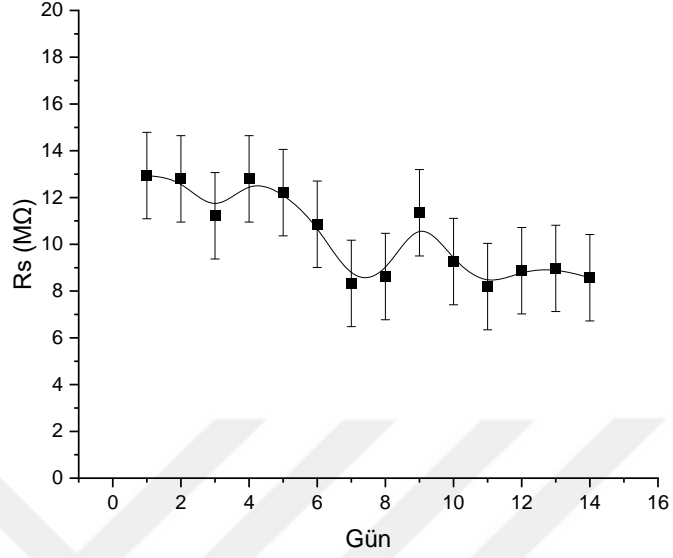
Şekil 4.66. BKG2 kaplamalı cam için akım- voltaj grafiği

Şekil 4.66.'da kaçak akımın yüksek voltajlarda maksimum 2,85µA değerine ulaştığı görülmektedir.



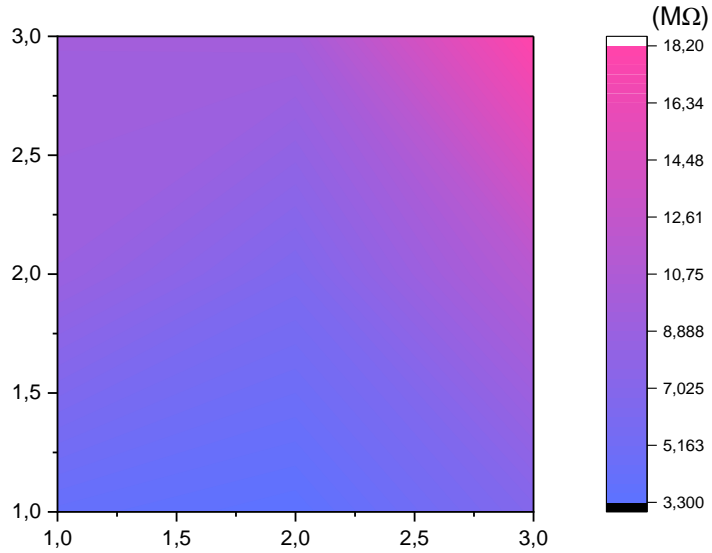
Şekil 4.67. BKG2 kaplamalı cam için yüzey özdirenci- voltaj grafiği

Şekil 4.67.'de yüzey özdirencin $\sim 3 \times 10^{10} \Omega/\square$ değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.68. BKG2 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişim grafiği

Şekil 4.68.'de kaplamanın yüzey direncinin on birinci günden itibaren $\sim 9 M\Omega$ değerinde olduğu görülmektedir.

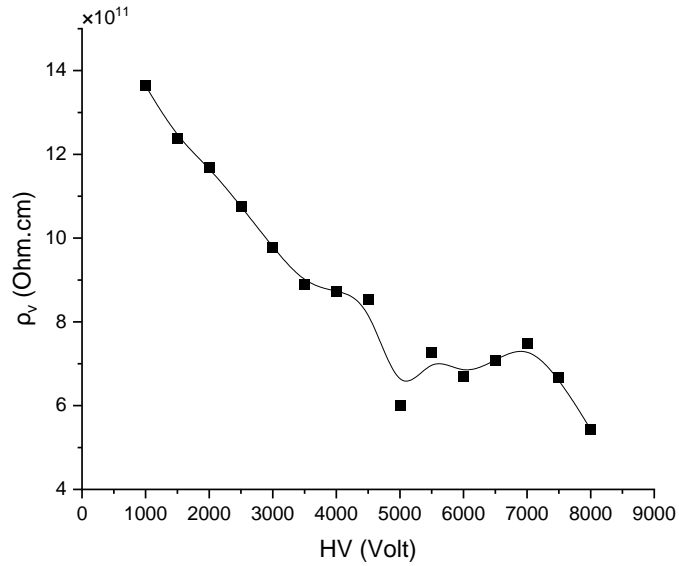


Şekil 4.69. BKG2 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.69.'da yüzey direnç dağılımının sağ üst köşe haricinde nispeten orantılı olduğu ($\sim 9M\Omega$) görülmektedir.

Çizelge 4.32. BKG4 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm)x10 ¹²
1000	0,066	2,727	1,3635
1500	0,109	2,4768	1,2384
2000	0,154	2,3374	1,1687
2500	0,209	2,1529	1,0765
3000	0,276	1,9563	0,9781
3500	0,354	1,7794	0,8897
4000	0,412	1,7473	0,8737
4500	0,474	1,7086	0,8543
5000	0,748	1,203	0,6015
5500	0,681	1,4535	0,7267
6000	0,806	1,3397	0,6698
6500	0,825	1,418	0,709
7000	0,843	1,4944	0,7472
7500	1,012	1,3338	0,6669
8000	1,325	1,0866	0,5433

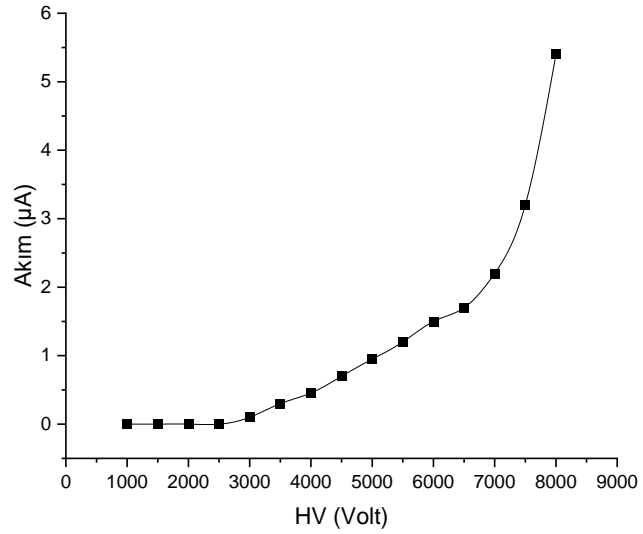


Şekil 4.70. BKG4 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç – voltaj grafiği

Şekil 4.70.'te elektrota ait hacimsel öz direncin $\sim 13,6 \times 10^{11} \text{ Ohm.cm}$ değerinden yüksek voltajlarda $\sim 6 \times 10^{11} \text{ Ohm.cm}$ değerine düştüğü görülmektedir.

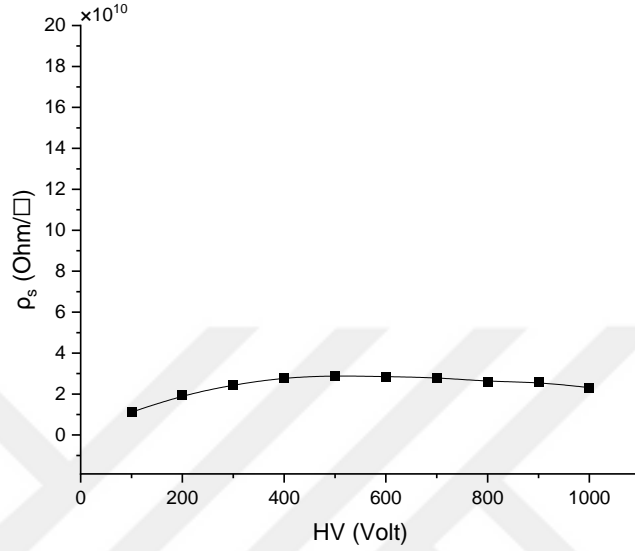
Çizelge 4.33. BKG4 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

Voltaj (V)	Akım (μA)
1000	0
1500	0
2000	0
2500	0
3000	0,1
3500	0,3
4000	0,454
4500	0,7
5000	0,95
5500	1,2
6000	1,5
6500	1,7
7000	2,2
7500	3,2
8000	5,4



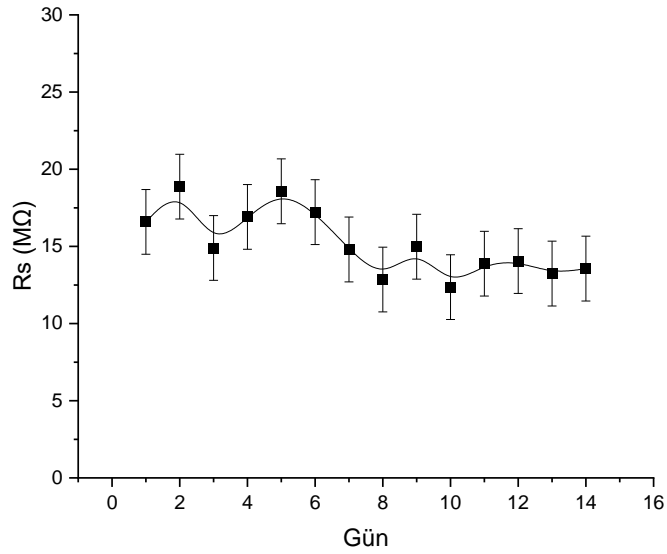
Şekil 4.71. BKG4 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.71.'de elektrot hacminden geçen kaçak akımın 7000V'a kadar küçük değerlerde artışı görülmekle birlikte daha yüksek voltajlarda orantısız bir yükseliş görülmektedir.



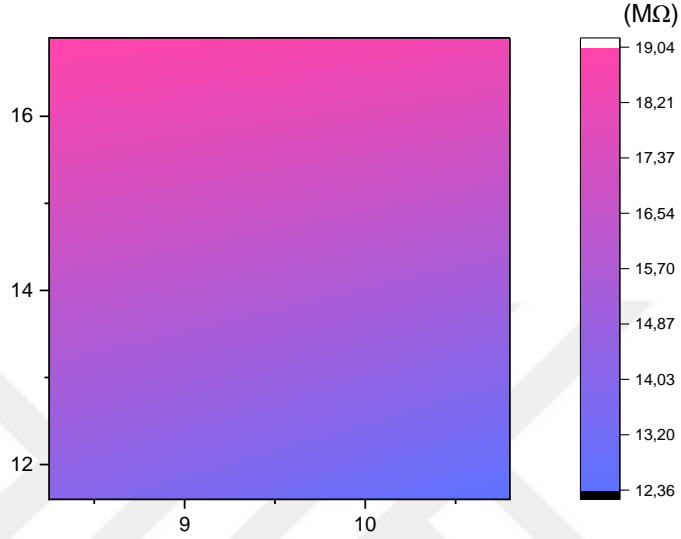
Şekil 4.72. BKG4 kaplamalı cam için yüzey özdirenci – voltaj grafiği

Şekil 4.72.'de yüzey özdirencinin yüksek voltajlarda $\sim 2 \times 10^{10}$ Ohm/□ değerine ulaştığı görülür.



Şekil 4.73. BKG4 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişim grafiği

Şekil 4.73.'te kaplamanın yüzey direncinin sekizinci günden itibaren kararlı değere ulaştığı (~15M Ω) değerini aldığı görülmektedir.



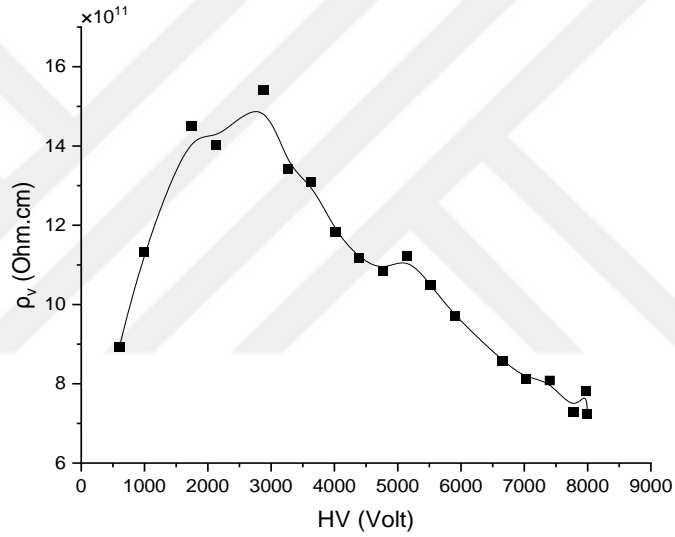
Şekil 4.74. BKG4 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.74.'te ortalama yüzey direnç değerinin ~ 15M Ω değerinde olduğu, direnç değişimi değer aralığının nispeten küçük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.34. BKG5 kaplamalı cam için hacimsel öz direnç – voltaj değerleri

HV (Volt)	ΔV (Volt)	R (Ohm)x10 ¹¹	ρ (Ohm.cm)x10 ¹²
601	0,101	1,7848	0,8924
982	0,13	2,2658	1,1329
1741	0,18	2,9013	1,4506
2121	0,227	2,8027	1,4013
2879	0,28	3,0843	1,5421
3258	0,364	2,6848	1,3424
3637	0,417	2,6162	1,3081
4015	0,509	2,3661	1,183
4393	0,59	2,2334	1,1167
4770	0,66	2,1678	1,0839
5147	0,688	2,244	1,122

5524	0,79	2,0974	1,0487
5900	0,911	1,9426	0,9713
6651	1,162	1,7168	0,8584
7027	1,296	1,6263	0,8131
7401	1,373	1,6168	0,8084
7774	1,598	1,4591	0,7295
7980	1,53	1,5644	0,7822
7996	1,654	1,45	0,725



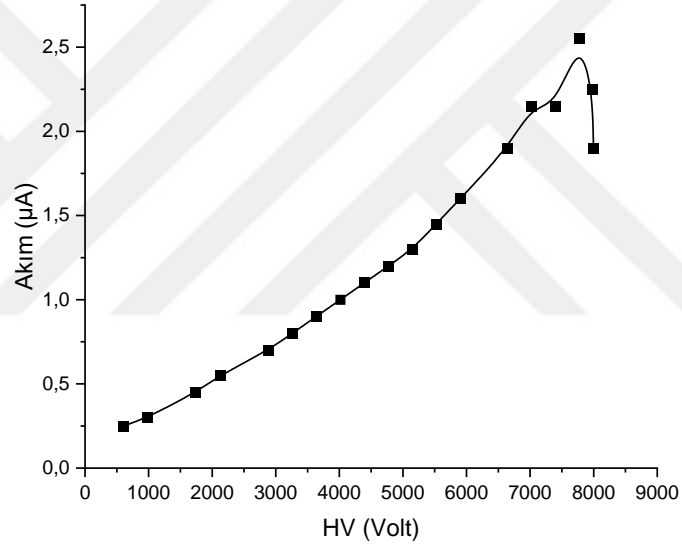
Şekil 4.75. BKG5 kaplamalı cam için hacimsel özdirenç – voltaj grafiği

Şekil 4.75.'te elektrota ait hacimsel özdirençin ~ 3500V'ta maksimum değere (~ 15×10^{11} Ohm.cm) ulaştığı, yüksek voltajlarda ~ $7,2 \times 10^{11}$ Ohm.cm değerini aldığı görülür.

Çizelge 4.35. BKG5 kaplamalı cam için akım – voltaj değerleri

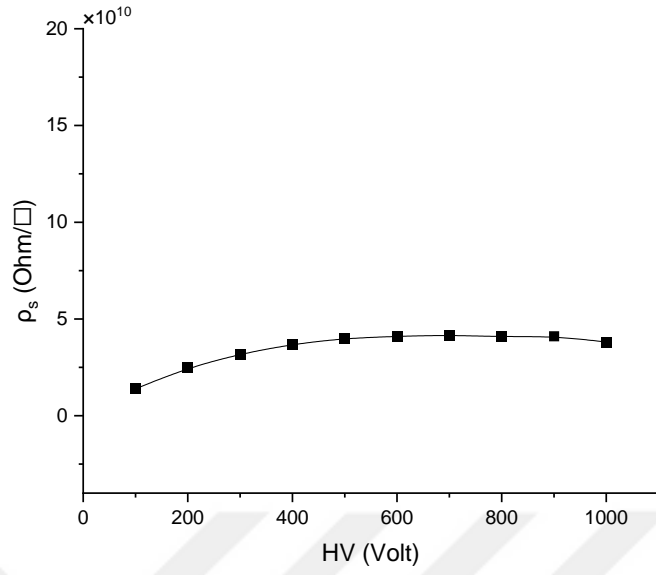
Voltaj (V)	Akım (μ A)
601	0,25
982	0,3
1741	0,45
2121	0,55
2879	0,7
3258	0,8

3637	0,9
4015	1
4393	1,1
4770	1,2
5147	1,3
5524	1,45
5900	1,6
6651	1,9
7027	2,15
7401	2,15
7774	2,55
7980	2,25
7996	1,9



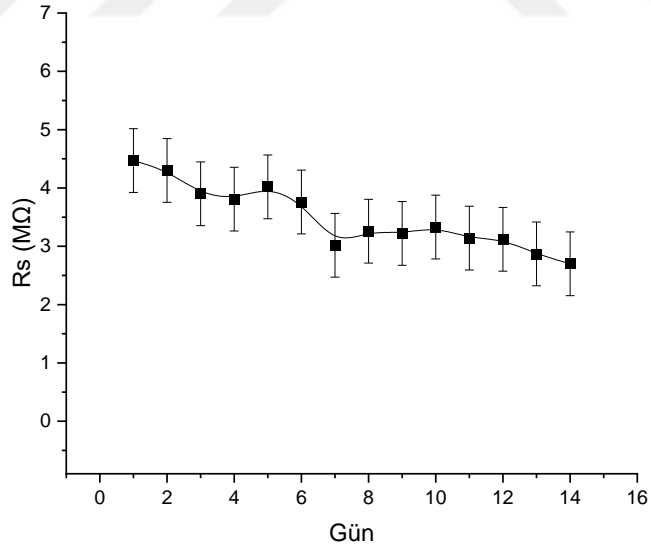
Şekil 4.76. BKG5 kaplamalı cam için akım – voltaj grafiği

Şekil 4.76.'da kaçak akımın küçük değerlerde olduğu, maksimum 2,5 μA değerine ulaştığı görülmektedir.



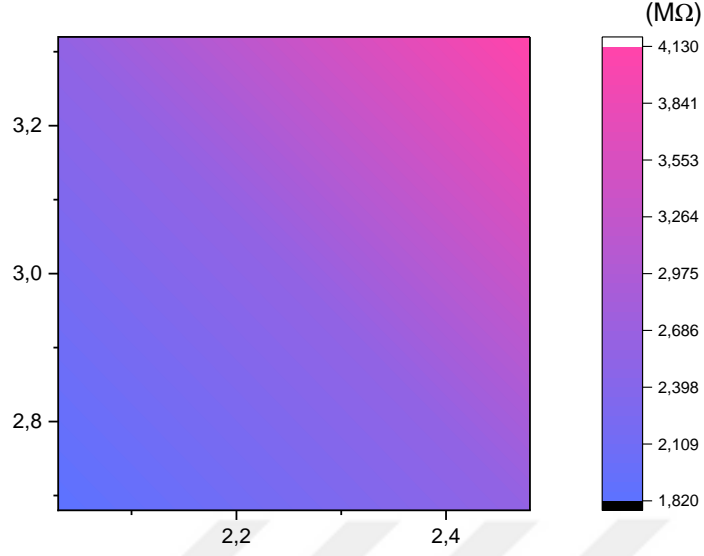
Şekil 4.77. BKG5 kaplamalı cam için yüzey özdirenci- voltaj grafiği

Şekil 4.77.'de yüzey özdirencin $\sim 3 \times 10^{10}$ Ohm/cm² değer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.78. BKG5 kaplamalı cam için gün bazında yüzey direnç değişim grafiği

Şekil 4.78.'de kaplamanın yüzey direncinin yedinci güne kadar düşüş eğiliminde olduğu on dördüncü günde ~ 3 MΩ değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.79. BKG5 kaplamalı cam için yüzey direnç haritası

Şekil 4.79.'da kaplamamanın yüzey üzerine homojen dağıldığı, direnç değer aralığının nispeten küçük olduğu ve yüzey direncin $\sim 3M\Omega$ olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çalışmada elektrot olarak cam malzeme seçilmiştir. Camın gaz hacmine bakan yüzey pürüzlülüğü $0,5752nm$ değerindedir. Bu sonuç, kullanılan camın düşük değerdeki pürüzlülüğünden dolayı elektrik alanda oluşacak bozulmaları en aza indirir. Bununla birlikte toz, parmak izi gibi etkiler de elektrik alanı bozabilir. Bu yüzden kaplama öncesi, sonrası ve detektör yapımında materyallerin temizliğine özen gösterilmiştir. Aynı zamanda cam, hava sıcaklığı ve nem gibi diğer değişkenlerden çok daha az etkilendiğinden elektrot olarak seçilmesi avantajlıdır.

Elektrot olarak bir kenarı $7cm$ olan kare şeklinde kesilmiş küçük boyutlu camlar tercih edilmiştir. Elektrotların küçük boyutlu olması, detektörün mekanik sağlamlığını artırmıştır. Aynı zamanda elektrotlar arasına esnemeyi engelleyen fakat detektör içindeki elektrik alanı bozabilen küçük parçaların kullanılmasına gerek duyulmamıştır. $2mm$ ve $3mm$ olmak üzere iki farklı kalınlıkta düz cam kullanılmış ve her bir camın voltaja bağlı hacimsel öz dirençleri ölçülmüştür. $2mm$ camın çalışılan voltaj değerleri

aralığında hacimsel özdirenci $4,35 \times 10^{12}$ - $2,25 \times 10^{12}$ Ohm.cm, 3mm camın ise $6,7 \times 10^{12}$ - $4,35 \times 10^{12}$ Ohm.cm' dir. Uygulanan voltaj ile hacimsel özdirenç değerleri ters orantılı olacak şekilde tipik bir eğri göstermiştir. Ayrıca camın kalınlığına bağlı olarak hacimsel özdirenç değerinde de artış görülmektedir.

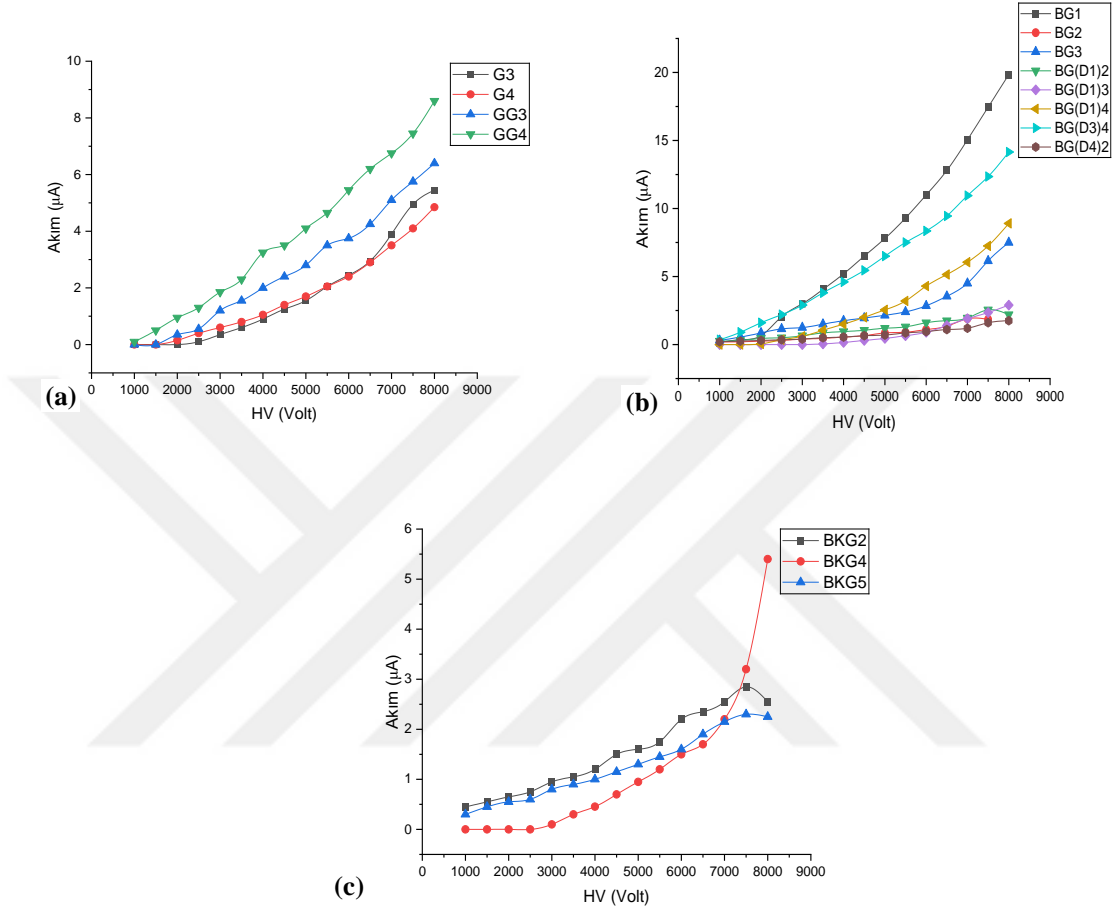
Tüm elektrot örneklerinin hacimsel özdirenç değerleri yüksek voltajlara çıkıldıkça azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca kaplamalı camlarda çalışılan voltaj değerlerinde ölçülen hacimsel özdirenç değerleri $17,4 \times 10^{11}$ – $1,86 \times 10^{10}$ Ω.cm aralığındadır. Böylece düz cama göre kaplamalı camların hacimsel özdirençlerinde beklenildiği gibi bir azalma görülmektedir. Ayrıca kaplamasız camların hacimsel özdirenç grafiklerinde voltaj artırıldıkça hacimsel özdirenç değerinde doğrudan bir azalma gösterirken, kaplamalı camlarda genel olarak önce belirli bir voltaj değerine kadar hacimsel özdirençte artış, daha sonra yüksek voltajlara çıkıldıkça azalış eğilimi göstermiştir. Bu durum kaplamanın oluşturduğu direncin hacimsel özdirence katkısını göstermektedir.

4000V- 5000V çalışma voltaj aralığında en yüksek hacimsel özdirenç değerleri sırasıyla, BG2, BG(D1)2, BKG2, BG(D4)2 ve BKG5 kaplamada gözlenmiştir. Yüksek hacimsel özdirenç, detektörde zaman çözünürlüğünün ve sayma oranının kontrolünü sağlasa da detektör için elektrot seçiminde tek başına yeterli bir özellik değildir.

Yüzey direnç değeri, RPC'nin verimliliğini büyük ölçüde etkiler. Aynı zamanda okuma hızı, konum çözünürlüğü ve alınan sinyalin şeklini de belirler. Detektörün çalışma voltajı, yüzey direnci arttıkça azalır. Tez çalışmasında grafit kaplamalı elektrotlarda yüzey direnci $25 \text{M}\Omega$ – $70 \text{k}\Omega$ aralığında, bakır + grafit kaplamalı elektrotlarda $16 \text{M}\Omega$ – $20 \text{k}\Omega$ aralığında, bor karbür + grafit kaplamalarda ise $15 \text{M}\Omega$ – $3 \text{M}\Omega$ aralığında ölçülmüştür. Yüzey direnci 1-4MΩ aralığında olan örnekler belirlenmiştir.

RPC'nin çalışma verimliliği dirençli elektrotlarda indüklenen yükün sayma hızının kontrol edilmesine bağlıdır. Başka bir deyişle, voltaj arttıkça kaçak akımın artışının çok daha az olması istenmektedir. Bunun kontrolü akım-voltaj grafiklerinin karşılaştırılmasıyla sağlanır.

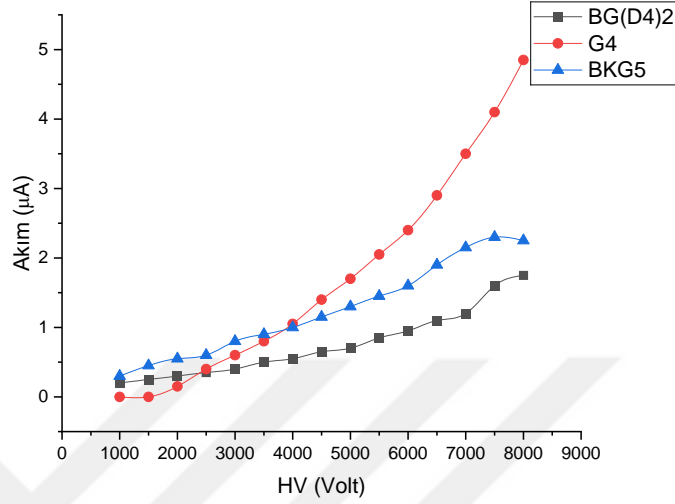
Aşağıdaki grafiklerde grafit kaplama, bakır+grafit kaplama ve bor karbür+grafit kaplamaların akım -voltage grafikleri karşılaştırılmıştır:



Şekil 5.1. Yalnız grafit(a), bakır+ grafit(b) ve bor karbür+ grafit(c) kaplamaların karşılaştırmalı akım -voltage grafikleri

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi, kaçak akım yüksek voltajlara çıkıldıkça değeri nispeten artmıştır. RPC detektörlerde kaçak akımın kontrollü artışı sağlanmalıdır. Çünkü bu artış aynı zamanda detektörün çalışma voltajının belirlenmesinde önemli rol oynar. Grafikler incelendiğinde, genel olarak grafit kaplamaların voltaj değişimine bağlı olarak diğerlerine göre daha fazla kaçak akım oluşturduğu gözlenmiştir. Bu durumdan diğer kaplama çeşitlerinin akım geçişini daha çok kontrol edebildiği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca grafit kaplamalarda G4'ün, bakır+ grafit kaplamalarda BG(D4)2'nin ve bor karbür kaplamalarda BKG5'in voltaja bağlı artışının çok daha az

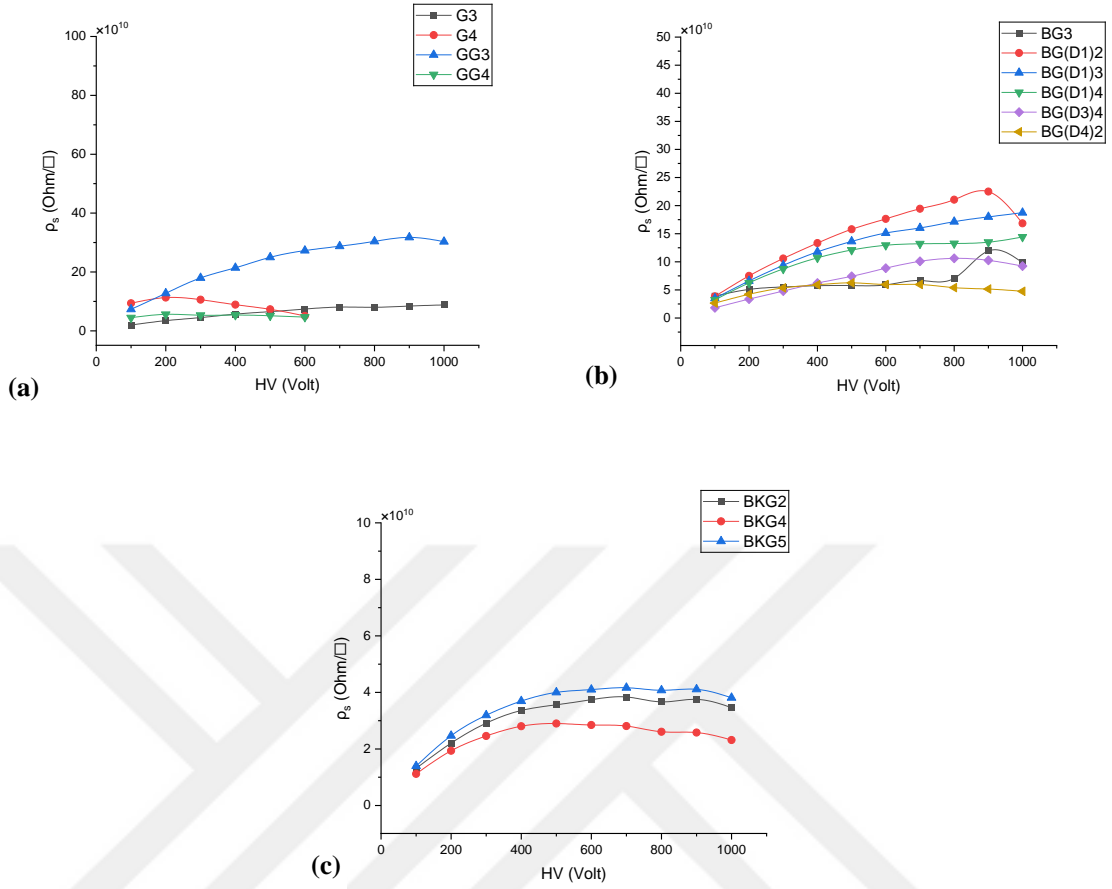
olduğu görülmektedir. Adı geçen kaplama çeşitlerinin akım-voltaj grafikleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir:



Şekil 5.2. Her kaplama çeşidinden bir örnek için akım- voltaj karşılaştırması

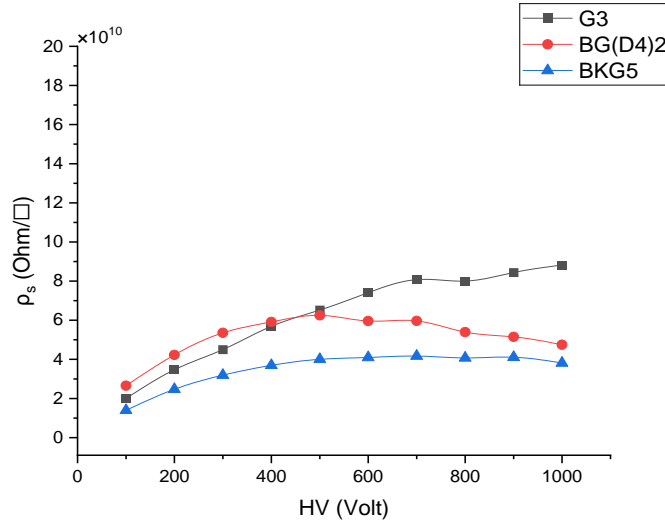
Şekil 5.2'deki grafikte görüldüğü gibi BKG5 ve BG(D4)2 kaplamalarında kaçak akım voltaja bağlı olarak daha az eğim göstermiştir.

Bu tez çalışmasında oluşturulan kaplamalı elektrotların yüzey özdirenç değerleri incelendiğinde, grafit kaplamalı elektrotlar için yüzey özdirenç değerleri $0,45 \times 10^{11} - 3 \times 10^{11} \text{ Ohm}/\square$ aralığında, bakır + grafit kaplamalı elektrotlar için $0,5 \times 10^{11} - 2 \times 10^{11} \text{ Ohm}/\square$ aralığında, bor karbür + grafit kaplamalı elektrotlar için ise $0,2 \times 10^{11} - 0,3 \times 10^{11} \text{ Ohm}/\square$ aralığında ölçülmüştür. Her bir kaplama için yüzey özdirençlerinin voltaja bağlı değişimleri Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Yalnız grafit(a), bakır+ grafit(b) ve bor karbür+ grafit(c) kaplamaların karşılaştırmalı yüzeysel özdirenç -voltaj grafikleri

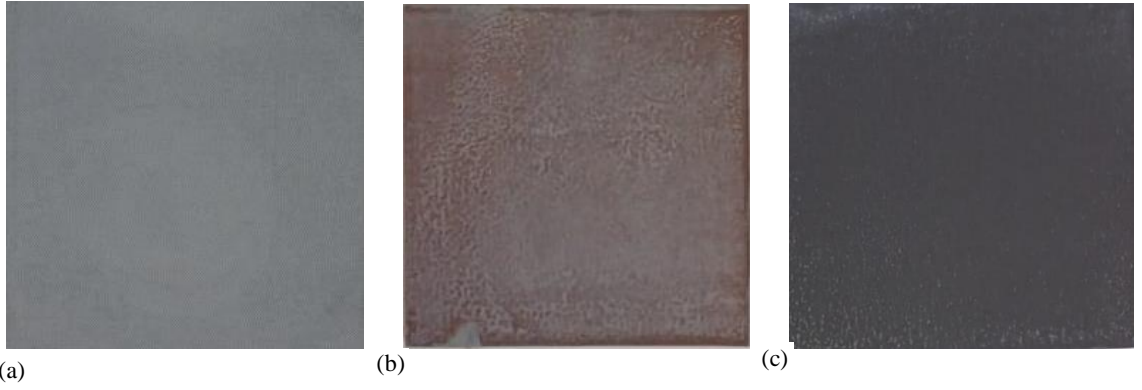
Yüzeysel özdirençlerinin düşük olması, yüksek dirençli elektrotta indüklenen yükün elektrot yüzeyine düzgün dağılımını sağlarken alan yükü etkisini en aza indirir. Böylece yüzey üzerine dağılan yük sinyal okuma şeritlerine hızlı bir şekilde aktarılabilir. Bu yüzden RPC için yüzey özdirenç değeri düşük olan elektrotlar seçilmelidir. Şekil 5.3.'e göre her kaplama çeşidinden en düşük değerde olanlar seçilerek Şekil 5.4'te karşılaştırılmıştır:



Şekil 5.4. Her kaplama çeşidinden bir örnek için yüzeysel özdirenç- voltaj karşılaştırması

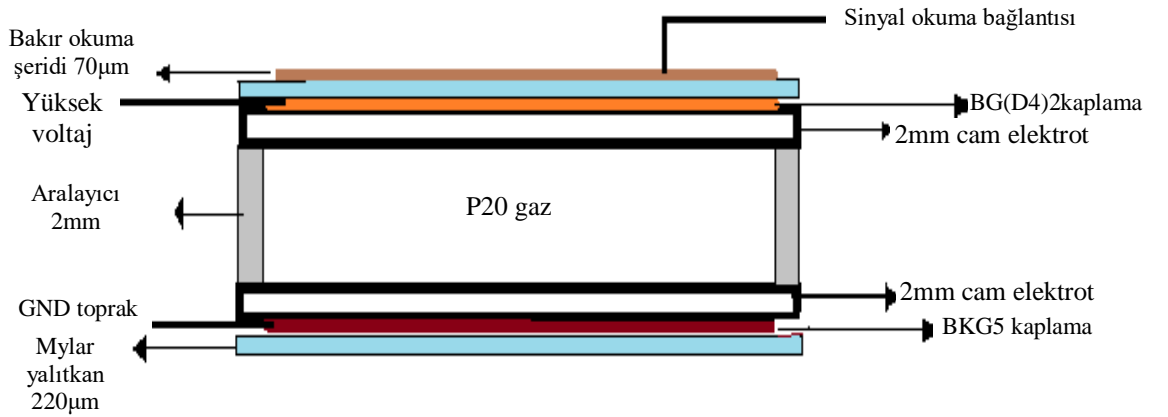
Şekil 5.4.'te görüldüğü gibi yüzeysel özdirenci küçük değerler alan iki elektrot BKG5 ve BG(D4)2 kodlu elektrotlardır.

Elektrot kaplamaların yüzey üzerine homojen dağılımının sağlanması, dolayısıyla yüzey direncinin de yakın değerde olmasını sağlar. Bu sonuç, alınan sinyalin kalitesini etkiler. Yüzey direnç haritalarında görüldüğü gibi serigrafı boyama tekniğinde boya ile iletken tozun cam yüzeye aktarılması kaplamanın yüzeye homojen dağılmasında etkili bir yöntem olmuştur. Aynı zamanda diğer kaplama yöntemlerine göre, ölçümler sırasında çizilme, silinme gibi etkilere karşı daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Özellikle grafitte bakır veya bor karbür eklendiğinde yalnız grafitte göre daha dayanıklı elektrotlar elde edilmiştir. Aşağıda her kaplama çeşidinden bir örneğe ait fotoğraf gösterilmiştir:

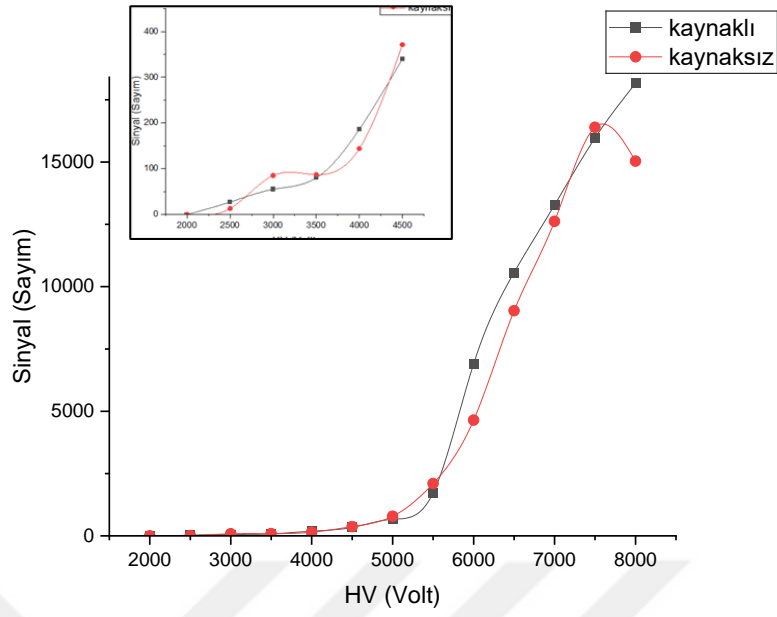


Şekil 5.5. Bazı kaplamalara ait fotoğraflar. Yalnız grafit kaplama (a), bakır+ grafit kaplama (b), bor karbür+ grafit kaplama (c)

Yukarıda detayları verilen sonuçlara bağlı olarak yüzey dirençleri 1-4Mohm aralığında olan BG(D4)2 ve BKG5 kodlu elektrotlar kullanılarak, aşağıda şematik olarak gösterilen bir RPC prototipi oluşturuldu. Öncelikle elektrotlar temizlenerek hazırlandı. Gaz karışımı olarak p20(%80Ar+ %20CH₄) gazı, aralayıcı olarak 2mm kalınlıklı polikarbon malzeme kullanıldı. CAEN1482 güç kaynağı ile 2000V'tan 8000V'a kadar 500'er volt artırılarak sinyal sayımları yapıldı. Veriler Cs-137 kaynağı kullanılarak ve kaynaksız olarak alındı. Veri sonuçlarına göre, Şekil 5.7'de gösterilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Kurulan RPC detektörün şematik gösterimi



Yatay: 20ms

Düşey: 1V

Şekil 5.7. RPC detektöründen alınan voltaja bağlı sinyal sayımı ve örnek pik görüntüsü

Şekil 5.7.'de ve grafik üzerine büyütülmüş olarak verilen grafikte de görüldüğü gibi 2000V'tan daha yüksek voltajlarda sinyal alınmaya başlanmıştır. 4500 -5000V'a kadar orantılı sayaçlarda görülen orantılı bölge, 5000V'tan sonrası sınırlı orantılı bölge olarak değerlendirilebilir. Cs-137 kaynaklı ölçümlerde 2000V'tan itibaren sinyal alınırken, kaynaksız ölçümlerde ~ 2400V'tan itibaren sinyal alınmaya başlanmıştır. Ayrıca kaynaklı ölçümlerde kaynaksız ölçümlere göre genel olarak daha fazla sinyal alındığı görülmüştür. Sinyal görüntüsünde 20ms'den daha kısa süre aralıklarla oluşan, ~2,5V ve ~ 1,5V'luk iki pik görülmektedir.

Literatürde bir elektrot yüksek dirençli, diğeri metal elektrot olarak tasarlanmış hibrit RPC'ler bulunmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan RPC prototipinde kullanılan elektrotlar da biri bakır +grafit kaplamalı diğeri bor karbür +grafit kaplamalı olarak seçilmiştir. Bu durumda detektör prototipi hibrit olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmanın değerlendirilmesinde ve yapılacak benzer çalışmalarda aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

Serigrafi uygulanırken boyaya eklenen mikron boyuttaki iletken toz ipek kumaşın dokuma aralığından geçebilecek boyutlarda olmalıdır. Piyasada, mikron tozları genellikle tek bir boyutta değil, 0 -75µm gibi belirli bir değer aralığında satışı yapılmaktadır. Dolayısıyla dokuma aralığından daha büyük boyutlar dokumadan geçemediği gibi baskı esnasında geçebilecek boyuttakilerin de geçmesini engelleyebilir. Bu durum yüzeye geçen boya – toz oranını etkileyebilir. Ayrıca az da olsa boyuttaki farklılıklar yüzey homojenliğini bozabilir.

Bu çalışmada hazırlanan boya karışımları kütlece oranlarına göre hazırlandı. Toz taneciklerinin boya ile dokumadan geçeceği, yüzey üzerinde ince bir kat oluşturan boyanın içindeki her toz tanesinin birbiri ile yük iletimi sağlayacak kadar yakın olması gerektiği göz önünde bulundurulursa hacimce oranlarına bakılarak değerlendirmeler yapılabilir.

Yapılacak ölçümlerin hassasiyetini artırmak için sistemde kullanılan elektronikte iyileştirmeler yapılabilir. Ayrıca ölçümlerin her ne kadar oda sıcaklığında yapılmasına dikkat edilse de küçük sıcaklık farklarının sonuçları etkileyebileceği dikkate alınmalıdır. Odadaki nem oranı da boyanın kuruma süresi için etkili bir faktördür. Güne bağlı yüzey direnç ölçümlerinde bu etki görülebilir.

KAYNAKLAR

Abbrescia, M., Peskov, V., and Fonte, P. (2018). Resistive Gaseous Detectors Designs, Performance, and Perspectives. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 381 ss.

Aielli, G., Alunno Camelia, E., Bruno, S., Caltabiano, A., Cardarelli, R., Massa, L., Pizzimento, L., Rocchi, A. (2018). Optimisation Of Large-Size Precise Space-Resolution Rpc Structures. Advanced European Infrastructures for Detectors at Accelerators Horizon 2020 Research Infrastructures project AIDA-2020 Consortium

Akkaya Arıer, Ü. Ö. (2007). Relation Of The Optical And Electrical Parameters With Process Parameters In Transparent Conductor Coatings. Journal of Engineering and Natural Sciences. Vol. 4 Sayı 1. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi. İstanbul. s. 32-47

Aprile, E., Bolotnikov, A., Bolozdynya, A., Doke T. (2006). Noble Gas Detectors. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. Erişim adresi: <http://dnb.d-nb.de>

Cardoso, P. A. G. (2014). Instrumentation and testing of RPC (Resistive Plate Chamber) detectors in the Pierre Auger collaboration. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Engineering Physics. Tecnico Lisboa, 58 ss.

Chakraborty, S. (2018). Development of Resistive Plate Chamber (RPC) for CBM Muon Chamber. Yüksek Lisans Tezi. Bose Enstitüsü

Colafranceschi, S. (2022). Construction of an RPC using additive manufacturing technology. International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics. doi:10.1088/1742-6596/2374/1/012139

Dey, T., Mukhopadhyay, S., Chattopadhyay, S. (2021). Numerical study of effects of electrode parameters and image charge on the electric field configuration of RPCs. Prepared for submission to JINST. doi:10.1088/1748-0221/17/04/P04015

Fonte, P. (2000). Applications and New Developments in Resistive Plate Chambers. ISEC and LIP, Coimbra University, Coimbra P-3000, Portugal. CERN/P/FIS/40111/2000

Garcia, A. L. (2014). Timing Resistive Plate Chambers with Ceramic Electrodes for Particle and Nuclear Physics Experiments. Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Almanya.

Griffiths, D. (1987). Introduction to Elementary Particles. John Wiley & Sons, Inc. United States of America.

Grupen, C. Shwartz, B. (2008). Particle Detectors. Cambridge University Press,

<https://home.cern/science/physics/standard-model>. Erişim tarihi:10.09.2022

Johnson, N., Wehr, G., Hoar, E., Xian, S., Akgun, U., Feller, S., Affatigato, M., Repond, J., Xia, Lei., Bilki, B., Onel, Y. (2015). Electronically Conductive Vanadate Glasses for Resistive Plate Chamber Particle Detectors. *International Journal of Applied Glass Science*, 6 [1] 26–33. doi:10.1111/ijag.12109

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc. Amerika

Kumagaia, M., Abea, K., Hoshia, Y., Neichib, K., Takahashia, T., Yamaguchic, A., Yutad, H. (2004). Quenching properties of gas mixture in glass RPC operated with streamer mode. doi: 10.1016/j.nima.2004.07.033

Leo, W. R. (1948). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. doi: 10.1007/978-3-642-57920-2

Lippmann, C. (2003). *Detector Physics of Resistive Plate Chambers*. (CERN-THESIS-2003-035) Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi, Cenevre, İsviçre

Manisha, Bhatnagar, V., Shahi, J.S. (2016). Study Of Glass And Bakelite Properties As Electrodes In Resistive Plate Chambers (RPCs). *J Integr Sci Technol*, 2016, 4(1), 21-24. Department of Physics, Panjab University, Chandigarh-160014, India. Erişim adresi: <http://pubs.iscience.in/jist>

Meghna, K.K., Banerjee, A., Biswas, S., Bhattacharya, S., Bose, S., Chattopadhyay, S., Das, G., Marick, C., Saha S., Viyogi, Y. P. (2012). Measurement of electrical properties of electrode materials for the bakelite Resistive Plate Chambers. Published By IOP Publishing For Sissa Medialab. doi:10.1088/1748-0221/7/10/P10003

Nagashima, Y. (2009). *Elementary Particle Physics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 62 s. Chicago, 3,23,378-413 s.

Naimuddin, Md., Kaur, D., Kumar, P., Gaur, A., Kumar, P., Hasbuddin, Md., Mishra, S., Kumar. A. (2014). Characterisation of Glass Electrodes and RPC Detectors for INO – ICAL Experiment. Department of Physics & Astrophysics, University of Delhi, India. doi:10.1088/1748-0221/9/10/C10039

Nappi, E., Peskov, V. (2013). *Imaging Gaseous Detectors and Their Applications*. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 348 pp.

Raveendrababua, K., Beheraa , P. K., Satyanarayanab, B., Sadiqa, J. (2016). Study of glass properties as electrode for RPC. *Journal of Instrumentation* 11(07) doi:10.1088/1748-0221/11/07/C07007

Sauli, F. (1977). Principles Of Operation Of Multiwire Proportional And Drift Chambers. Lectures given in the Academic Training Programme of CERN. Geneva : CERN, 92 p. doi: 10.5170/CERN-1977-009

Şahin, R. (2009). Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu Ve Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items>

Şenel, A. (1996). Mobilya Endüstrisinde Kullanılan Lamine ve Laminatlı Malzemeler. Gazi Üniversitesi End. San. Eğt. Fak. Dergisi, (4): 187-189

Thoker, S.H., Satyanarayana, B., Shinde R.R., Majumder G., Bari, W. t.y. Study on RPC Charge dispersion as a funtion of Surface Resistivity. Mumbai. Erişim adresi: www.ino.tifr.res.in

Tosun, M., Bilki, B., Sahbaz, K. K. (2023). Development of Hybrid Resistive Plate Chambers. Preprint submitted to Nucl. Inst. and Meth. arXiv:2211.13796v2 [physics.ins-det]

Tsompopoulou, E., Mergia, K. (2019). Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy and Applications in Material Science. HNPS Advances in Nuclear Physics, 21, 145–147. <https://doi.org/10.12681/hnps.2020>