

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

LABORATUVAR TİPİ İNCE TABAKA RADYO KROMATOGRAFI SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Fatih SEZER

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fazilet Zümrüt BİBER MÜFTÜLER

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Coşkun HARMANŞAH

Nükleer Bilimler Anabilim

Nükleer Uygulamalar Tezli Yüksek Lisans Programı

İZMİR

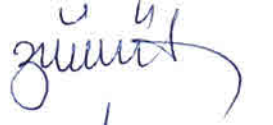
2019

Fatih SEZER tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan **“LABORATUVAR TİPİ İNCE TABAKA RADYO KROMATOĞRAFİ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ”** başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 11.06.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

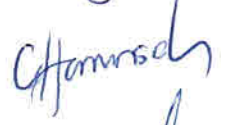
Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Fazilet Zümrüt BİBER MÜFTÜLER



Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Coşkun HARMANŞAH



Üye : Doç. Dr. Özge ŞAHİN CİHANBEĞENDİ



Üye : Doç.Dr. Emin İlker MEDİNE



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÖZTÜRK



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“GM Dedektör Sayım Sistemi Geliştirilmesi Ve Laboratuvar Tipi İnce Tabaka Radyo Kromatografi (TLRC) Sistemi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

29/ 04/ 2019

Fatih SEZER



ÖZET**LABORATUVAR TİPİ İNCE TABAKA RADYO
KROMATOĞRAFİ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

SEZER, Fatih

Yüksek Lisans Tezi, Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fazilet Zümrüt BİBER MÜFTÜLER
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Coşkun HARMANŞAH

Nisan 2019

İnce Tabaka Radyo Kromatografi (Thin Layer Radio Chromatography TLRC) radyoaktif bir bileşen içeren bileşiklerin (radyoişaretli bileşik ve/veya radyofarmasötik) kalite kontrolünde yaygın olarak kullanılan kromatografik yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, nükleer uygulamalar laboratuvarlarında, radyoişaretli bileşik ve/veya radyofarmasötik hazırlamada kalite kontrol işlemleri için açık kaynak donanım platformu Arduino kullanılarak laboratuvar tipi düşük maliyetli bir radyasyon ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen TLRC tarayıcı GM dedektör sayım sistemi ve kontrol modülünden oluşmaktadır.

Teknesyum-99m (^{99m}Tc) ve İyot-131 (^{131}I) radyonüklidleri kullanılarak geliştirilen sistemin test ölçümleri yapılmış ve sonuçlar ticari TLRC tarayıcı cihaz ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçları geliştirilen TLRC tarayıcı sistemin radiofarmasötik saflık testi için uygun olduğunu ve yeterli performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar sözcükler: İnce Tabaka Radyo Kromatografisi (TLRC), Geiger-Muller Dedektör, Gama Radyasyonu, Arduino kodlama.



ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A LABORATORY TYPE THIN LAYER RADIO CHROMATOGRAPHY SYSTEM

SEZER, Fatih

MSc in Nuclear Science.

M.Sc. in Nuclear Application Department

Supervisor: Prof. Dr. Fazilet Zümrüt BİBER MÜFTÜLER

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Coşkun HARMANŞAH

April 2019

Thin Layer Radio Chromatography (TLRC) is one of the common chromatographic method used in the quality control of substances containing a radioactive component. In current study, it is developed a cost-effective TLRC scanner using open source hardware Arduino for quality control processes of radiolabeled compounds and/or radiopharmaceuticals in Nuclear Applications Laboratories. The developed laboratory type TLRC scanner is composed of two modules: Geiger-Muller counter and control module.

Technetium-99m (^{99m}Tc) and Iodine-131 (^{131}I) radionuclides were used to test the TLRC scanner and the results were compared with the commercial TLRC scanner device. The test results showed that the developed TLRC scanner system was suitable for radio-pharmaceutical purity testing and had sufficient performance.

Keywords: Thin Layer Radio Chromatography (TLRC), Geiger Muller detector, Gamma radiation, Arduino, Arduino Coding.



ÖNSÖZ

Laboratuvarlarda kullanılan cihazların genellikle yurt dışından temin ediliyor olması ve bu tür cihazların ülkemizde de üretilebilir olmasındaki hassasiyetim, tez çalışmamın konusunu belirlemede etkili olmuştur. Bu sebeple tez çalışmam nükleer kimya laboratuvarlarında kullanılan cihazlardan biri olan, TLRC Tarayıcı cihazı üzerine olmuştur.

Bu tez çalışması sırasındaki kazanımlarım; Radyasyon dedektörleri üzerine bilgilerimi pekiştirmemi, mikrodenetleyici programlama ve çalışma mantığını kavramamı ve ayrıca adım motorları, üç boyutlu yazıcı mekaniği ve nükleer kimya üzerine genel bilgi edinmemi sağlamıştır.

İZMİR

29/04/2019

Fatih SEZER



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Kromatografik Yöntemler.....	6
2.1.1 İnce tabaka kromatografisi (TLC).....	7
2.1.2 İnce tabaka radyo kromatografisi (TLRC).....	9
2.1.3 Teknesyum-99m (^{99m} Tc) özellikleri.....	10
2.1.4 İyot-131 (¹³¹ I) özellikleri.....	12
2.1.5 İnce Tabaka Radyo Kromatografi (TLRC) tarayıcı cihazı.....	12
2.2 Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri.....	13
2.2.1 Dedektör verimliliği.....	16
2.3 Gazlı Detektörler.....	17
2.3.1 İyonizasyon Odaları.....	19
2.3.2 Orantılı sayaçlar.....	20
2.3.3 Geiger-Muller sayacı (GM).....	22
2.3.4 GM tüp tasarımları.....	25
2.4 Sintilasyon Dedektörleri.....	27
2.4.1 İnorganik (kristal) sintilatörler.....	27

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.2 Fotoçoğaltıcı tüp (PMT).....	28
2.5 Yarı İletken Detektörler.....	29
2.6. Mikrodenetleyiciler.....	32
2.6.1 Arduino Mega 2560.....	33
2.7 Adım (Step) Motoru.....	34
2.7.1 Adım motor kontrolünde kullanılan terimler.....	35
2.7.2 Adım motor çeşitleri ve uyarım teknikleri.....	37
2.7.3 Adım motoru sürme teknikleri.....	38
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	40
3.1 Laboratuvar tipi TLRC Tarayıcı Tasarımı.....	40
3.1.1 TLRC Tarayıcı mekanik sistemi.....	42
3.1.2 Adım motoru ve sürücü kartı.....	43
3.2 TLRC Tarayıcı Sistem Yazılımı.....	45
3.2.1 Motor sürücü kontrolü.....	47
3.2.2 Radyasyon sayımı.....	49
3.3 GM Sayıcı ve Çevre Birimleri.....	50
3.3.1 Ön Yükselteç.....	50
3.3.2 Yüksek gerilim devresi.....	52
3.3.3 Arduino Mega 2560 kart bağlantıları.....	54
3.4 Kolimatör.....	55
3.4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kolimatörler.....	56
3.5 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Radyoışaretli Örnekler.....	57
3.6 TLRC Tarama Parametreleri.....	57
4 BULGULAR.....	60

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1 Kolimatör-A1 ve A2 ile yapılan deneysel çalışmalar.....	60
4.1.1 Yük. ¹³¹ I ile yapılan deneysel çalışmalar.....	60
4.1.2 ¹³¹ I-A ile yapılan deneysel çalışmalar.....	61
4.1.3 ⁹⁹ mTc-1 ile yapılan deneysel çalışmalar.....	62
4.2 Kolimatör-B İle Yapılan Deneyle.....	63
4.2.1 ¹³¹ I örneği ile yapılan kolimatör testi	63
4.2.2 ⁹⁹ mTc-2 örneği ile yapılan kolimatör testi	63
4.2.3 ^{99m} Tc-3 örneği ile farklı çözünürlüklerde yapılan deneyler	64
4.2.4 ¹³¹ I-B örneği ile yapılan deneyler	66
4.2.5 ¹³¹ I-2 örneği ile yapılan diğer deneysel çalışmalar.....	66
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	68
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	70
TEŞEKKÜR.....	77
ÖZ GEÇMİŞ.....	78
EKLER.....

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Radyasyon Çeşitleri.....	4
Şekil 2.2 Rf değerinin bulunması.....	8
Şekil 2.3 TLRC uygulama yöntemi.....	10
Şekil 2.3 Tc-99m bozunum şeması.....	11
Şekil 2.4 İyot-131 bozunum şeması.....	12
Şekil 2.5 TLRC tarayıcı cihaz örnekleri.....	13
Şekil 2.6 Dedektör çalışma modları.....	15
Şekil 2.7 RC zaman sabiti.....	16
Şekil 2.8 Dairesel pencerele bir detektör için katı açısı ($d \gg a$).....	17
Şekil 2.9 Gazlı dedektörlerin çalışma prensibi.....	18
Şekil 2.10 Toplanan iyon sayısı ve uygulanan elektrik alan arasındaki ilişki.....	19
Şekil 2.11 Silindir yapıdaki dedektörde bir iyon çifti tarafından tetiklenen çığ.....	21
Şekil 2.12 GM tüpünde çığ oluşumu.....	23
Şekil 2.13 GM dedektöründe ölü zaman ve pals oluşumu.....	24
Şekil 2.14 GM platosu.....	25
Şekil 2.15 Silindirik yapıdaki GM tüp kesit görünümü	26
Şekil 2.16 End window ve pancake tipi Geiger tüpleri.....	26
Şekil 2.14 (NaI(Tl)) kristal sintilatör dedektörünün çalışma prensibi.....	29
Şekil 2.18 Yarı iletken dedektör.....	30
Şekil 2.19 Arduino Mega 2560 kartı.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sayfa

Şekil 2.20 90° adım açısına sahip bir motorun, yarım adım (half-step) modu ile 45° lik adım atması.....	38
Şekil 2.21 Adım motor sürme teknikleri, a) bipolar, b) unipolar.....	40
Şekil 3.1 Tez kapsamında geliştirilen TLRC Tarayıcı sistemin görünümü.....	41
Şekil 3.2 Tarama işlemi sonunda Arduino IDE seri port ekranı.....	41
Şekil 3.3 TLRC-Tarayıcı sistemin blok gösterimi.....	42
Şekil 3.4 Tarayıcı ray seti ve vidalı mil bağlantısı.....	43
Şekil 3.5 17HS2408S Adım motoru ve sargı bağlantısı.....	43
Şekil 3.5 Motor sürücü kartının bağlantı şeması.....	45
Şekil 3.6 TLRC Tarayıcı sistemin radyoışaretleli şeridi okuma prosesi.....	46
Şekil 3.7 TLRC yazılımı akış diyagramı.....	47
Şekil 3.8 Tarama hızı ve çözünürlük işlem kodları.....	49
Şekil 3.9 Dış kesme işlemi kod satırları.....	50
Şekil 3.10 Ön yükselteç devresi.....	51
Şekil 3.11 a, b Önyükselteç giriş ve çıkış sinyalleri.....	52
Şekil 3.12 Yüksek gerilim devresi.....	53
Şekil 3.13 Tez kapsamında geliştirilen Yüksek gerilim kaynağı.....	53
Şekil 3.14 a) Arduino Mega kartı ve diğer bileşenlerin arasındaki devre bağlantı şeması b) Tarayıcı sistemi oluşturan bileşenler.....	54
Şekil 3.15 Kolimatörün a) kesit görünümü b) perspektif görünümü.....	55
Şekil 3.16 Kolimatör-A1 ve A2 numaralı yarıklar.....	56
Şekil 3.17 Tez kapsamında hazırlanan Kolimatör-B.....	56
Şekil 3.18 Tarayıcı sistemdeki tarama parametreleri.....	58
Şekil 3.19 BIOSCAN AR-2000 radio-TLC Imaging Scanner.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sayfa

Şekil 3.20 TLRC Tarayıcı sistem deney düzeneği.....	59
Şekil 4.1 ¹³¹ I bileşiğinin Kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, çöz: 1mm).....	60
Şekil 4.2 Yük. ¹³¹ I bileşiğinin Kolimatör-A2 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, çöz: 1mm).....	61
Şekil 4. 3 Düşük aktiviteli ¹³¹ I-A bileşiğinin Kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız:1 mm/s, çöz: 1 mm).....	61
Şekil 4.4 Düşük aktiviteli ¹³¹ I-A örneğinin, kolimatör-A2 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, çöz: 1mm).....	62
Şekil 4.5 ^{99m} Tc-1 örneğinin kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, Çöz: 1mm).....	62
Şekil 4.6 Kolimatör-B ile alınan kromatogram (Hız:1mm/s, çöz: 1mm).....	63
Şekil 4.7 Kolimatör-B ile alınan kromatogram (Hız:1mm/s, çöz: 1mm).....	64
Şekil 4.8 Kolimatör-B ile 0,5 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s).....	64
Şekil 4.9 Kolimatör-B ile 1 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s).....	65
Şekil 4.10 Kolimatör-B ile 1,5 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s).....	65
Şekil 4.11 Kolimatör-B ile 0,66 mm/s yürüme hızı ile alınan kromatogram (Çöz: 1,5 mm).....	66
Şekil 4.12 ¹³¹ I-2 bileşiğine ait kromatogramlar (Hız: 1mm/s, çöz:1 mm).....	67



TABLolar DİZİNİ**Sayfa**

Tablo 2.1 Detektör çeşitleri ve özellikleri.....	32
Tablo 2.2 ATmega 2560 kartının genel özellikleri.....	33
Tablo 3.1 17HS2408S özellikleri.....	44
Tablo 3.2 A4988 adım motor sürücü kartı özellikleri.....	44
Tablo 3.3 Mikro adımlama kontrol tablosu (Pololu, 2018).....	44
Tablo 3.4 Kolimatörler ve radyo bileşenler ile yapılan deneyler.....	57



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
TLC	: İnce Tabaka Kromatografisi
GC	: Gaz Kromatografisi
HPLC	: Yüksek Basıncılı Sıvı Kromatografisi
TLRC	: İnce Tabaka Radyo Kromatografisi
SFC	: Süperkritik akışkan kromatografisi
M	: Gazlı dedektörlerde gaz çarpım (yükseltme) faktörü
P-10	: Orantılı dedektör gazı (%90Argon+%10Metan)
CH ₄	: Metan
NaI(Tl)	: Talyum katkılı Sodyum İyodür kristali
CsI(Tl)	: Talyum katkılı Sezyum İyodür kristali
nm	: nanometre
PMT	: Foto çoğaltıcı tüp
MCA	: Çok kanallı analizör
Si(Li)	: Lityum katkılı Silisyum
Ge(Li)	: Lityum katkılı Germanyum
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
Ci	: Radyasyon aktivite birimi (Curie: 3.7×10^{10} Bozunma/s)

Kısaltmalar

Çöz : Tarayıcı çözünürlüğü (TLRC şeridinde sayım alınan en küçük kesit genişliği)

R_f : Alıkonma değeri



1.GİRİŞ

Radyasyon, kararsız çekirdeklerin kararlı hale geçişleri sırasında yayılan enerji olarak tanımlanmaktadır. Bu sırada çevreye parçacıklar (α (alfa), β (beta) veya elektromanyetik dalga γ (gama) vb.) olarak yayınımlar gerçekleşmektedir (TAEK, 2009). Kütle ve enerjiye sahip radyasyona parçacık tipi radyasyon, kütsüz belirli bir enerjiye sahip radyasyona ise elektromanyetik dalga adı verilmektedir. Çevremizdeki radyasyonun kaynağı doğal ve yapay olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Doğal radyasyonun bir kısmı kozmik ışımalardan gelmekte ise de büyük oranda yeryüzü kaynaklıdır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak doğal radyasyon kaynaklarının kullanımının yanısıra yapay radyasyon kaynakları üretimi hızla artmıştır. Yapay radyasyon kaynaklarının tıbbi ve endüstriyel amaçlı ışınlamalar için kullanımı hızla artmaktadır.

Radyasyonun türü, enerjisi ve madde tarafından soğurulan miktarı gibi özelliklerini ölçmek için yapılan işlemlere radyasyon ölçümü denilmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş ölçüm sistemlerine genel dedektör adı verilmektedir. Radyasyon ölçümü radyasyon ile maddenin etkileşmesi esasına dayanmakta olup, radyasyona duyarlı ölçüm sistemleri (dedektör) ile gerçekleştirilmektedir. Radyasyon dedektörü tarafından doğrudan veya dolaylı olarak algılanan radyasyon elektrik sinyallerine dönüştürülür ve çeşitli sinyal işleme devreleri aracılığı ile radyasyonun türü, şiddeti ve enerjisi ölçülmektedir.

Radyasyon dedektörlerinde yüklü parçacıkların sayımı için yapılan ilk denemeler 1900 yılların başlarında Rutherford ve Geiger tarafından gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sayıcı düzeneği ile alfa ışınları sayılmış ve benzer çalışma prensibine uygun olarak Geiger-Müller sayıcıları yapılmıştır. Daha sonra, nükleer bilimler alanında yürütülen çalışmalarda ihtiyaç duyulan farklı tip ve enerjideki radyasyonun ölçülmesi için sintilasyon ve yarı iletken dedektör sistemleri geliştirilmiştir. Böylece yüksek verimli ve uygun çözüme gücüne sahip radyasyon ölçme sistemleri üretilmiştir.

Günümüzde, araştırma, geliştirme ve endüstriyel uygulamalarda; Gazlı, sintilasyon ve yarı iletken dedektörleri ile doz hızı ölçümleri yapılmaktadır. Özellikle çevresel ve alan doz hızı ölçümlerinde gaz dedektörlerinden birisi olan Geiger-Muller (GM) dedektörü yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang et al., 2018; Knoll, 2000). GM sayacı, gama doz oranını izlenmesinde (Watanabe, 1999), uygun, basit, ekonomik ve birçok avantaja sahiptir (Yousaf et al., 2015;

Pilakouta et al., 2016). Literatüre göre GM dedektörü, çevre ve alan doz hızı ölçümleri dışında doğal radyoaktivite ölçümünde (Pilakouta et al., 2016), beta bozumuna ilişkin çalışmalarda (Ware et al., 2015), radyofarmasi laboratuvarları kalite kontrol işlemlerinde, kromatografik sistemlerde (Jeon et al., 2017), nükleer tıp ve radyasyon onkoloji bölümlerinde kullanıp alanına sahiptir. Ayrıca GM dedektörlerinin alana ve sahaya özgü uygulamalarına yönelik patentler (Koltic et al., 2008) bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasının hedeflerinden birisi olan İnce Tabaka Radyo Kromatografi (TLRC) sistemlerinde radyoaktif bir bileşenin yaydığı gama radyasyonunun pozisyona bağlı olarak ölçülmesi amacıyla farklı dedektör tiplerini kullanmaktadır (Jeon et al., 2017).

Radyoaktif bileşiklerin (radyoişaretli bileşik ve/veya radyofarmasötik) kalite kontrolünde yaygın olarak kullanılan kromatografik yöntemlerden biri de Thin Layer Radio Chromatography (TLRC) yöntemidir.

TLRC tarayıcı sistemler radyoaktif bir bileşenin yaydığı gama radyasyonunun pozisyona bağlı olarak ölçülmesi amacıyla farklı dedektör tiplerini kullanmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan TLRC tarayıcılarında yaygın olarak orantılı sayaçlar (Jeon et al., 2017) ya da sintilasyon dedektörleri tercih edilmektedir. Ancak orantılı sayaçların gaz yenilenme gerekliliği ve sintilasyon dedektörlerinin de yüksek maliyetli olmasından dolayı, alternatif dedektörlerin kullanılabilirliği kapsamında, GM dedektörlerine de yönelik araştırmalar bulunmaktadır (Roberts, 2000; Jeon et al., 2017).

Literatürde farklı tip radyasyon ölçme sistemlerine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Bayburt ve Bayburt, 2008; 2010; Azooz, 2009; Nazrul Islam ve ark. 2012; Ishigaki ve ark., 2013;).

Tez kapsamında radyoişaretli bileşik ve/veya radyofarmasötik hazırlamada kalite kontrol işlemlerinde kullanılmak üzere, açık kaynak platformu olan Arduino kullanılarak prototip laboratuvar tipi bir radyasyon ölçüm sistemi (TLRC Tarayıcı) geliştirilmiştir. Çalışmanın önemli hedeflerinden birisi de deneysel araştırmalarda farklı düzeneklerle kullanılacak basit ve ekonomik bir çözüm sunabilmesidir.

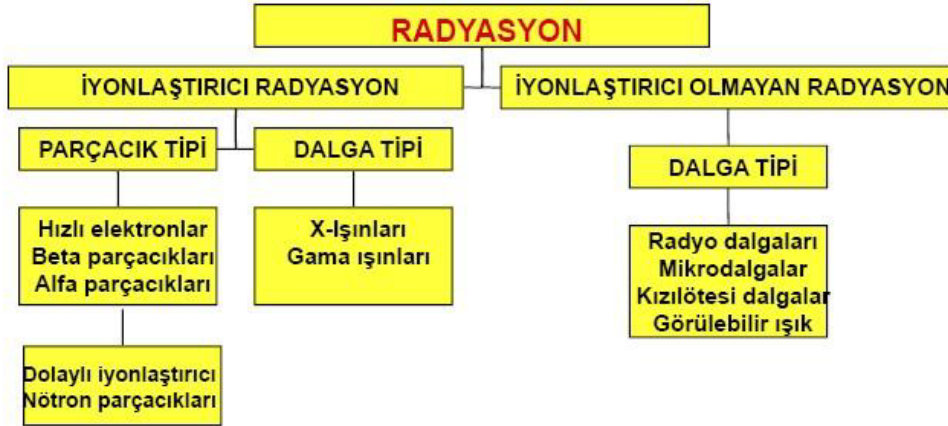
Bu alanda kullanılan TLRC tarayıcı sistemleri ve ekipmanlarının çoğunlukla yurt dışı satın alınma yoluyla temin edilmesi araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin katma değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda çalışmanın diğer önemli kazanımı da TLRC okuyucu sistemlerinin yurt içi imkânlarla yapılabilmesine yönelik AR-GE faaliyetleri için ihtiyaç duyulan ulusal veri bilgi tabanına ve bilimsel literatüre katkı sağlamasıdır.



2.GENEL BİLGİLER

Doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale geçişleri sırasında yaptığı parçacık ve/veya elektromanyetik dalga niteliğindeki salınımlar sonucu yayınlanan radyasyon doğal ve yapay olmak üzere iki grupta değerlendirilir. Çevremizdeki doğal veya yapay radyasyonu iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Radyasyon kararlı durumdaki atomun elektronları ile etkileştiğinde elektronlardan birisi koparırsa atom iyonize olur. Bu durumda negatif yüklü elektron yörüngeden ayrıldığı için atom pozitif yüklü iyon haline dönüşür. İyonize olmayan radyasyon madde ile etkileşiminde iyonize edebilecek düzeyde enerjiye sahip olmayan, ancak atomik yörünge elektronlarında değişim yapabilen radyasyondur. Elektromanyetik spektrumun dalga boyu 10 nm' den daha uzun olan, morötesi, görünür ışık, kızılötesi, mikrodalgalar ve radyo dalgaları iyonize olmayan radyasyon olarak adlandırılmaktadır.

Radyasyon madde ile etkileştiğinde elektrik yüklü parçacıklar veya iyonlar oluşturan X-ışınları ile radyoaktif maddelerden yayılan α (alfa), β (beta), ve γ (gama) ışınları gibi radyasyonlar iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanır. Burada elektronlar, pozitronlar, protonlar ve nötronlar gibi atom altı parçacıklarda bulunmaktadır (Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi, 2014; Soulfanidis, 1995). Şekil 2.1' de radyasyon çeşitlerinin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.1 Radyasyon çeşitleri (Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi, 2014).

Alfa (α) parçacıkları

İki proton ve iki nötrondan oluşmuş Helyum (${}^2\text{He}^4$) atomu çekirdeğidir ve pozitif yüklüdür. Enerjileri yayınladıkları atoma göre değişmekle birlikte çoğunlukla 3 ile 7 milyon elektron volt (MeV) mertebesindedir. Salınım yaptıkları ortamda çok hızlı iyonize oldukları için menzilleri oldukça kısadır. Doğamızda en çok karşılaşılan α ışınması Radyumun (Ra-226) Radona (Rn-222) dönüşmesidir. Alfa parçacıklarını çok küçük kalınlıklardaki maddelerle (örneğin ince bir kağıt tabaka ile) durdurmak mümkündür. Sahip oldukları elektrik yükü, alfa parçacıklarının herhangi bir madde içerisinden geçerken yolları üzerinde yoğun bir iyonlaşma meydana getirmelerine ve bu yüzden de enerjilerini çabucak kaybetmelerine yol açar (TAEK, 2019).

Beta (β) parçacıkları

Çekirdekten salınan elektrona eşdeğer negatif veya pozitif yüklü parçacıklardır. Pozitif yüklü elektronlar " β^+ ", negatif yüklü elektronlar ise " β^- " işaretiyle gösterilmektedir. Çekirdekteki enerji fazlalığı proton fazlalığından kaynaklanıyorsa β^+ , nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa β^- salınımı meydana gelmektedir. Beta parçacıkları da alfa parçacıkları gibi yüke ve kütleyle sahip olduklarından madde içerisinden geçerken yolları üzerinde iyonlaşmaya sebep olurlar. Beta parçacıklarının kütlesi alfa parçacıklarından çok daha hafif olduklarından giricilikleri daha yüksek fakat iyonizasyon özellikleri daha düşüktür. İnce bir alüminyum levha ile tutulabilirler (TAEK, 2019). Beta ışınları ciltte kuru deriyi aşacak enerjiye sahip olsa da daha çok iç ışınlamalar yoluyla insanlara zarar verebilirler.

Gama (γ) ışınları

Yüksek enerjili çekirdeklere uyarılmış çekirdekler gama ışınması yaparak kararlı hale dönüşürler. Gama ışınması, kararsız bir radyoaktif elementin proton ve nötron sayısını değiştirmeden, kararlı bir yapıya dönüşmesi sırasında yaydığı enerjidir. Gama ışınması genellikle herhangi bir bozunma veya çekirdek tepkimesi sonucunda oluşur. Bu ışınlar ışık hızıyla hareket ederler, yüksüz ve kütsüz elektromanyetik radyasyondur. Yüksüz olduklarından dolayı elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler (TAEK, 2019). X ve γ ışınları foton özelliğine sahip elektromanyetik radyasyondur. Yüksek enerjili fotonlardan oluşan elektromanyetik dalgalar halinde yayılırlar giricilikleri yüksektir. Bundan dolayı,

gamalar dış ve iç ışımalar açısından insan ve çevre sağlığı için oldukça zararlı ışınlardır. Örnek olarak Kobalt (Co-60) ve Sezyum (Cs-137) gama ışınması yapan radyoaktif atomlardır.

Radyofarmasötik nedir?

Radyofarmasötikler, Nükleer Tıpta hastalıkların tanı ve tedavisinde kullanılan, yapısında bir radyonüklid bulunduran bileşiklerdir. Nükleer tıpta kullanılan radyofarmasötiklerin % 95'i tanı % 5'i ise tedavi amacıyla kullanılır. Radyofarmasötikler, radyonüklid ve farmasötik olmak üzere iki bileşenden oluşur. Radyonüklid yayınladığı radyasyondan yararlanarak vücut dışından izlenebilen veya vücut içinde bulunduğu dokuyu tedavi eden bileşendir. Farmasötik ise yapısında taşıdığı radyonüklidi vücudun içinde bilgi alınması istenen organ, doku veya bölgeye götüren etken maddedir. Bir radyofarmasötiğin tasarımında, öncelikle bir organ içinde yer bulabilecek veya organın fizyolojik işlevine katılacak farmasötik seçilir. Daha sonra uygun bir radyonüklid, seçilen farmasötiğe takılır, bu işleme İşaretleme denir. Hastaya verilen radyofarmasötikten yayımlanan radyasyon bir dedektör ile ölçülür. İdeal bir radyofarmasötiğin hastanın mümkün olan en düşük radyasyon dozu alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu sebeple her tanı ve tedavi için kullanılacak radyofarmasötikler kolay bulunabilmeli, kısa etkin yarı ömrü olmalı, Parçacık radyasyonu yaymamalı, gama (γ) enerjisi 30-300 keV arasında olmalı, yüksek lokalizasyon oranı, metabolizmaya uygun, hazırlama sırasında ve kullanılırken kimyasal olarak kararlı olmalıdır (Ünak vd., 2017).

2.1 Kromatografik Yöntemler

Kromatografi, çeşitli moleküllerin ayrıştırılması, saflaştırılması ve miktar tayininde kullanılan bir tekniktir. İlk kez 1903'de Rus botanikçi Mikhail Tsvett tarafından geliştirilmiştir. Tsvett bu yöntemi bitki pigmentlerinin renkli bileşenlerini ayırmada kullanmıştır. Kullandığı kolonda renkli bantlar olduğundan bu ayırma yöntemine kromatografi adını vermiştir. Kromatografik yöntemler ile kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirine çok yakın bileşenlerden oluşan karışımlar, kolay ve kısa sürede birbirinden ayrılabilir.

Kromatografi, bir karışımda bulunan maddelerin, biri sabit diğeri hareketli faz olmak üzere birbirleriyle karışmayan iki fazlı bir sistemde ayrılması ve saflaştırılması için kullanılan analitik bir yöntemdir. Yöntem karışımın adsorban

bir ortamda, hareketli bir çözücü etkisiyle, karışım bileşenlerinin farklı hareketleri sonucu birbirinden ayrılması olgusuna dayanır. Hareket eden faza hareketli faz, bahsedilen adsorban ortama ise sabit faz denir. Yöntem çeşitli maddelerin hareketli faz yardımıyla, sabit faz üzerinde, değişik hızlarla hareket etmeleri veya sürüklenmeleri esasına dayanır. Maddelerin ayrılmasının nedeni, maddelerin hareketli veya sabit faza olan farklı ilgileridir (Skoog et al., 1999).Kromatografi ayırma prensibine, katı fazın tipine ve faz tipine göre üç grupta sınıflandırılmaktadır (Demirbağ, 2012).

Ayırma prensibine göre

İyon değiştirme kromatografisi, Jel filtrasyon kromatografisi, İyon çifti kromatografisi, Afinite kromatografisi, Adsorpsiyon kromatografisi, Partisyon kromatografisi.

Katı fazın tipine göre

Düzlemsel kromatografi; Kâğıt kromatografisi ve İnce tabaka kromatografisi (TLC).

Kolon kromatografisi: Sütun kromatografisi, Yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC), Gaz kromatografisi (GC).

Faz tipine göre

Sıvı kromatografisi; Sıvı-katı kromatografisi, Sıvı-sıvı kromatografisi

Gaz kromatografisi; Gaz-katı kromatografisi, Gaz-sıvı kromatografisi

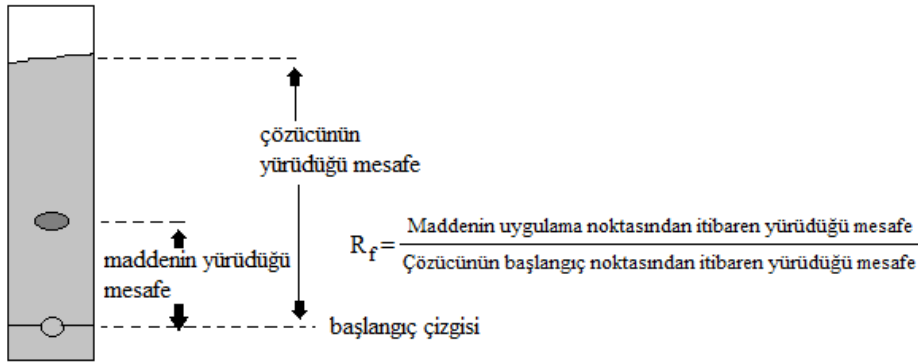
2.1.1 İnce tabaka kromatografisi (TLC)

İnce tabaka kromatografisi (Thin layer chromatography - TLC) bir katı-sıvı adsorpsiyon kromatografisidir ve en çok kullanılan tekniktir. Bu teknikte destek madde üzerine homojen olarak kaplanmış bir adsorban tabakası üzerine, mikrolitre düzeyinde uygulanan madde karışımları, uygun çözücü veya çözücü karışımı yardımıyla ayrılmaktadır. TLC plakaları destek malzemesi olarak cam, plastik, alüminyum gibi plakaları üzerine, bir adsorban (selüloz, silikajel ve alüminyum oksit gibi maddeler) ince bir tabaka halinde sıvanmasından meydana gelmiştir. Sıvı (hareketli) faz olarak ise aseton, su, serum fizyolojik gibi çözücü yada çözücü karışımları kullanılmaktadır. Bu yöntemde hareketli fazın sabit faz üzerinden ilerleyişi, aşağıdan yukarı doğru olur. Çözücü, Alt ucu içerisine daldırılan ince tabaka plakası üzerinde yukarı yönde kılcallık etkisi ile yürür. Bu esnada önceden damlatılmış olan numuneyi farklı hızlarda yukarı doğru sürükler. Böylelikle ayrışma sağlanır. Yürüme hızı, numunenin, katı fazın ve çözücünün

polaritelerine bağlıdır. Polar maddeler polar olan çözücü veya adsorban ile daha sıkı etkileşime girer. (Sherma and Fried, 2003; Gündüz, 2002).

Numuneye uygulanmadan önce mobil faz tankının çözücü buharıyla doymuş olması gerekir. Bu yüzden seçilen çözücü ya da çözücü karışımı, uygulamadan yaklaşık 20 dakika önce kaplara dökülür ve kapağı kapatılır. TLC plakası şeritler (1x10cm) halinde kesilir. Numune şeridin çözücüye degecek olan kenarından 1-2 cm yukarısına nokta şeklinde damlatılır. Ayırma veriminin en iyi olması için numune damla lekesi (nokta) minimum çapta olmalıdır. Numune uygulanmasından sonra şerit, mobil faz tankına, dik olarak konur. Çözücü yukarı doğru ilerlerken, numunenin uygulandığı noktadan geçer ve numuneyi çözerek, şeridin üst kısmına doğru taşır. Çözücü ilerleme seviyesi şerit uzunluğunun yaklaşık %90'ına ulaştığında kromatografi şeridi çözücünden çıkarılır. Yarısını geçtikten sonra çıkarılır ve çözücünün yürüdüğü mesafe işaretlenerek kurumaya bırakılır. Başlangıç çizgisi ile çözücünün son seviyesi arasındaki mesafe ölçülür. (Grillini, 2006).

Her bileşenin taşınma mesafesi R_f (Relatif Front) değeri ile ifade edilir. Bu değer her madde için çözücü, adsorban ve destek maddesine bağlı ayırt edici bir özelliktir. R_f değeri, maddenin yürüme mesafesinin (d_m), çözücünün yürüme mesafesine (d_c) oranıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 R_f değerinin bulunması (Milli Eğitim Bakanlığı, 2013).

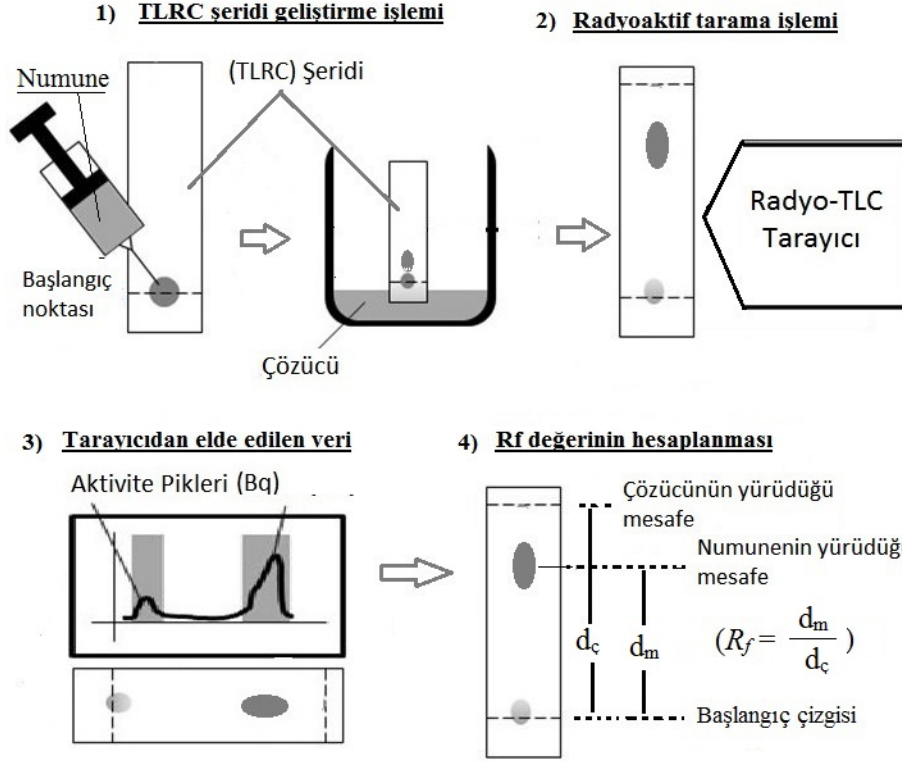
R_f değeri her zaman 0 ile 1 arasında bulunur ve doğal olarak hızlı yürüyen komponentler için alınan mesafe büyük olacağından R_f değeri büyük, daha yavaş yürüyenler için daha küçüktür. R_f bir madde için aynı sabit faz ve aynı çözücü için sabittir. Önceden belirlenen R_f değerleri ile bilinmeyen çözelti içerisinde hangi

maddelerin bulunduğu belirlenebilir. (Milli Eğitim Bakanlığı, 2013; Theobald, 1989)

TLC şeridi üzerindeki analizi yapılacak maddelerin (analitlerin) yerinin belirlenmesinde florasans sayımı, UV ışığı, radyoaktivite sayımı gibi yöntemler kullanılır. TLC yöntemi ucuz, hızlı, iyi ayırma gücüne sahip ve oldukça duyarlı bir yöntem (Erdik vd., 2000) olup, biyolojik ve kimyasal ürünlerin karışımlarının ayrıştırılabilmesi veya saflaştırılabilmesi için ilaç üretiminde, klinik analizlerde, çevresel toksite, gıda kimyasında, su, pestisit analizlerinde, kozmetikte, boya sanayisinde ve birçok alanda geniş çapta kullanılmakta olan kromatografi yöntemlerindedir (Çekiç, 2010).

2.1.2 İnce tabaka radyo kromatografisi (TLRC)

Radyo işaretli bileşiklerin kalite kontrolü için yapılan uygulamalarda TLC yöntemi izlenir ve şerit üzerindeki analitlerin belirlenmesinde radyoaktivite sayım metodu kullanılır ise bu yönteme, İnce tabaka radyo kromatografisi (Thin Layer Radio Chromatography - TLRC) denilmektedir. Nükleer farmaside, izlenmek istenen moleküllere çeşitli radyonüklidlere (I-131, Tc-99m, F-18 gibi) bağlanır. Radyonüklidin, ne kadarının istenilen bileşiğe bağlanmış olup olmadığını tespiti için İnce Tabak RadyoKromatografitekniki uygulanır. TLRC şeritlerindeki örnek çözücüde yürütüldükten sonra çözücü kabından çıkartılır ve kurutulur. TLRC şeridi ince dilimlere bölünerek her dilimin radyoaktivitesi ölçülür ve bir histogram elde edilir. Daha kolay yöntem ise üzerinde kullanılan radyonüklidin yaydığı enerjiye duyarlı detektör bulunan bir TLRC tarayıcısı ile kromatografi plakası taranarak, plaka üzerindeki radyonüklidin dağılımı grafik olarak bilgisayarda görüntülenir ve R_f değeri hesaplanır. TLRC yöntemi nükleer farmaside bağlanma verimi, serbest radyo izotop, yükseltgen veya indirgen halini ve ortamdaki yükseltgen/indirgenin kendisi olmak üzere üç bileşiği tahmin etmek için kullanılır (Theobald, 1989). TLRC uygulama yönteminin işleyiş adımları Şekil 2.3' de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 TLRC uygulama yöntemi (Jeon et al., 20017).

2.1.3 Teknesyum-99m (^{99m}Tc) özellikleri

Teknesyum yunanca technetos yapay anlamına gelmekte olup 1937 yılında, İtalya'da Carlo Perrier ve Emilio Segre tarafından Molibden'in siklotronunda hızlandırılmış 5 MeV döteronlarla bombardıman edilmesiyle keşfedilmiş olup 43 numaralı ilk yapay elementtir (Royal, 2019).

1962'de ^{99}Tc Afrika'da ^{238}U 'in fisyon ürünü olarak çok küçük miktarda izole edilmiştir. Teknesyum'un kimyası Renyum ile Manganez arasındadır. Gümüş gri metalik görünümündedir. Kristal yapısı hekzagonaldır. Teknesyum hidroklorik asitte çözünmezken nitrik asit ve konsantre sülfürik asitte çözünmektedir. Kararlı izotopu yoktur. Ancak üç tane uzun yarı ömürlü radyoizotopu vardır. Bunlar, ^{97}Tc ($T_{1/2} = 2.6 \times 10^6$ yıl), ^{98}Tc ($T_{1/2} = 4.2 \times 10^6$ yıl) ve ^{99}Tc ($T_{1/2} = 2.1 \times 10^5$ yıl)'dır. Bununla birlikte en fazla kullanılan izotopu ise ^{99m}Tc ' dir ($T_{1/2} = 6.01$ saat). En yaygın oksidasyon düzeyleri +2, +4, +5, +6 ve +7'dir. Temel düzeydeki nötral teknesyumun elektronik yapısı $[\text{Kr}]4d^65s^1$ şeklinde olup ; V. Periyot VII B Grubunda yer almaktadır. En kararlı yapısı ise IV ve VII değerlikleridir. Genel olarak perteknetat ($^{99m}\text{TcO}_4^-$) şeklinde bulunur. $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$

jeneratöründe elde edilen sodyum perteknetat ^{99m}Tc 'nin en basit ve en kararlı bileşimidir. (Sampson, 1999; Biber, 2004).

$^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc}$ jeneratörü cam bir kolon içerisinde bulunan alüminyum oksit (Al_2O_3) üzerine adsorbe edilmiş fisyon ürünü ^{99}Mo içerir. ^{99}Mo 'nun kendiliğinden bozunması sonucunda oluşan ^{99m}Tc , % 0.9'luk NaCl çözeltisinin geçirilmesi ile sodyum perteknetat ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$) çözeltisi şeklinde elde edilir. $^{99m}\text{TcO}_4^-$ iyonları zayıf bağlandıkları için kolondan kolayca uzaklaştırılmaktadır. Sodyum klorür çözeltisi izotonik, steril, apirojen, parenteral enjeksiyona hazır, berrak ve renksizdir. $^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc}$ jeneratörü bu radyonüklidin rutin analizlerde uygulanabilirliğini sağlamaktadır (Jurisson and Lydon, 1999; Mease et al., 2001).

$^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc}$ jeneratörü, teknesyumu perteknetat formu içinde en yüksek oksidasyon değeri olan +7 şeklinde sağlar. ^{99m}Tc radyofarmasötikleri perteknetatın indirgenmesiyle hazırlanırlar. Hazırlanan Teknesyum komplekslerinin kararlılığı radyofarmasötik performansı etkileyebilir (Sampson, 1999; Mease and Lambert, 2001).

$^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ jeneratörü kalite kontrolü sonunda aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

Radyoaktif saflık: $> \% 99.9^{99m}\text{Tc}$, $^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc} < \% 0.1$

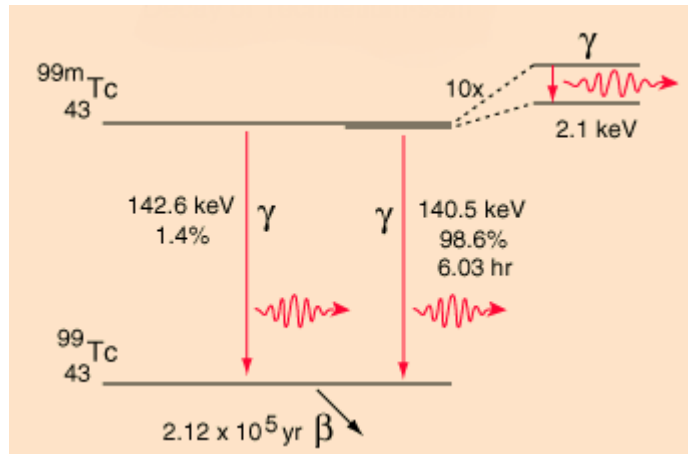
Konsantrasyon : $\sim 10^{-9} \text{ M } ^{99m}\text{TcO}_4^-$

Radyokimyasal saflık: $> \% 95 ^{99m}\text{TcO}_4^-$ (ITLC ile)

Al^{+3} içeriği: $< 10 \mu\text{g/ml}$ (kolorimetrik test ile)

pH : 4.5 - 7.

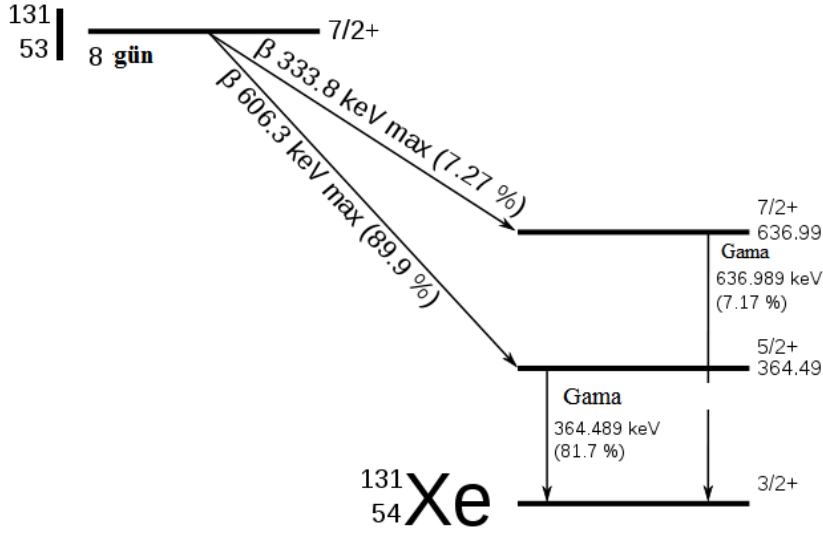
Şekil 2.3 ^{99m}Tc 'un bozunma şeklini içermektedir.



Şekil 2.3 ^{99m}Tc bozunum şeması (Nave, 2019).

2.1.4 İyot-131 (^{131}I) özellikleri

İyot atom numarası 53 olup ametal grubunda katı bir elementtir. Radyoaktif ve radyoaktif olmayan izotopları vardır. Radyoaktif olan İyot-131 (^{131}I), sadece nükleer santrallerde uranyumun fisyonu sırasında veya Tellürün (Te) nötronlarla bombardımanı sonucunda elde edilir. Yarı ömrü 8 gündür. Beta bozunumu ile Xenon-131'e parçalanır. Bozunması sırasında ortaya çıkan beta parçacıklarının minimum enerjisi 69keV, ortalama enerjisi 190 keV, maksimum enerjisi 606 keV'dir. 364 keV enerjiye sahip gama emisyonu bu bozunma sırasında ortaya çıkan, görüntülemelerde kullanılan ve çevreyi etkileyen esas radyasyondur. Şekil 2.4 de ^{131}I 'in bozunum şeması görülmektedir.

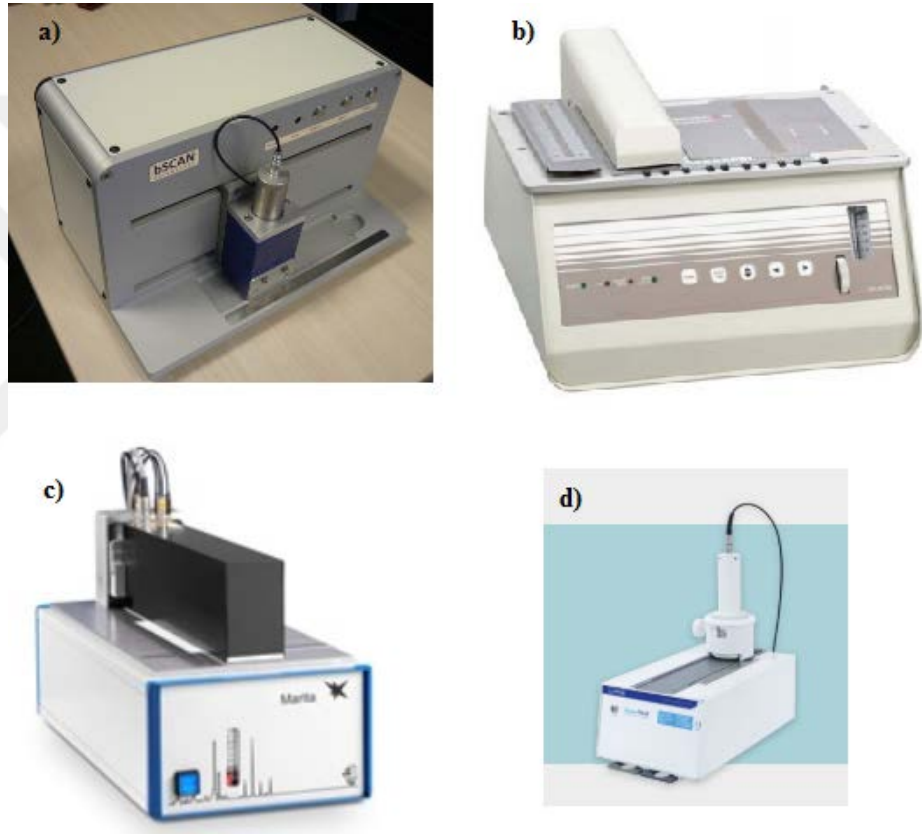


Şekil 2.4 ^{131}I İyot bozunum şeması (Haar, 2019).

2.1.5 İnce Tabaka Radyo Kromatografi (TLRC) tarayıcı cihazı

Tez çalışmasının konusu olan TLRC tarayıcı cihazı, radyo kromatografi kağıdı veya şeridi üzerindeki radyoaktif bileşiklerin konumuna bağlı (bölgesel) dağılımını radyasyon dedektörü ile tarama yaparak belirlemek amacıyla kullanılan sistemdir. Günümüzde kullanılan ticari TLRC tarayıcıları Şekil 2.5'de görülmektedir. TLRC tarayıcılara sektörde radyo-TLC tarayıcı (Radio-TLC Scanner) cihazlarda denilmektedir. Bu tarayıcı cihazlarda kullanılan dedektörler izlenmek istenen radyasyon türüne göre değişiklik göstermektedir. Ticari tarayıcı sistemlerde çoğunlukla orantılı sayaçlar, sintilasyon ve yarıiletken dedektörler kullanılmaktadır. Kromatografi şeridinin tarama işlemi bir motor sürücü sistem ile gerçekleştirilmektedir. Dedektör TLRC kromatografi şeridi üzerinde

kullanıcını belirlediği aralıkta hareket ettirilerek sayım işlemi yapılmaktadır. Bazı TLRC tarayıcılarda tarama işlemi, konum hassasiyetine sahip geniş pencereleli bir detektör hareketli bir mekanizma olmaksızın yapılmaktadır. Bu tür uygulamalarda, yöntem olarak geniş pencere alanına ve konum hassasiyetine sahip bir detektör TLRC şeridi üzerinde belirli bir süre tutulmak suretiyle radyasyon bölgeleri tespit edilmektedir. Kromatografi kâğıdı üzerindeki aktivite bölgelerinden alınan veriler grafik olarak verilmektedir. Bu tez kapsamında, Geiger-Müller dedektörü kullanılarak tasarlanmış laboratuvar tipi bir TLRC tarayıcı sistemin kullanılabilirliği araştırılmıştır.



Şekil 2.5 Radyo-TLC tarayıcı cihaz örnekleri. a) BrightSpec, 2018, b) Eckert & Ziegler, 2017, c) Elysia, 2019, d) LabLogic, 2018

2.2 Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri

Nükleer radyasyonları algılamak için kullanılan dedektörlerin temel çalışma prensipleri benzer özellikler gösterir. Dedektörün aktif hacmine giren bir parçacık veya foton, dedektör aktif maddesiyle, foto-elektrik etki, çift oluşum veya Compton saçılması gibi etkileşimler yaparak, enerjisinin bir kısmını veya tamamını dedektörde bırakır. Bu etkileşim sonucunda dedektör aktif maddesinde

iyonlaşma veya foton salınımı meydana gelir. Oluşan bu etkiler detektör tarafından algılanır ve elektrik sinyaline çevrilir. Çok zayıf olan bu sinyaller hassas yükselteçler ile kuvvetlendirilerek analiz edilmek üzere, sinyal işleme devrelerine gönderilir.

Detektör materyali katı, sıvı ve gaz olabilmektedir. Detektör materyali yarı iletken dedektörlerde katı, gazlı dedektörlerde gaz iken sintilasyon dedektörlerinde katı sıvı ve gaz olabilmektedir. Dedektör materyalinin türü ve boyutları ölçülecek radyasyon tipine ve enerjisine göre seçilir. Alfa parçacıkları ve düşük enerjili betaların katı maddelerdeki maksimum menzili $100\mu\text{m}$ 'den az olduğu için aktif bölgesi katı olan bir detektör ile bunların tespitinde, detektör kalınlığı çok ince olması tercih edilmektedir. Detektör kalınlığı, betalar ölçümleri için 0,1 – 1mm aralığında iken gamalar için bu değer daha büyüktür ve bazı durumlarda 5 cm kalınlığında dedektörler bile yüksek enerjili fotonları ölçmek için yeterli olmamaktadır. (Knoll, 2000)

Radyasyon dedektörleri pals ve akım modu olmak üzere iki modda çalıştırılmaktadır.

Akım modu: Radyasyon aktivitesinin yüksek olduğu uygulamada kullanılır. Şekil 2.6' de gösterildiği gibi dedektör çıkışına ampermetre bağlanması ile sayım işlemi gerçekleştirilir. Burada sabit bir “ T ” cevap süresinde, zamana bağlı oluşan akım,

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt' \quad (\text{Eşitlik 1})$$

olarak ifade edilir.

Ortalama akım, dedektörde her bir etkileşim sonucu oluşan yük sayısı ile ortalama etkileşim sayısının çarpımı Eşitlik 2' de verilmiştir.

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{W} q \quad (\text{Eşitlik 2})$$

I_0 =Ortalama akım

r = Birim zamanda etkileşim sayısı (frekans)

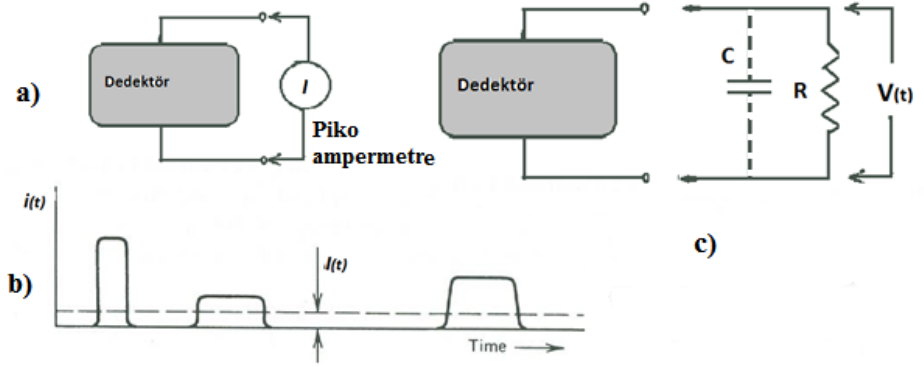
$Q = Eq/W$ = Her bir etkileşimde üretilen yük

E = Her bir etkileşimde bırakılan ortalama enerji

W = Elektron- iyon çifti oluşması için gereken ortalama enerji

$q= 1,6 \times 10^{-19}$ C (elektron yükü).

Pals modu: Yaygın olarak kullanılır ve uygulaması basit çalışma modudur. Her etkileşim ayrı ayrı ölçüldüğünden dolayı diğer akım modundan daha hassastır. Enerji analizi bakımından her bir pals değerlendirilerek enerji analizi yapılabilir. Artalan gürültüsü kolayca ayırt edilebilmektedir. Bu çalışma modu Şekil 2.3' de gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Dedektör çalışma modları, a) Akım modu çalışma, b) Akım modu çıkış grafiği, c) Pals modu çalışması (Knoll, 2000)

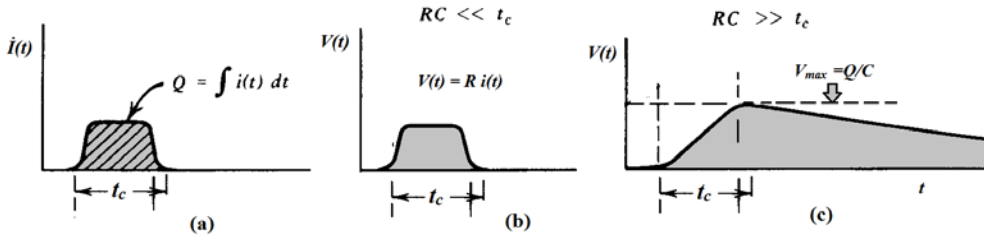
Şekil 2.6'deki devrede C , eşdeğer kapasitedir; Detektörün kendi kapasitesi ve elektronik devreden kaynaklı toplam kapasiteyi temsil etmektedir. R ise üzerine detektör geriliminin düştüğü direnci temsil etmektedir. Bu değerlerinin seçiminde iki durum söz konusudur. Burada devrenin zaman sabiti ($\tau=R \times C$) ve dedektör içinde yük oluşma süresi t_c ile gösterilmektedir.

$R \times C$ ' nin küçük olması durumu ($\tau \ll t_c$); Radyasyon aktivitesinin yüksek veya sayım doğruluğunun önemli olduğu durumlarda uygulanan yöntemdir. Dış devrenin zaman sabitinin detektörde yük oluşma süresine göre küçük olması; bütün akımın direnç üzerinden akmasına sebep olur. Böylelikle radyasyonun oluşturduğu yük zamana bağlı olarak ölçülebilir. Küçük RC değerinden dolayı tüm yük R direnci üzerinde görülür (Şekil 2.6).

$R \times C$ ' nin büyük olması durumu ($\tau \gg t_c$); Pals modunda uygulanan en yaygın yöntemdir. Büyük RC değeri, oluşan tüm yükün kondansatör üzerinde toplanmasına neden olur. Oluşan yük (Q), eşdeğer kapasitör (C) üzerinde birikir. Kondansatörün üzerindeki gerilim değerinin ölçülmesi ile kondansatör üzerinde

toplanan yük ($V_{\max}=Q/C$) formülü ile bulunarak radyasyonun enerjisi ölçülmektedir (Şekil 2.7).

Gelen radyasyon dedektör ile etkileştiğinde kapasitör üzerindeki yük boşaltılmalıdır. Bunun için yeterli bir zaman (recover time) geçmesi gerekir. Özellikle yarı iletken dedektörlerde kapasite değışe bilirliliği göz önüne alındığında, yük-duyarlı (*charge-sensitive*) yükselteçler yaygın olarak kullanılmaktadır. (Knoll, 2000)



Şekil 2.7 a) Dedektörün çıkışı akımı, b) Küçük zaman sabiti, c) Büyük zaman sabiti, (Knoll, 2000)

2.2.1 Dedektör verimliliği

Dedektör aktif bölgesine giren tüm alfa ve beta parçacıklarını sayılabiliyor ise bu dedektör için 100% verimli denilmektedir. Diğer yandan gama ışınları veya nötronlar gibi yüksüz radyasyonlar, dedektöre ulaşmadan önce farklı etkileşimlerde bulunurlar. Bundan dolayı tüm etkileşimler pratik olarak sayılamayacaktır. Dedektör verimi, Mutlak verim ve İçsel verim olarak ikiye ayrılır.

Mutlak verim (ϵ_{abs}), dedektörün geometrisi ve kaynaktan uzaklığına bağlıdır ve Eşitlik 3' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\epsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{kaydedilen puls sayısı}}{\text{kaynaktan salınan kuanta sayısı}} \quad \text{Eşitlik 3}$$

İçsel verim öncelikle dedektör materyaline, radyasyon enerjisine, materyalin kalınlığına ve radyasyon geliş yönüne bağlıdır. Dedektör materyalinin özelliğine bağlı olarak, bazı enerjilerde veya enerji aralığında dedektörler daha hassas olabilirler ve bu enerjilerde verimleri daha yüksek olabilir. Eşitlik 4' de İçsel verim (ϵ_{int}) gösterilmektedir.

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{\text{kaydedilen puls sayısı}}{\text{Dedektöre çarpan kuantta sayısı}} \quad \text{Eşitlik 4}$$

Bir radyasyon kaynağından ölçüm yapılırken dedektör penceresinin gördüğü katı açı dikkate alınır. Radyasyon kaynaktan küresel izotropik ve tek enerjili olarak yayıldığı kabul edilirse 'r' uzaklığındaki dedektör penceresine giren kuantta (foton, parçacık) sayısı;

$$N = S\Omega/4\pi$$

Eşitlik 5

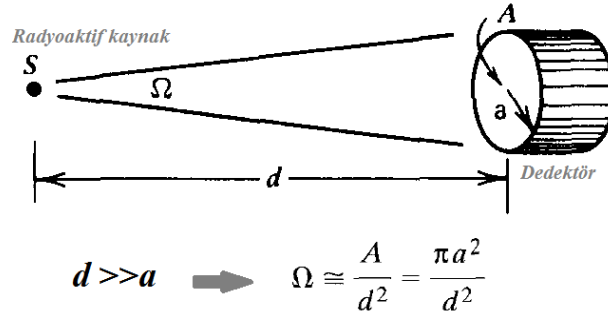
olarak ifade edilir. Bu eşitlikte;

N: dedektör penceresinden giren kuantta sayısı,

S: kaynaktan birim zamanda yayılan kuantta sayısı (aktivite),

Ω : Dedektörün gördüğü katı açı, dedektörün kaynağa bakan yüzeyinden alınan entegralidir ve birimi steradyandır.

Bir "s" nokta kaynaktan "d" kadar mesafede bulunan 'a' yarıçapındaki dairesel geometriye sahip bir dedektörün gördüğü katı açı, $d \gg a$ için Şekil 2.8' de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

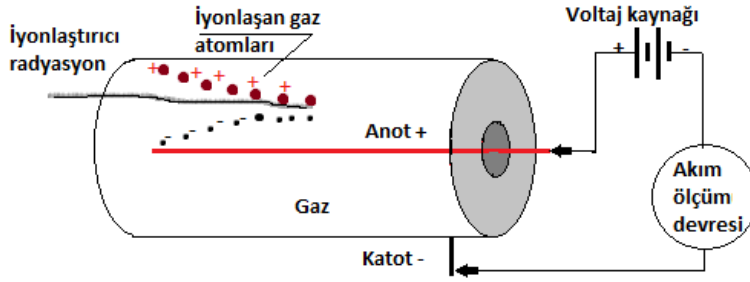


Şekil 2.8 Dairesel pencereleli bir dedektör için katı açı ($d \gg a$)

Dedektörlerde ölü zaman; Hemen hemen tüm dedektörlerde bir etkileşimin hemen ardından gelecek ikinci radyasyonun ölçülebilmesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Ölçüm yapılamayan bu süreye ölü zaman (dead time) denir. Ölü zaman, dedektörün iç yapısından veya ekli olan elektronik devrelerden kaynaklanmaktadır.

2.3 Gazlı Dedektörler

Gazlı dedektörlerin çalışma prensibi, iyonlaştırıcı radyasyonun içinden geçtiği gazı iyonlaştırma özelliğine dayalıdır. Genel yapısı arasında gaz bulunan paralel plakalara belirli bir yüksek gerilim uygulanır. İyonize radyasyon plakalar arasından geçerken, enerjisinin tamamı veya bir kısmını iyon çifti oluşturarak kaybeder. Oluşan pozitif yüklü iyonlar katot tarafından, elektronlar ise anot tarafından çekilir. Yükler elektrotlarda toplanması ile bir akım geçişi meydana gelir. Böylelikle oluşan radyasyon bir akım palsine çevrilmiş olur. Çoğu gazlı dedektörlerde iyon çifti meydana getirebilmek için gerekli ortalama enerji 30eV'dur. Gazlı dedektörler kullanım alanlarına bağlı olarak çeşitli geometrilere tasarlanabilmektedirler. Yaygın olarak kullanılan gazlı dedektörler silindirik yapıda üretilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Gazlı dedektörlerin çalışma prensibi (ISU, 2018)

Plakalara uygulanan potansiyel ile toplanan yük arasındaki ilişki Şekil 2.10'da gösterilmiş olan beş bölgeye ayrılır.

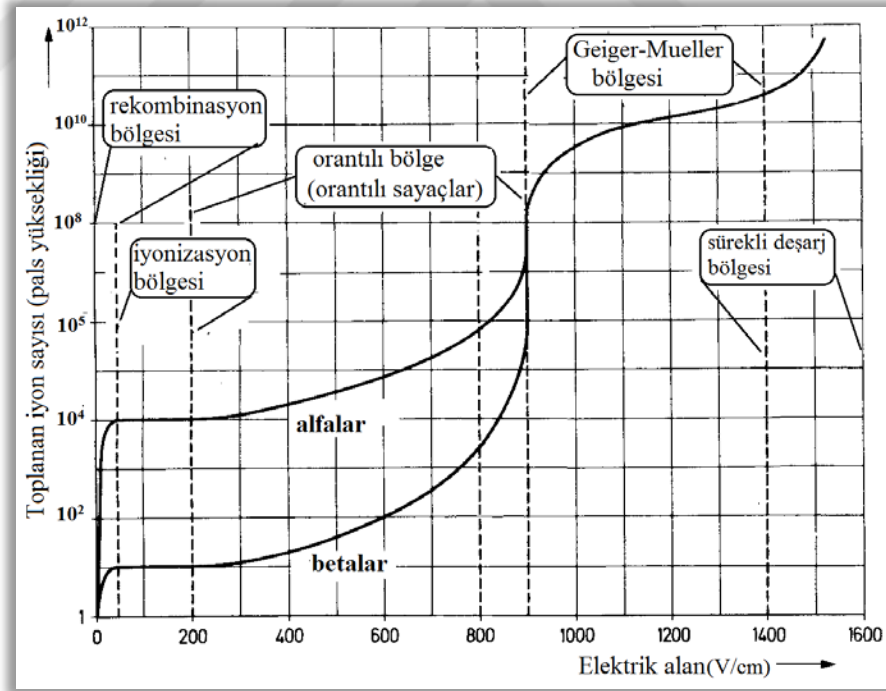
Rekombinasyon bölgesi: Uygulanan gerilim çok düşük olduğunda iyonlar ve elektronları hızlandıracak yeterli elektrik potansiyeli olmadığından tekrar birleşmeler meydana gelmektedir. Gerilim arttırıldığında elektrik alan artmakta ve tekrar birleşimler azalmaktadır. Bu bölge tekrar birleşme (recombination) bölgesi olarak adlandırılmaktadır.

İyonizasyon bölgesi: Gerilimin artmasına rağmen toplanan yükler sabit kalmakta, tekrar birleşmeler olmamakta ve yeni iyonlar üretilmemektedir. Bu bölge iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır. İyonizasyon odaları bu bölgede çalışmaktadır.

Orantılı bölge: Bu bölgede toplanan yük sayısı artmaya başlar. Çünkü serbest elektronlar hızlanarak başka atomlara çarpar ve onları iyonlaştırması sonucunda ikincil iyonlar meydana gelir. Birincil iyonlaşmanın ardından ne kadar ikincil iyon üretildiği gaz çoğaltma faktörüne bağlıdır. Çoğaltma faktörünü detektöre konan gazın özelliği ve uygulanan elektrik alan şiddeti belirler. Bu çalışma bölgesinde dedektörler orantılı sayaç olarak çalıştırılır.

Geiger-Müller (GM) bölgesi: Bu bölgede uygulanan gerilim yüksek olduğundan bir tek iyon çifti bile birçok ikincil iyon çifti oluşturarak iyon çığına sebep olmaktadır. Bu elektron çığı radyasyonun enerjisinden bağımsız güçlü sinyaller (pals) üretir. Bu bölge Geiger- Müller (GM) bölgesi olarak adlandırılır ve yaygın olarak kullanılan GM dedektörler bu bölgede çalışır.

Sürekli deşarj bölgesi: Eğer uygulanan gerilim daha fazla arttırılırsa, gelen radyasyondan kaynaklanan tek bir iyonlaşma, gazda sürekli deşarj akımına sebep olur. Bu çalışma bölgesinde radyasyon ölçümü yapılamaz.



Şekil 2.10 Toplanan iyon sayısı ve uygulanan elektrik alan arasındaki ilişki. (Lieser, 2001)

2.3.1 İyonizasyon Odaları

İyonizasyon odalarında elektrik alan, iyon çiftlerinin tekrar birleşmesine izin vermeyecek değerdedir. Genelde uygulanan gerilim katot ve anot arasındaki

mesafeye bağlı olarak 100 ile 500 volt arsında değişir. İyonizasyon odaları atmosfer ortamından yalıtılmış veya atmosfer ortamına açık yapıda olabilirler. Bu dedektörlerde kullanılan elektrot şekilleri, Geiger tüplerine ve orantılı sayaçlara göre oldukça farklıdır. Dış duvarı silindir veya küre şeklinde olurken, anot genellikle çubuk şeklindedir. Bazı durumlarda elektrotlar iki paralel düz plaka olabilmektedir.

İyonizasyon odasında oluşan akım 10 pA değerinden daha düşüktür. Eğer 3-MeV'lik bir alfa veya beta parçacığı iyon odasına girer ise, her iyon oluşumu için 30 eV enerji harcadığı göz önünde bulundurulursa, enerjisi bitinceye kadar 10^5 iyon çifti oluşturur. Bu palslar tespit edilemeyecek kadar küçük olduğundan; İyonizasyon odaları, birçok palsın birleşiminden oluşan akım modunda çalıştırılır. (Knoll, 2000)

İyonizasyon odalarının istenilen geometrilerde kolaylıkla tasarlanabilmeleri ve çalışma ömürlerin uzun olması dolayısıyla birçok nükleer uygulamada tercih edilmektedir. Akım modunda çalıştırılan kuyu tipi iyon odaları, radyasyon kaynaklarının kalibrasyonunda kolaylık ve ölçüm kesinliği gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca iyonizasyon odaları yaygın olarak taşınabilir radyasyon izleme aracı olarak kullanılmaktadır. (Chae et al., 2014)

İyon odaları pals modunda yüklü parçacıkların enerji ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım kolaylığı ve ölçüm hassaslığı gibi avantajları dolayısıyla yüklü parçacıkların enerjilerinin ölçülmesinde yarı iletken detektörlerden daha çok tercih edilmektedir. Elektromanyetik radyasyonun gaz ortamında çok az enerji bırakması nedeniyle, iyon odaları, X ve gama ışınları ölçümlerinde tercih edilmezler.(Fulbright, 1979)

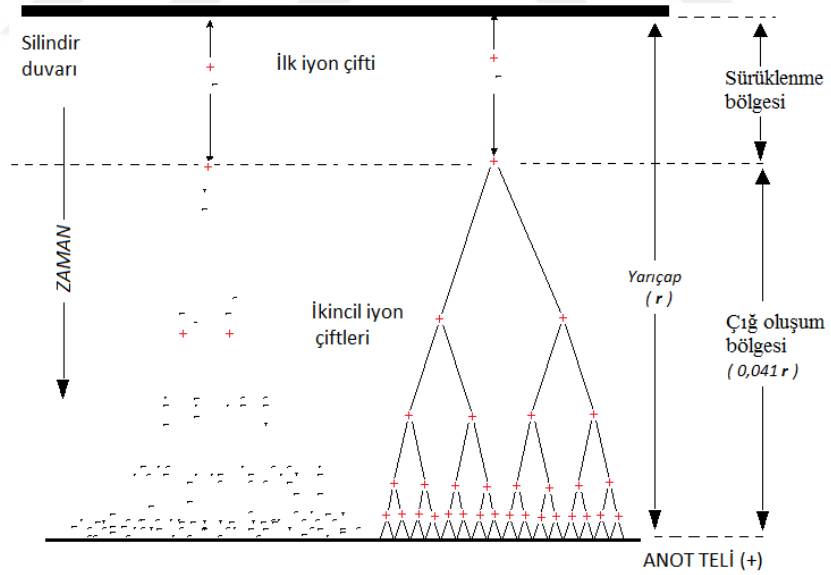
2.3.2 Orantılı sayaçlar

Gazlı dedektörlerin bir uygulaması olan orantılı sayaçlar, gaz çarpımı (yük çoğaltma) faktörüne bağlı olarak çoğunlukla pals modunda çalıştırılır. Orantılı sayaçların en önemli uygulama alanı düşük enerjili X ışınlarının tespiti ve spektroskopik ölçümüdür. Aynı zamanda nötronların tespitinde de kullanılırlar.

Gaz arpımı, elektrik alan değerinin yükselmesine bağlı olarak dedektör çıkış akımının artmasına neden olan bir olaydır. Radyasyonun iyonlaştırdığı gaz moleküllerinden çıkan serbest elektron, elektrik alan tarafından hızlandırılarak

anoda doğru sürüklenir. Diğer gaz atomlarına çarpan elektron, atomdan başka bir elektron koparır. Serbest kalan yeni elektronlar başka gaz moleküllerini iyonlaştırır. Zincirleme olarak hızla artarak devam eden bu olay sonunda bir elektron çığı oluşur. Böylelikle ölçülebilir elektrik akımı elde edilir. Elektron çığı yeterli büyüklükteki elektrik alan oluştuğunda meydana gelmektedir. Orantılı sayaçlarda elektrik alan eşik değeri, atmosferik basınçta 10^6 V/m dir. (Knoll, 2000). Orantılı sayaçlarda elektrotlarda toplanan yük, radyasyonun tarafından oluşturulan ilk yükten binlerce kat fazladır ve birincil yükle orantılıdır. Dedektör içinde oluşan yükün çoğaltılması, sinyal-gürültü oranını artırır ve iyonizasyon odalarına göre daha sağlıklı ölçümler alınmasını sağlar. Orantılı sayaçlar çoğunlukla merkezinde bir tel bulunan silindirik yapıdadır (Şekil 2.11)

Gaz çarpım faktörü (M); Gazın çoğaltma faktörü olarak da adlandırılan olay, radyasyonun oluşturduğu gerçek yükün tüp tarafından yükseltme katsayısıdır. Tüp içinde serbest elektronun pals oluşturma süreci iki aşamaya ayrılır. Bunlar, tek bir elektronun çığ bölgesine kadar ve çığ bölgesine girdikten sonra anot teline kadar olan yolculuğudur. Orantısız sayaçlarda M , 10^2 ile 10^4 civarındadır (Knoll, 2000)



Şekil 2.11 Silindir yapıdaki dedektörde bir iyon çifti tarafından tetiklenen çığ (ORAU, 2018).

Sönümlenme gazı; Orantılı sayaçlarda yükseltme olayı, etkileşim yapan radyasyonun enerjisi ile doğru orantılı olması gerekir. Fakat serbest elektronlar gaz moleküllerine çarptıklarında onları sadece iyonlaştırmaz, bazen de onları uyarılmış duruma geçirirler. Uyarılmış durumdaki moleküller tekrar taban hale

geçerken, ultraviyole veya görünür bölgede foton yayarlar. Bu fotonlar başka gaz moleküllerini iyonlaştırır ya da katot yüzeyinden elektron koparırlar. Fotonların neden olduğu bu serbest elektronlar da tekrar yeni fotonlara yol açarak, istenmeyen çığ meydana getirirler. Bu durum orantısız yükseltmeye neden olur. Orantılı dedektörün, GM dedektörü gibi davrandığı bu durumu engellemek için soy gazlara, belirli bir miktarda sönümlenme gazı denilen çok atomlu gazlar karıştırılır. Bu gazlar fotonları absorbe ederek kontrolsüz yük oluşumunu önlemektedir. (Friedman, 1949; ; Knoll, 2000)

Sönümlenme gazı olarak en yaygın %90 argon (Ar) ve %10 metan (CH₄) karışımından oluşan P-10 gazı kullanılır. Gama ve X ışınlarının ölçümünde, kütle numarası yüksek olan, kripton (Kr) ve ksenon (Xe) gibi gazların kullanılması verimi yükseltir.

Zamanlamanın önemli, verimin daha az önemli olduğu durumlarda, elektronlar içinde yüksek hızlara ulaşabildiği için metan (CH₄), propan (C₃H₈) ve etilen (C₂H₄N₂O₆) gazlar kullanılabilir. Nötron dedektörlerinde He-3 ve BF₃ gibi gazlar kullanılır (Knoll, 2000).

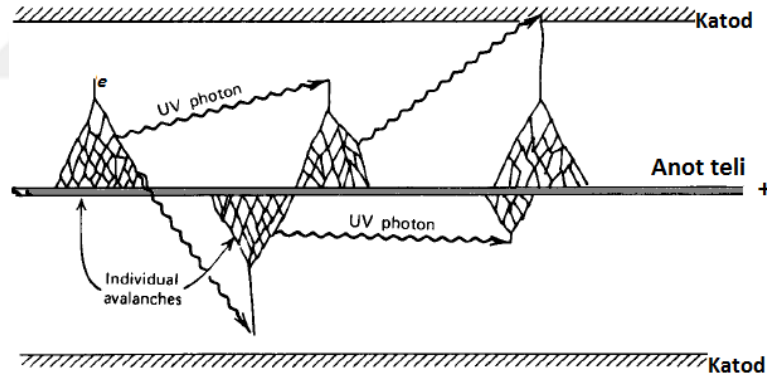
2.3.3 Geiger-Muller (GM) sayacı

Geiger-Muller sayacı 1928' de Geiger ve Muller tarafından tanıtımı yapılmış olan bu dedektör, basit, düşük maliyetli ve çalıştırılması kolay olmasından dolayı bu güne kadar kullanımı devam etmiştir. Yaygın olarak GM sayacı veya Geiger tüpü olarak adlandırılır. GM dedektörleri çalışma prensibi orantılı sayaçlarla aynıdır. Farklı olarak, elektrik alanın artırılması ile yükseltme katsayısının (M) oransız olmasıdır. Bir Geiger tüpünde oluşan palsların genliği gelen radyasyonun enerjisinden bağımsız olarak aynıdır. Geiger tüpü bu nedenle sadece basit bir sayaç işlevi görebilir spektroskopik ölçümlerde kullanılamaz.

Dedektör içinde oluşan çığ anot telini saracak şekilde tüm tel boyunca yayılır (Şekil 2.12). İyonlar elektronlardan daha yavaş hareket ettiğinden, katoda hemen ulaşamaz dolayısı ile anot teli etrafında kalırlar. Anot teli etrafındaki bu iyon bulutu elektrik alan şiddetini azaltır. Çığ oluşumu için gerekli olan 10⁶V/m değerinden daha düşük bir elektrik alan, deşarjın son bulmasına neden olur. Anot teli etrafında oluşan bu yüksek yoğunluktaki iyonlaşma çığ oluşumunu sonlandırır.

GM tüplerinde genellikle helyum (He), argon (Ar) gibi soy gazlar kullanılır ve oksijen gibi negatif iyon oluşturacak gazlardan kaçınılır. Oluşacak iyon çifti sayısı, elektrik alanın gaz basıncına oranı (ϵ/p) ve gaz karışımının özelliğine bağlıdır. Pratik olarak tüp içindeki basınç, atmosfer basıncının onda ikisi civarındadır. Büyük tüpler basınç farkından kaynaklanacak deformasyona karşı atmosferik basınçta doldurulur iken bazı tüplerde sürekli gaz akışı ile gaz yenilenir. (Haines, 1936)

Tipik bir Geiger tüpünde her pals, $10^9 - 10^{10}$ iyon çiftinden oluşur. Bu yüksek sayıdaki yük birikimi ile oluşan pals genliği volt seviyelerine ulaşmaktadır. Diğer detektör türlerine göre yüksek genlikli sinyal seviyesi, detektör çıkışındaki sinyal işleme devrelerini basitleştirir. Dedektör tüpünün diğer diğer detektörlere göre basit ve ekonomik olması, GM dedektörünün yaygın olarak radyasyon ölçüm sistemlerinde tercih edilmesini sağlamaktadır. GM sayaçlarının diğer kullanılan radyasyon dedektörlerine göre dezavantajları ise zayıf enerji ayırımı ve geniş ölü zamanlarıdır.



Şekil 2.12GM tüpünde çığ oluşumu(Knoll, 2000).

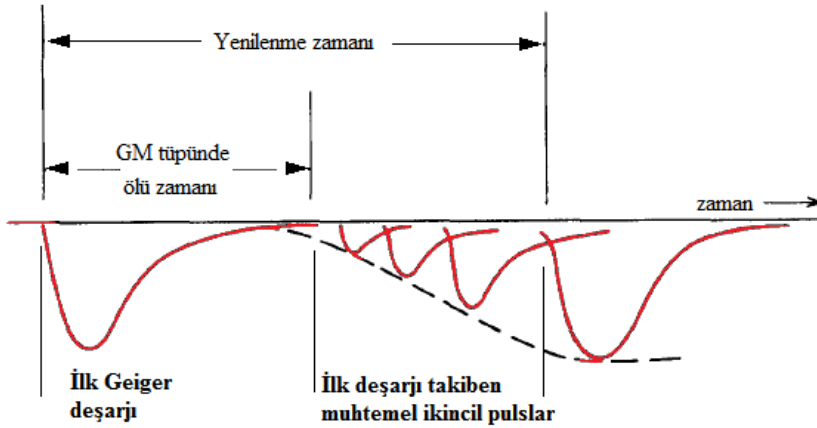
GM tüplerinde sönümlenme; Eğer Geiger tüpü sadece tek tip gaz ile doldurulursa, tüm pozitif iyonlar aynı özelliği taşır. GM tüp deşarjından sonra pozitif iyonlar katoda ulaştığında katot yüzeyinden elektron koparabilirler. Bu serbest elektronlarda ikinci deşarja neden olur. Bu durum sürekli ilave palslar oluşturacaktır. Sayıma eklenen bu palsleri engellemek için iki yöntem uygulanır.

Harici sönümlenme olarak adlandırılan yöntem elektronik bir devre ile gerçekleştirilir. İlk palsten sonra tüp gerilimi birkaç yüz mikro saniye kesilir veya düşürülür. Bu işlem basit olarak tüpü besleyen devrenin direnç değeri

yükseltilecek yapılmaktadır. Tipik olarak tüp besleme direnci 10^8 ohm olarak seçilir. Böylelikle yük toplama süresi milisaniye düzeylerine çıkarılır. İlk deşarj sonrasında tüpün tekrar çalışma gerilimine ulaşma süresi uzatılmış olur. Böylelikle, bir palsin hemen ardından katot yüzeyinden kopacak herhangi bir elektron tarafından ek palslerin oluşumu engellenir. Bu yöntemin dezavantajı sayım hızının düşürmesidir (Tsoulfanidis, 1995; Knoll, 2000).

İç sönmüleme ise, asal gaz %5-10 oranında ikinci bir gaz eklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Eklenen gaz daha düşük iyonlaşma enerjisine ve daha karmaşık molekül yapısına sahiptir. Asal gaz iyonları katoda doğru ilerlerken söndürücü gaz moleküllerine çarparak enerjilerini aktarırlar veya enerji kaybederler. Katoda ulaştıklarında enerjileri azalmış olup ve katot yüzeyinden elektron koparamazlar. Böylelikle ikinci çığ oluşumu engellenmiş olur. Aynı zamanda söndürücü gaz, *UV* fotonlarını soğurur. Bu olay, orantılı dedektörlerde daha çok istenen bir özelliktir (Knoll, 2000).

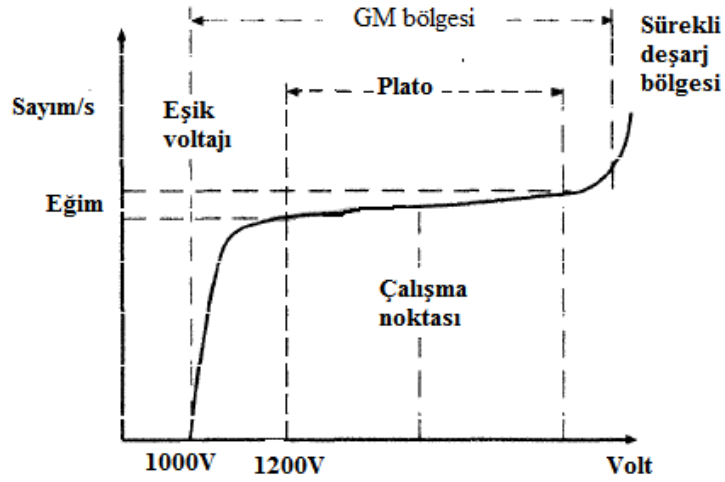
Bir pals oluşumundan hemen sonra, ikinci bir iyonlaşma olduğunda detektör bunu algılayamaz. Detektörün çalışmadığı bu zamana, ölü zaman bazen de *resolving time* olarak adlandırılır. GM tüplerinde ölü zaman 50 ile 100 μs arasındadır. Dedektörde, ölü zamanın bitiminin hemen ardından gelen palslerin genliği düşük olur. Pals genliği belirli bir seviyeye ulaşması için geçen süre yenilenme zamanı olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 GM dedektöründe ölü zaman ve pals oluşumu (Knoll, 2000).

Şekil 2.14’de verilen örnek GM tüpünde gerilim eşik gerilimi olan 1000 V değerine ulaştıktan sonra pals gözlemlenmeye başlar; gerilim artırıldıkça hem pals boyu hem sayım miktarı artmaktadır. Gerilim değeri 1200 V’a ulaştığında, pals

genliği ve sayım en yüksek değerine ulaşır. Gerilim 1200 V'dan sonra arttırılmasına rağmen sayım ve pals genliği çok az değişmektedir. Eğri, uygulanan gerilim aralığında yatay biçimde olup bu bölgeye GM platosu adı verilmektedir. Gerilim belirli bir değerden sonra yükseltilmesi, gaz deşarjına neden olur. Geiger tüpleri genelde plato eğimine göre değerlendirilir. Eğimin düz olması, sayım hızının artırılması ve sönümlenimin iyi yapılmasına olanak vermektedir. Sönümlenme gazı organik olan tüplerde, plato eğimi düze yakındır. Gerilimin her 100 V artışında eğim %2-3 değişmektedir. Sönümlenme gazı halojen olan tüplerde platonun eğimi daha büyüktür. Fakat halojen tüplerin ömrün uzun ve çalışma voltajlarının düşük olması, tercih edilmelerini sağlamaktadır. Örneğin Argon-Alkol karışımı GM tüplerinin çalışma gerilimi en az 1000 volt civarında olması gerekirken, Neon-Brom karışımı tüplerde bu aralık, 200-300 V civarına kadar düşmektedir.



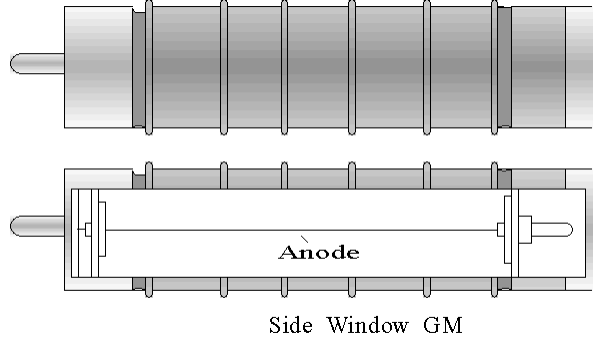
Şekil 2.14 GM platosu (Centronic, 2018).

2.3.4 GM tüp tasarımları

Orantılı tüpler ile Geiger tüplerinin genel tasarımları benzerdir. Çığ bölgesi oluşturabilmek için ince anot teli kullanımı tüm Geiger tüp tasarımlarında kullanılan ortak bir yöntemdir. Orantılı dedektörlerde dikkat edilmesi gereken üniform elektrik alanı, Geiger tüplerinde dikkat edilmez.

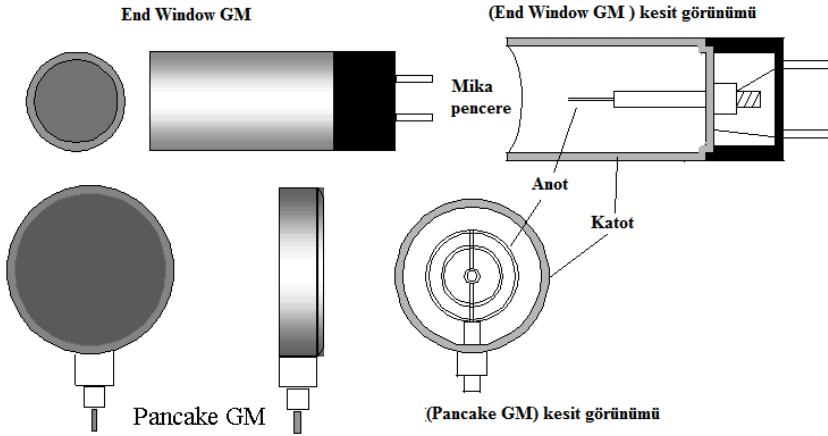
GM tüpler; side window, end window ve pancake olmak üç farklı tipte tasarlanmaktadır (ORAU, 2018).

Side window GM tüp; Yaygın olarak gama ışınlarının dedeksiyonunda kullanılır. Silindir duvar kalınlığı ve yoğunluğu düşük olması durumunda, 300keV'den daha yüksek enerjili betaların sayımında kullanılabilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Silindirik yapıdaki GM tüp kesit görünümü(ORAU, 2018).

Pancake GM tüp; Yassı silindir kapalı bir kap şeklinde olup pencere yüzeyi ince ve yoğunluğu düşük ($1,5 - 2,0 \text{ mg/cm}^2$) mika, Berilyum ve benzeri bir malzeme ile kaplıdır. Anot şekli, giriş penceresine paralel düzlemde, dairesel çembersel tellerden oluşmaktadır. Genellikle betaların tespitinde kullanılır (Şekil 2.16) .



Şekil 2.16 End window ve pancake tipi Geiger tüpleri (ORAU, 2018)

End window GM tüp; Silindirin bir tarafının giriş penceresi olan, katot olarak genelde çelik (416) veya iç yüzeyi metal kaplanmış cam kullanılır. Pencere yoğunluğu $1,5 - 2,0 \text{ mg/cm}^2$ civarında genellikle mika veya Berilyumdur Berilyumdur (ORAU, 2018). GM tüplerinin basıncı atmosfer basıncının altında

olduğundan, pencereleri bu basınç farkına dayanabilecek kadar sağlam olmalıdır. Penceresi açık olan tasarımlar çoğunlukla beta aktivite ölçümünde kullanılır. Bununla birlikte tüm GM tüplerinde olduğu gibi gama ışınları da dedekte edilebilir.

2.4 Sintilasyon Dedektörleri

Sintilasyon dedektörleri iyonize radyasyonun katı, sıvı veya gaz ortamlarından geçişinde ortam atomlarını uyarması ve uyarılan atomlar tekrar taban seviyelerine dönüşlerinde ışık fotonları yayma prensibine dayalı çalışmaktadır. Uyarılmış atom sayısı ortam içinde yüklü parçacığın kaybettiği enerjiyle orantılı olup, oluşan foton sayısı da bu enerjiyle orantılıdır. Radyasyon tarafından uyarılmasıyla görünür bölgede ışık yayan maddelere sintilatör denir. Sintilatörler kristal, plastik, sıvı ve organik olabilir. Sintilatörden yayılan görülebilir ışıklara sintilasyon denir. Sintilatörde oluşan ışık miktarı çok küçüktür ve ölçülebilmesi için yükseltilmesi gerekmektedir. Sintilatör ışığı, foto çoğaltıcı tüp (fotomultiplier tube - PMT) veya fotoçoğaltıcı tüp olarak bilinen cihazla yükseltilerek elektrik palsine dönüştürülür. Fotoçoğaltıcı tüpün yükseltme katsayısı 10^6 civarındadır (Tsoufanidis, 1995).

2.4.1 İnorganik (kristal) sintilatörler

İnorganik sintilatörlerin çoğu, alkali metallerin kristalleridir. Örnek olarak NaI(Tl), CsI (Tl), CaI(Na), LiI(Eu) ve CaF₂ (Eu). Parantez içindeki elementler safsızlık aktivatörleridir. Kristal içinde aktivatörler çok küçük bir oranda olmasına rağmen lüminesansı belirlerler. NaI deki Talyum (Tl) katkı oranı bir mol bazında 10^{-3} dür.

NaI(Tl), gama ışınlarının dedeksiyonunda en çok kullanılan sintilatördür. Yüksek atom numarası ve büyük hacimli olması gama verimini çok yükseltmektedir. Emisyon spektrum piki 410nm ve inorganik sintilatörler içerisinde en yüksek ışık çevrim verimine sahip olandır. NaI(Tl) dedektörlerin termal şoklara ve ısıya duyarlı olması uygulamalarda istenmeyen özelliklerdendir. Aynı zamanda hidroskopik olmasından dolayı atmosferik ortamlardan yalıtılarak kullanılmaktadır.(Cuesta et al., 2018).

CsI(Tl), NaI(Tl) göre daha yoğun ve daha yüksek atom numarasına sahip olduğundan gama verimi yüksektir. Işık çevrimi oda sıcaklığında, NaI(Tl)

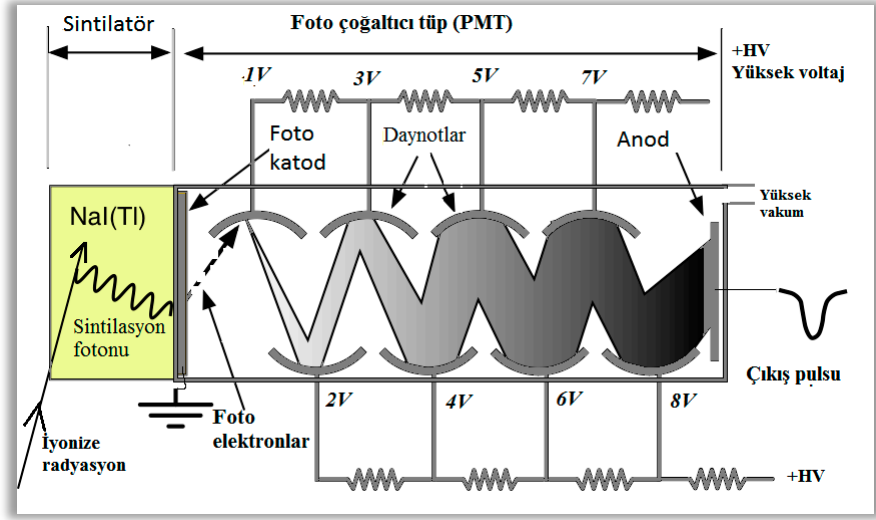
kristalinin %45' i kadardır. Soğutulduğunda (77K) ışık çevrim verimi yükselir. Emisyon spektrumu 420-600nm aralığındadır. CsI kristali higroskopik değildir ve ani ısı değişimlerinden etkilenmez bu sebeple uzay çalışmalarına uygundur.(Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc; 2019)

Organik Sintilatörler; Verimli olan organik sintilatörler aromatik bileşik sınıfına aittir. Benzoit halkalarından oluşan düzlemsel moleküllerden meydana gelmektedirler. Organik sintilatörlerin önemli avantajı, cevap verme sürelerinin (<10ns) çok kısa yani çok hızlı olmalarıdır.

Plastik sintilatörler; Kolayca istenen şekil verilebilir. Su, hava ve birçok kimyasala karşı duyarsız olduklarından doğrudan radyoaktif numune ile temas halinde kullanılabilirler. Emisyon bölgeleri 350–450nm arasındadır. Yaygın olarak kullanılan plastik sintilatörlerin ticari isimleri Pilot B, Pilot Y, NE 102 ve NE 110 dur. (Garwin, and Roder, 1971; Scionix, 2019)

2.4.2 Fotoçoğaltıcı tüp (PMT)

Foto çoğaltıcı tüp veya foto tüp sintilasyon dedektörünün bir parçasıdır. Foto tüpler aslında çok hızlı yükselticilerdir. Görünür ışık sinyalini 10^{-9} saniyede, yaklaşık 10^6 kat yükseltirler. Fotoçoğaltıcı tüp, içinde foto katot, daynotlar ve anot yer almaktadır (Şekil 2.14). Foto katot, üzerine ışık düştüğünde elektron emisyonu yapabilen materyalden üretilir. Sintilatör tarafından salınan ışık, önce foto katoda çarparak elektron salınmasına neden olur. Serbest kalan elektronlar birinci daynotlar tarafından çekilir. İlk daynota çarpan elektronlar, yüzeyden yeni elektronlar koparır ve daha yüksek pozitiflikte olan, ikinci daynot tarafından hızla çekilir. Buradan da yeni elektronlar kopar ve sonraki daynota doğru hızla sürüklenirler. Elektronlar zincirleme olarak bir daynotdan daha yüksek potansiyeldeki diğerine hızla sürüklenerek çoğalmakta ve anot ucuna ulaştıklarında ölçülebilir elektrik palsi oluştururlar. Tüp içinde yer alan daynotlar arasındaki gerilim farkı 100V civarındadır. Palslerin genliği gelen radyasyon enerjisiyle orantılıdır. Anot ucundan alınan sinyal ön yükselteç devreleri ile yükseltildikten sonra çok kanallı analizörde (MCA) enerji ayrımı yapılır. Sintilatörler dedektörlerinin en önemli özelliği her parıldamada çıkan fotonların sayısının, gelen radyasyonun enerjisiyle orantılı olmasından dolayı enerji ölçümü yapabilmeleridir.



Şekil 2.14 (NaI(Tl)) kristal sintilatör dedektörünün çalışma prensibi (FIU, 2019).

2.5 Yarı İletken Dedektörler

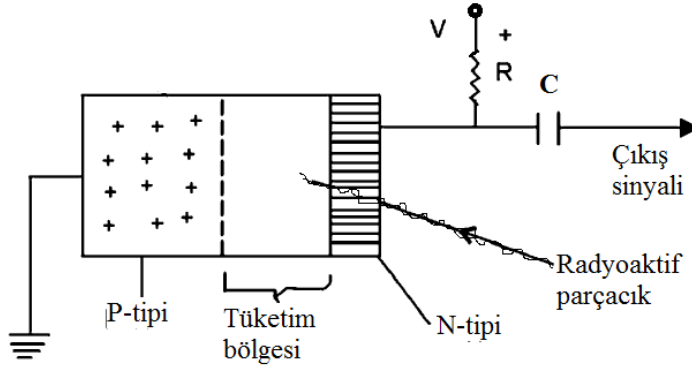
Nükleer radyasyon dedeksiyonunda yarı iletken dedektörler 1960'ların başında kullanılmaya başlandı. Önceleri kristal dedektör olarak adlandırılmasına rağmen, bugünkü modern dedektörlere, yarıiletken veya katı hal (solid-state) dedektörler denilmektedir.

Katı hal dedektörleri,

- Çok yüksek enerji çözünürlüğü,
- Çıkış pals yüksekliğinin gelen radyasyon enerjisi ile doğru orantılı olması,
- Yük toplanma bölgesinin konumsal olarak saptanabilmesi,
- Gazlı dedektörlere göre yoğunluğunun yüksek olması, boyutlarına göre verimlerinin yüksek olması,
- Özel geometrik yapılarda üretilebilmeleri,
- Gazlı dedektörlerle karşılaştırıldığında çok hızlı yükselen pals zamanı (<10 ns),
- Vakum altında çalışabilmeleri,
- Manyetik alandan etkilenmemeleri

gibi birçok önemli avantaja sahiptirler. Bunlara karşılık radyasyondan hasar görek performansları zamanla düşmesi ve genel olarak küçük boyutlarda olmaları ise dezavantajlarıdır.

Yarı iletken dedektörünün çalışması: Yarıiletken dedektörler, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (deşik) taşıyıcıları fazla olan n ve p tipi malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilir. Ters kutuplama altında p-n eklemünde, fakirleşmiş (depletion) bölge olarak adlandırılan, elektron vedeşiklerden arınmış bir hassas bölge oluşur. Dedektör veriminin yüksek olması hassas bölgenin derinliğine bağlı olmaktadır. Bir foton, eklem bölgesi içinden geçtikçe, bir elektron, valans bandından iletim bandına yükseltilir ve elektron-deşik çifti üretilmiş olur. İçerdiği elektrik alan, elektronları eklem pozitif,deşikleri de negatif tarafa doğru sürükler. Yarıiletken dedektörlerin basit şematik gösterimi Şekil 2.18'de verilmiştir. Sürüklenmeler dolayısıyla oluşan etkiler sayım sistemi ile sayılabilen bir puls meydana getirecektir. Yarıiletken dedektörlerin en yaygın kullanılanları, Ge(Li), Si(Li) dedektörleridir.



Şekil 2.18 Yarı iletken dedektör (Kamal, 2014)

Gazlı dedektörlerde elektronlar iyonlardan bin kat daha hızlı hareket edebilirken, yarıiletken dedektörlerde elektronlardeşiklerden iki veya üç kat daha hızlı hareket eder. Bu dedektörün hızını artırır. Yarıiletken dedektörlerde eklem bölgesi birkaç milimetre olduğu için yük toplanma süresi 10^{-7} saniye civarındadır. Detektör yeniden sıfırlandığında yük taşıyıcı kayıpları meydana gelebilir. Bu kayıpların nedeni kristal örgü kusurları ve radyasyonun yarattığı tuzak bölgeleridir. Bu durum dedektörün ömrünü kısalmasına neden olur.

Yüzey engelli (surface-barrier) dedektörler: Parçacık tipi radyasyonun spektroskopisi uygulamalarında kullanılırlar. Yüksek saflıkta silikon kristal yüzeyinde p-tipi bölge oluşturulması ile meydana gelir. Yüzey alanı 1 ile 5 cm^2 civarındadır. Daha geniş yüzey alanına sahip dedektör kristali üretilebilmesine rağmen, dedektör kapasitansı arttığı için enerji çözünürlüğü düşmektedir. Gelen parçacık enerjisi dedektör kalınlığını geçmemesi gerekmektedir. Bu durum

yüksek enerjili parçacıkların ölçümünü sınırlamamaktadır. 2 mm kalınlığında aktif tabakası olan bir dedektör ile ölçülebilecek maksimum enerji, elektronlar için 1.2 MeV, protonlar için 17 MeV, alfalar için ise 90 MeV'dir (ORTEC, 2019).

Lityum katkılı Si(Li) ve Ge(Li) dedektörler: Dedektörün aktif bölgesi lityum iyonları emdirilerek genişletilir. Böylece yüksek enerjili parçacıkların ölçümü için yeterli derinlik sağlanır. Lityum genellikle p-tipi silisyum ve germanyum kristaline katkılanır. Dedektörün bir yüzeyinden diğer yüzeyine doğru difüze edilen lityum atomları; Si(Li) dedektörde 5 mm ye, Ge(Li) dedektöründe 12mm kadar derinlik artışı sağlar. Lityum katkılı dedektörler 77K sıcaklıkta tutulması gerekir aksi halde lityum iyonları dedektörün tüm parçalarına yayılır ve dedektör bozulur (U.S.NRC, 2010).

Germanyum (Ge) dedektörler: Yüksek saflıkta Germanyum (HPGe) üretilmesi, lityum katkısı olmadan dedektör üretimini mümkün kılmıştır. Dedektör basitçe bir germanyuma parçasına voltaj uygulanarak oluşturulur. Lityum katkılı dedektörlere göre en büyük avantajı, oda sıcaklığında saklanabilmeleri ve sadece çalışma esnasında soğutulmaları (77K) gerekliliğidir. Germanyum dedektörlerinin bir avantajı da özel uygulamalar için farklı geometrilerde üretilmeleridir.

CdTe ve HgI₂ Dedektörleri: Lityum katkılı ve Ge dedektörlerinin soğutulmaları gerekliliği, küçük alanlarda uygulama problemlerini beraberinde getirmektedir. Bu sorunu aşmak için yapılan çalışmalar sonunda, 1978 de geliştirilen, CdTe ve HgI₂ dedektörleri yüksek atom numaraları ve enerji bant aralığının geniş olması nedeni ile oda sıcaklığında çalışabilmektedir. Bu dedektörlerin foto elektrik absorpsiyon katsayısı germanyumdan 5 kat, Silisyumdan 1000 kat daha büyüktür. Bu sebeple gama dedeksiyonunda verimleri yüksektir. CdTe ve HgI₂ dedektörleri, uzay gözlemlerinde, nükleer reaktörlerde, taşınabilir medikal cihazlarda ve medikal görüntüleme sistemlerinde kullanılırlar.(Whited and Schieber, 1979)

PIN diyot dedektörler: çeşitli kristal yapılarda olmakla beraber yaygın olarak silisyum kullanılır. PIN diyot dedektörler -55°C ile +150°C aralığında çalışabilir. Radyasyon hasarı düşük olup ömürleri uzundur. Betalar, X ve gama ışınlarının dedeksiyonunda kullanılırlar. (U.S.NRC, 2010)

Tablo 2.1’de dedektörlerin farklı özellikleri, kullanım alanları ve avantajları birlikte değerlendirilmiştir.

Tablo 2.1 Detektör çeşitleri ve özellikleri, (Akkaş A., 2013)

Özellik	Geiger-Muller	İyon Odalı	Sintilasyon	Orantılı Sayaç	Yarıiletken
Radyasyon Tipi	α , γ , β ve X ışınları	α , γ , β ve X ışınları	α , γ , β , nötron ve X ışınları	α , γ , β , nötron ve X ışınları	α , γ , β ve X ışınları
Ortam	Gaz	Gaz	Sıvı, katı ve gaz	Gaz	Katı
Resolving Time	10E-4	10E-4	10E-7	10E-6	10E-9
Kullanım alanları	<ul style="list-style-type: none"> •Düşük şiddetteki radyasyon alanlarında •Alan monitörü •Personel elektronik desimetre •Düşük seviye kontaminasyon kontrolü 	<ul style="list-style-type: none"> •Orta ve yüksek şiddetteki radyasyon alanlarında •Alan monitörü 	<ul style="list-style-type: none"> •Düşük seviye kontaminasyon kontrolü •Trityum için LSC 	<ul style="list-style-type: none"> •Düşük seviye kontaminasyon kontrolü •Nötron ölçümlerinde 	<ul style="list-style-type: none"> •Laboratuvar •Bazı alan uygulamalarında
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> •Çıkış sinyali büyük •Yeterli seviyede hassasiyet •Ucuz ve dayanıklı 	<ul style="list-style-type: none"> •Enerji bağımlılığı düşük •Kullanması kolay 	<ul style="list-style-type: none"> •Yüksek hassasiyet •Hızlı cevap •İyi enerji çözünürlüğü 	<ul style="list-style-type: none"> •Hızlı cevap 	<ul style="list-style-type: none"> •Çok iyi enerji çözünürlüğü •Çok küçük ölü zaman
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> •Büyük ölü zaman •Enerji bağımlılığı 	<ul style="list-style-type: none"> •cevap verme süresi uzun •Düşük hassasiyet 	<ul style="list-style-type: none"> •Kırılgan •Pahalı 	<ul style="list-style-type: none"> •Stabil yüksek voltaj kaynağı gereksinimi 	<ul style="list-style-type: none"> •Büyük miktarda çıkış sinyalinin yükseltilmesine ihtiyaç var

2.6 Mikrodenetleyiciler

Mikroişlemcili bir sistemi oluşturan temel bileşenlerden işlemci, bellek ve G/Ç birimlerinin, bazı özellikleri azaltılarak tek tümleşik devre olarak üretilmesine mikrodenetleyici (microcontroller) denilmektedir. Kontrol ve denetim gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiş olan mikrodenetleyiciler, mikroişlemcilere göre çok daha basit ve ekonomiktir. Günümüzde endüstriyel uygulamalarda kontrol, yönetim ve denetim amacıyla yaygın olarak mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Mikrodenetleyici sistemlerin özellikle ihtiyaç duyulan kontrol ve denetim uygulamalarına özgü donanım özellikleri ile üretilmektedir. Endüstriyel alanda kullanılan

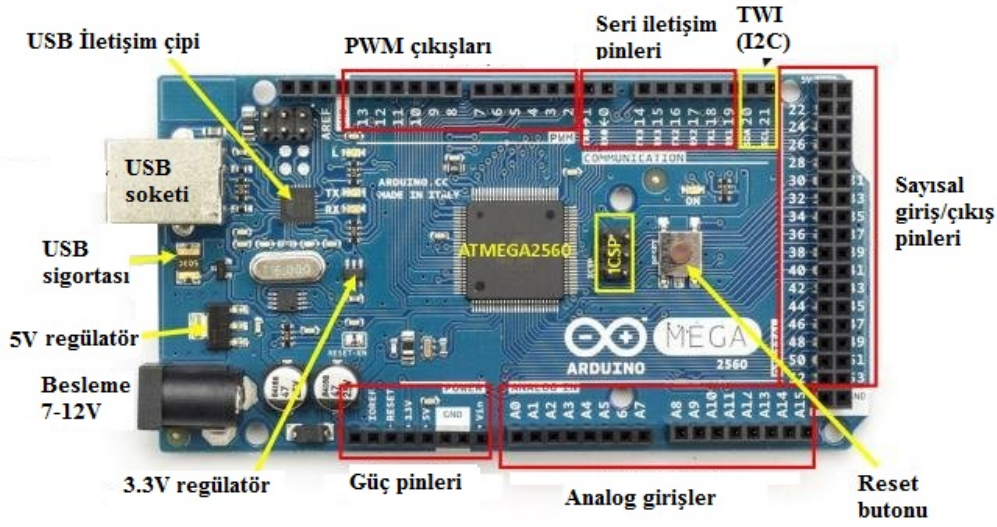
mikrodenetleyiciler; belirli bir sayıda programlanabilir sayısal ve analog Giriş/Çıkış portuna, dahili belleğe (ROM, RAM ve EEPROM vb.), harici kesme birimine, seri Giriş/Çıkış (senkron ve asenkron) ara yüzü gibi donanımlar tümleşik devre içinde gömülü olarak yer almaktadır. Böylece kontrol ve denetim amaçlı endüstriyel uygulamalar için gerekli birçok elektronik devre ve donanımı hazır halde kullanıma sunulmuştur. Bundan dolayı günümüzde küçük ve büyük ölçekli birçok yönetim ve kontrol sisteminin geliştirilmesinde mikrodenetleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Basit bir elektronik kontrol sisteminden bugün 3 boyutlu yazıcı ve robot sistemlerin tasarımında mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Tez çalışması kapsamında kullanımı basit, esnek bir donanım yazılım mimarisine sahip açık kaynaklı elektronik geliştirme kartı olan Arduino platformu seçilmiştir.

2.6.1 Arduino Mega 2560

Arduino, Atmel'in AVR serisi mikro denetleyicileri üzerine kurulmuş, prototip sistem oluşturulmasını kolaylaştıran, ek Giriş/Çıkış genişleme uçları ve bu uçlara takılabilen hazır modüllere (shield) sahip açık kaynak donanım platformdur (Arduino,2018). Arduino Mega 2560, ATmega2560 tabanlı bir Arduino kartıdır (Şekil 2.19). 54 sayısal Giriş/Çıkış pinine sahip olup bunların 14 tanesi darbe genişlik modülasyon (PWM) çıkışı olarak kullanılabilir. Ayrıca, 16 analog girişi, 4 adet seri port (Universal Asynchronous Receiver Transmitter UART), 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, adaptör girişi ve bir reset butonu kart üzerinde yer almaktadır. Diğer Arduino kartları gibi USB üzerinden ve hem de harici bir DC adaptör üzerinden beslenebilmektedir. Arduino ATmega2560 kartının özellikleri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2 ATmega 2560 kartının genel özellikleri

Çalışma voltajı	5V
Sayısal Giriş/Çıkış pin sayısı	54 (14 pin Pals Genişlik Modülasyonu (PWM) destekli)
Analog giriş	16
Flash bellek	256 KB (8 KB bootloader için)
SRAM ve EEPROM	4 KB ve 8 KB
Çalışma frekansı	16 MHz



Şekil 2.19 Arduino Mega 2560 kartı

2.7 Adım (Step) Motoru

Adım motorları girişlerine uygulanan pals sinyallerine karşı analog dönme hareketi üreten, bu dönme hareketini adım adım ve çok hassas kontrol sağlayan sabit mıknatıs kutuplu motorlardır. Adım motorları rotor, stator ve rulmanlardan oluşmaktadır. Rulmanlar, rotora bağlı şaftın mekanizmasının rahat hareket etmesini sağlarlar. Statorun üzerinde birden fazla kutup bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan kutup sayısı sekizdir. Kutupların polaritesi elektronik anahtarlar vasıtasıyla sürekli değişir. Her bir elektrik palsy rotorun belli bir açı kadar (bir adım) dönmesine neden olur. Eğer gerilim sadece bir bobine uygulanırsa manyetik alanın etkisiyle rotor sabitlenecektir. Bu durum motorun kilitlenmesinde kullanılır Rotorun mıknatıslılığı ya sabit mıknatıs ile ya da dış uyarım teknikleri oluşturulmaktadır.

Günümüzde adım motorları endüstriyel kontrol sistemlerinde, özellikle hareket ve konum kontrolünde tercih edilmektedirler. Yazıcılar, harddisk sürücüler, kart okuyucuları gibi bilgisayar çevre cihazlarında, ayrıca sayısal kontrol sistemlerinde üç boyutlu yazıcılar, CNC tezgahlarında, proses kontrol sistemlerinde, robotik sistemlerde ve ileri düzey endüstriyel sistemlerde adım motorları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Adım motorları,

- Sayısal giriş işaretleriyle sürülebildiği için bilgisayar veya mikro denetleyicilerle kolayca programlanabilmesi,
- Adım motorlarının yön ve devir sayısı gibi değerlerinin Mikrodenetleyici veya bilgisayarla kontrol edilebilmesi, motorun konumunun bilinebilmesini sağlamaktadır. Bu özelliği hassas konum kontrolüne izin vermesi,
- Açık çevrim olarak çalışma durumunda bile iyi sonuç vermesi, basit ve az maliyetle hız, ivme veya konum kontrolünün gerçekleştirilebilmesi,
- Uzun süreli dur-çalış yapabildiği, çalışma esnasında ani durdurma, ters yönde sürülebilmesi ve aşırı yüklemeye dayanıklı olması,
- Mekanik yapısı dolayısıyla bakım gerektirmemesi, gibi bir çok üstün özelliklere sahiptirler(Erdal, H., 2019).

Diğer taraftan,

- Rotora uygulanan kuvvet sürekli formda olmadığından, rotordan alınan hareket sabit değil, kesiklidir. Bu durum motorun sarsıntılı çalışmasına neden olur.
- Aşırı yüklenme veya yüksek hızlarda çalışma durumlarında açık çevrim kontrol ediliyor ise yani konum bilgisi kontrol sistemine geri verilmiyorsa konum hatası oluşturabilme,
- Elde edilebilecek çıkış gücü ve momentin sınırlı Olması gibi kısıtları bulunmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011).

2.7.1 Adımmotor kontrolünde kullanılan terimler

Tek adım tepkisi / cevap süresi / (single step response); Motor fazlarından (sargılar) biri uyarılmış durumdaysa, motor kararlı bir adım konumundadır. Bu fazın uyarılması kesilip yeni bir faz uyarılırsa rotor bir adım atacaktır. Rotor konumunun zamana göre değişimi “tek adım tepkisi” olarak tanımlanır. Bir başka deyişle motorun girişine bir komut sinyali uygulandıktan sonra motorun adımlara cevap vermek için geçen zamana (T) “tek adım tepkisi”, “adım tepkisi” ya da “cevap süresi” denir.

Bu süre hem motor parametrelerine hem de motorun sürücü devresine bağlıdır ve yaklaşık olarak milisaniye (ms) civarlarındadır. Adım motorlarından

maksimum performans elde edebilmek için tek adım tepkisindeki aşım ve salınımların azaltılması ve yerleşme zamanının kısaltılması gerekir. Bu nedenle tek adım tepkisinin iyileştirilmesi adım motorlarının kontrolünde çok büyük öneme sahiptir.

Adım oranı (stepping rate / starting pulse rate); Bir saniyede rotorun yapabildiği adım sayısıdır. Bu adım sayıları, tipik olarak saniyede 300 ila 800 arasında olabilmektedir.

Adım açısı (step angle); İlgili stator kutup sargısına enerji uygulandığında rotorun döndüğü açıdır. Günümüzde 90° den 0.72° 'ye kadar değişen aralıkta adım açılarına sahip motorlar üretilmektedir.

Adım açısı doğruluğu (step angle accuracy); Rotorun yaptığı her bir adımdaki hata miktarını gösterir. Bu parametre genellikle bir yüzde ile verilir. Rotor bir adım döndüğünde meydana gelen toplam hata oranını gösteren bu parametrenin yazılması önemlidir. Bu hata değeri kümülatif(birikimli) değildir. Yani rotorun yaptığı her adım ile bu hata miktarı toplanarak gitmez. Rotorun gerçek hızı, adım açısı ve adım hızına bağlıdır.

Aşım (overshoot); İlgili stator kutup sargısı enerjilendirildiğinde, rotorun harekete başlayıp stator kutup eksenine geldiğinde durması adım motorundan istenen çalışma biçimidir. Ancak, rotor belirli bir hızla hareket ettiğinde, rotor stator kutbunun eksenine geldiğinde duramaz, bir miktar ileri gider, buna “aşım” (overshoot) adı verilir. Aşımdan sonra kutbun etkisi ile tekrar geri gelir ve sönümlü osilasyon şeklinde bir davranış sergiler. Bu osilasyonu önlemek için ya sürtünme artırılır ya da frenleme mekanizmaları kullanılır.

Enerjisiz tutma momenti (detent torque); Motor enerjisiz iken rotor-stator dişlerindeki etkileşimden dolayı oluşan moment demektir. Diğer bir ifadeyle sargılara besleme gerilimi uygulanmıyorken, adım motorunun milini döndürmek için gerekli olan maksimum moment miktarıdır.

Enerjili tutma momenti(holding torque); Holding torque, “tutma torku” ya da “statik tork” olarak da bilinir. Sargılardan sadece birisinden nominal değerde akım akıtılıyorken milden alınan torku ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle enerjili halde motor duruyorken üretilen maksimum tork miktarıdır.

Sürekli rejimdeki maksimum yük momentini (pull-out torque); Kalkıştan sonraki yük momentidir. Bu parametre de motor hızına bağlı olarak değişmektedir ve sürekli rejimde maksimum yük momentini eğrisinden bahsedilir. Hız arttıkça tork azalır.

Stator sargı gerilimi; Stator sargı gerilimi değeri, rotor hareketsizken tutma momentinin oluşturulması için ihtiyaç duyulan gerilim değeridir. Bu gerilim değeri etiket akımına bölünürse ilgilenilen fazın sıcak sargı direnci, dirence bölünürse sargı akımı bulunmuş olur. Sargıdan nominal akımdan fazla akım geçirilmemelidir(Erdal, H., 2019).

2.7.2 Adım motor çeşitleri ve uyarım teknikleri

Rotor yapısına göre adım motorları üçe ayrılır;

- Değişken manyetik dirençli (Variable Reluctance).
- Sabit mıknatıslı (Permenant Magnet).
- Melez yapı (Hybrid).

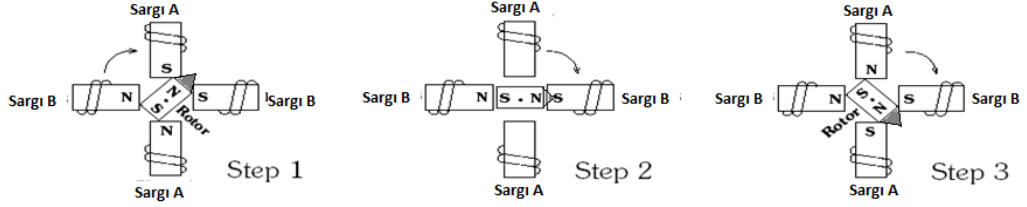
Uygulamalarda en çok değişken relüktanslı ve sabit mıknatıslı step motorlar kullanılmaktadır. (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011)

Adım motorlarında rotor hareketini sağlamak için, stator sargılarının ürettiği manyetik alanın yönetilmesi ve rotor akısının sürülmesi gereklidir ki bu işlem sargılardan akan akımın kontrol edilmesiyle mümkündür. Adım motorunun uyarım teknikleri aşağıda verilmiştir.

Tam adımlama: Adım motorları için sıklıkla kullanılan sürme yöntemidir. İki faz sürekli aktif durumdadır. Bu yüzden motor en yüksek anma momentini sağlar. Bir faz (sargı) kapatılır kapatılmaz, diğer faz enerjilendirilir. Örneğin adım açısı $1,8^\circ$ olan bir motorda tam bir tur döndürmek için 200 uyarım pulsü göndermek gereklidir. Bu modda iki yöntem kullanılabilir. Motor adım açısı kadar döndürülmesi sadece tek sargının kullanılması ya da iki sargının birlikte kullanılması ile yapılır. İki sargı birlikte kullanılması tork değerini artırır.

Yarım adımlama: Bu yöntemde sürme işlemi, çift sargı ve tek sargı birbirini takip eden sırayla anahtarlanarak yapılmaktadır. Bu sayede adım açısı yarıya düşer ve açısal çözünürlük artar. Ancak motor yarım adım modunda iken

tam adım modundan %15 daha az tork oluşur. Bu durum akım artırılarak telafi edilebilir. Tam adımla veya tek faz uyarımla sürülen bir motor, herhangi bir elektronik değişiklik yapılmadan yarım adımlama ile de sürülebilir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 90° adım açısına sahip bir motorun, yarım adım (half-step) modu ile 45° lik adım atması (Erdal, H., 2019)

Mikro adımlama (microstepping): Stator sargılarından geçen akımlar sinüs eğrisi şeklinde olduğu için "sinüs kosinüs mikro adımlama" olarak da adlandırılır. Diğer yöntemlerde motor, bir adımdan diğerine geçerken sarsıntı meydana gelir. Ancak mikro adımlamada motor hareketi daha pürüzsüzdür. Adımlar daha küçüktür. Her bir adımda motora gönderilen akım kontrol edilerek çözünürlük artırılabilir. Adım oranları 1/4, 1/8, 1/16 olan sürücü modülleri bulunmaktadır. Bu çözünürlük sürtünme, yapışma, mekanizmadaki parçalar arasındaki boşluktan kaynaklanan hareket kaybı gibi sebeplerden ötürü sınırlıdır.

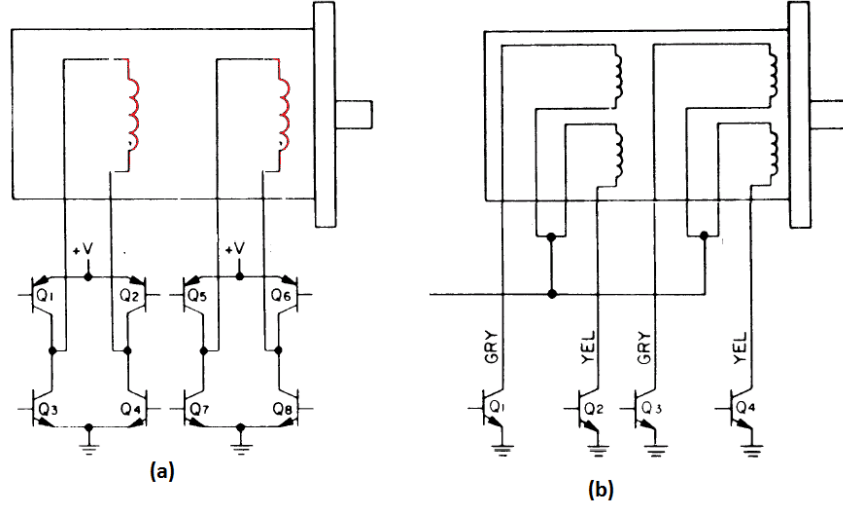
2.7.3 Adım motoru sürme teknikleri

Adım motorlarını sürmek için güç kaynağı, sayısal kontrollü anahtarlama elamanları ve saat pals üretici gibi bazı elektronik çevre birimlerinin olması gereklidir. Ticari sürücü devrelerinde bu modüllerin hepsi gömülü olarak tümleşik devre elemanı içine yerleştirilmiştir.

İki kutuplu sürme (bipolar drive); Dört uçlu motorların sürülmesinde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Her adımda motordaki her sargının akım yönü sıra ile değiştirilir (Şekil 2.18).

Tek kutuplu sürme (unipolar drive); En az 6 ucu olan motorların sürülmesinde kullanılır. Şekil 2.21'de görüldüğü üzere, sargılardan geçen akım

yönü değişmez, sadece aynı sargıdaki bobinin biri kapatılarak diğeri açılır. Bu yöntem sürücüyü basitleştirir fakat motorun torkunu düşürür. Aynı özellikteki bipolar yönleme göre %30 daha az tork meydana gelir.



Şekil 2.21 Adım motor sürme teknikleri, a) bipolar, b) unipolar(Erdal, H., 2019).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

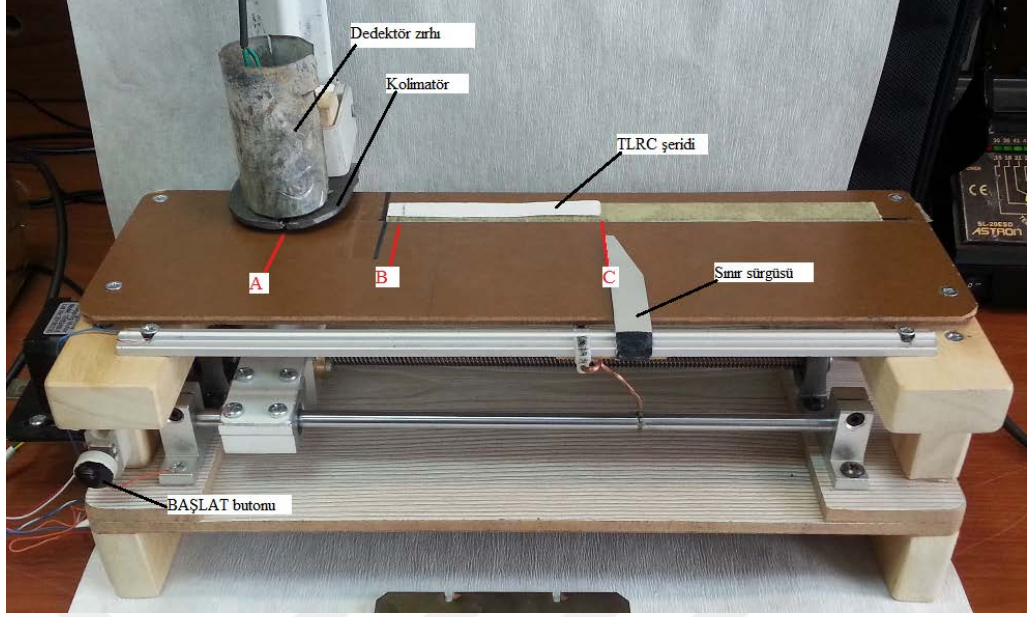
TLRC tarama sistemleri farklı yaklaşım kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu tasarımlardan birisi kramatografi şeridi sabit tutulması ve dedektörün hareket ettirilmesi prensibine dayanmakta diğer bir yaklaşım ise dedektörün sabit tutularak kramatografi şeridinin hareket ettirilmesidir.

Elektronik olarak tarama yapılan TLRC sistemlerinde ise konum hassasiyetine sahip (position sensitive) ve en az taranacak TLRC şeridi boyutunda pencereye sahip dedektör kullanılmaktadır. Dedektör TLRC şeridinin üzerine konumlandıktan sonra tarama yapılmaktadır. Bu tasarım yönteminde hareketli parçalar daha az sayıda olmakla birlikte dedektör sistemi ve dedektör elektronik modülü daha karmaşık yapıda olmaktadır(Jeon, 2017).

3.1 Laboratuvar tipi TLRC Tarayıcı Tasarımı

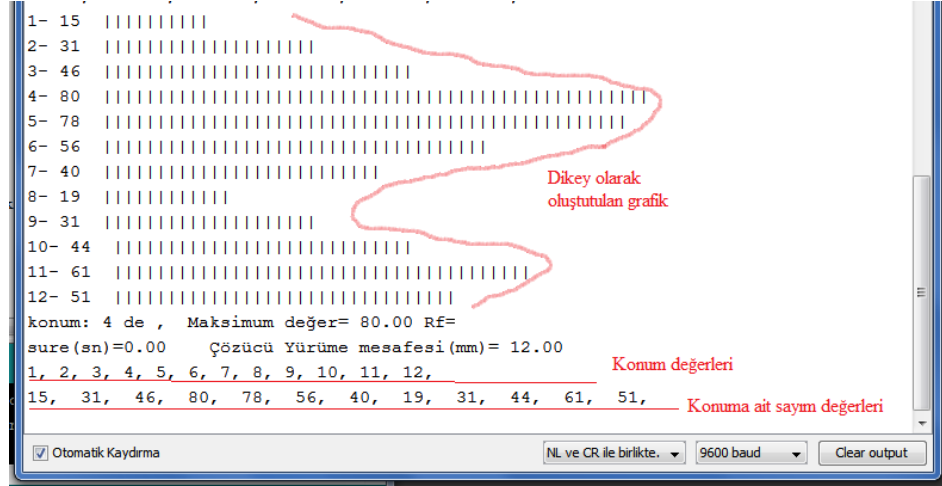
Bu tez çalışması kapsamında tarama mekanizması için yöntem seçiminde mekanik parçalarını kolay temin edebilecek hareketli dedektör tasarımına karar verilmiştir. TLRC tarama mekanizması için gerekli mekanik parçaların kolay temin edilebilecek malzemeler olmasının yanısıra ekonomik boyutu da dikkate alınmıştır. Bundan dolayı, üç boyutlu yazıcılarda kullanılan mekanik parçalar tercih edilmiştir. Böylece mekanik aksamlar kolayca adım motoruna adapte edilmiştir.

Geliştirilen TLRC tarayıcı sistemi Şekil 3.1'de görülmektedir. Burada sistem çalışmaya başladığında dedektör "A" konumunda hazır beklemektedir. Kullanıcı TLRC şeridini başlangıç noktası şekilde "B" noktasındaki çizgi ile işaretli belirtilen konuma gelecek şekilde yerleştirir. TLRC şeridinin yerleştirilmesinden sonra taramanın sınırını belirleyen işaret anahtarı şeridin uç noktası olan "C" hizasına getirilir. Böylece tarama yapılacak şeridin yerleşimi tamamlanmış olup tarama işlemi için "BAŞLAT" düğmesine basılır. Tarama işlemi tamamlandıktan sonra veriler bilgisayara gönderilir ve dedektör otomatik olarak "A" konuma gelir ve sonraki sayım için hazır durumda bekler.



Şekil 3.1 Tez kapsamında geliştirilen TLRC Tarayıcı sistemin görünümü.

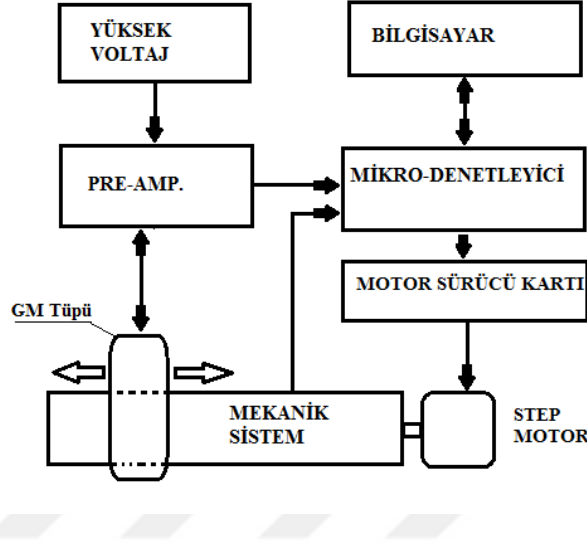
Tarama işleminin tamamlanmasından sonra Arduino IDE programlama arayüzünde tarama verilerine ait bir oluşan veri dökümü Şekil 3.2’ de görülmektedir. Burada konum değerleri ve o konumlara ait sayım değerleri listelenmiştir



Şekil 3.2 Tarama işlemi sonunda Arduino IDE seri port ekranı

Geliştirilen TLRC tarayıcı sistemin blok şeması Şekil 3.3’ de görülmektedir. Bu çalışma da tasarlanan laboratuvar tipi TLRC tarayıcı için geniş kütüphane desteği, açık kaynak donanım ve yazılım platformu olan Arduino Mega 2560 kartı seçilmiştir.

TLRC sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri olan tarayıcı modül için adım motoru tercih edilmiştir. Adım motorunun Arduino kartı ile kontrolü için A4988 step motor sürücü kartı (shield) kullanılmıştır. Böylece adım motorunun hızı doğrusal ve hassas olarak ayarlanabilmektedir. Geliştirilen sistemde sürtünme kuvvetlerinin etkisi haricinde başka kuvvetlerin etkisi olmayacağı için torku yeterli bir adım motoru seçilerek açık döngü yöntemi kullanılarak adım motoru sürülmüştür.

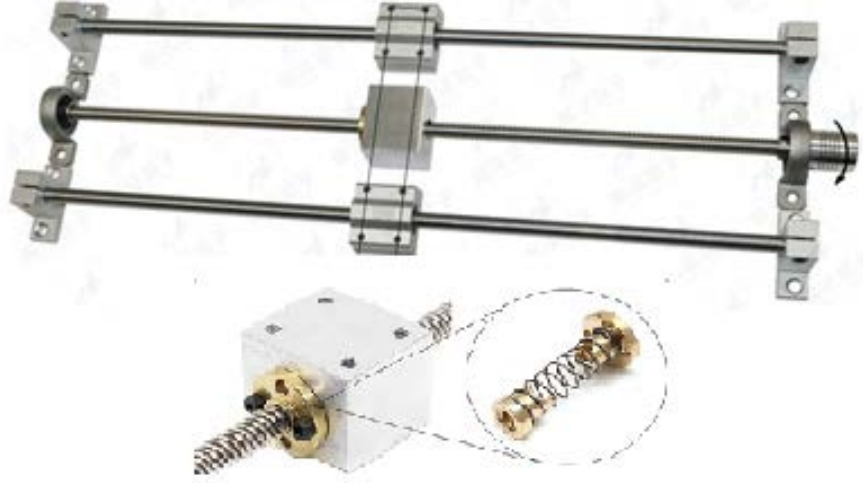


Şekil 3.3 TLRC-Tarayıcı sistemin blok gösterimi.

3.1.1 TLRC Tarayıcı mekanik sistemi

Tasarım sırasında tarayıcı sistemin kurulumu için kolay parça temin etmek amacıyla üç boyutlu yazıcı ray seti seçilmiştir. Burada taranabilecek maksimum mesafe göz önünde bulundurularak rayların boyutları belirlenmiştir. Bu aşamada laboratuvar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 10 cm' lik TLRC şeritlerinin tarayabilecek uzunlukta bir ray seti belirlenmiştir. Tarayıcı sistemin rahat kullanımı ve tarayıcı sistemin diğer parçalarının kolay monte edilebilmeleri amacıyla uzunluğu 30 cm olan ray sistemi seçilmiştir.

Tarayıcı mekanik sistemi oluşturan parçalar Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Mekanik sistem; 2 adet 8mm çapında ray seti ve 30cm uzunluğunda raydan oluşmaktadır. Ray setinde taşıyıcılar, kovan ve motor hareketinin mile ileten kaplin parçaları da bulunmaktadır.

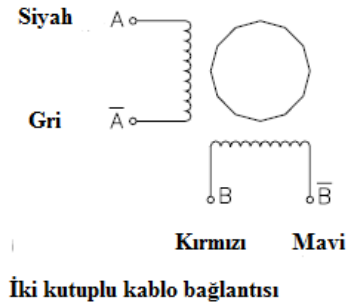
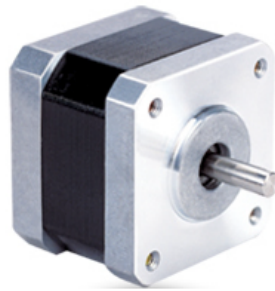


Şekil 3.4 Tarayıcı ray seti ve vidalı mil bağlantısı.

Ray setinin montajı sırasında önemli noktalardan biriside yaylı somun kullanarak mil ile somun arasındaki boşluğun alınması suretiyle bağlantı hassasiyeti sağlanmaktadır.

3.1.2 Adım motoru ve sürücü kartı

Raylı sistemde kullanılacak adım motoru için MotionKing firmasının 17HS2408S serisi, 1.8° dereceli ve torku 1.6 N.cm ' lik 2 fazlı hibrit adım motoru kullanılmıştır (Şekil 3.5).17HS2408S adım motorunun özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5 17HS2408S Adım motoru ve sargı bağlantısı

Tablo 3.1 17HS2408S özellikleri.

Adım açısı (derece)	Akım (A)	Faz direnci (ohm)=	Faz indüktansı (mH)	Tutama torku (N.cm Min)	Sıkma torku (N.cm Max)	Rotor ataleti (g. Cm ²)	Motor ağırlığı (g)
1.8	0,6	8	10	12	1,6	34	150

A4988 step motor sürücüsü bipolar adım motorları için tercih edilen bir kontrol birimidir. Motorun çalışma gerilim aralığı 5 -35 volt arasında olup ve 2 ampere kadar akım çekebilmektedir. A4988 Step motor sürücü kartının özellikleri Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2 A4988 adım motor sürücü kartı özellikleri

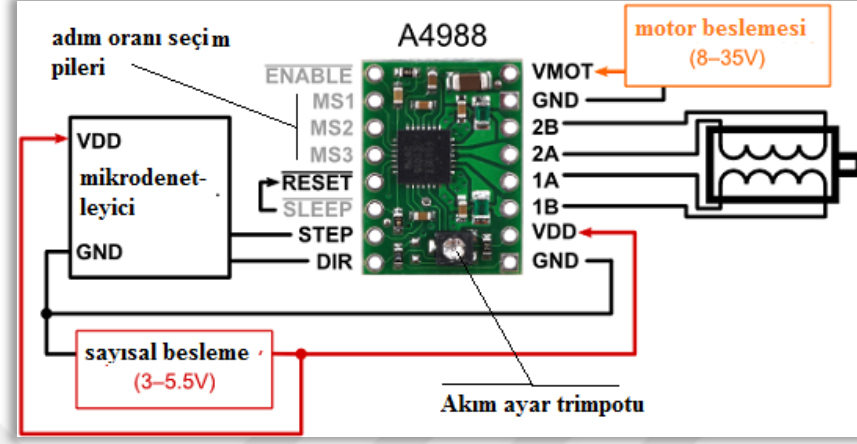
Çalışma Gerilimi (V _{BB})	8 -35 V
Mantıksal Çalışma Gerilimi (V _{DD})	3,3 V veya 5 V
Akım (bobin başına)	2 A
Adım Seçeneği	Tam, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Akıllı Kesme Kontrolü	Hızlı ve Yavaş azaltma modu

Sürücü modülü ile adım motorları yazılım aracılığı ile istenilen hızda ve farklı adımlarda sürülmek üzere programlanabilmektedir. Sürücü kontrol kartı ile adım motorunu hangi modlarda çalıştırılacağı ve bu amaçla hangi pinlerin kullanılacağı Tablo 3.3' de verilmiştir (Pololu, 2018).

Tablo 3.3 Mikro adımlama kontrol tablosu (Pololu, 2018)

MS1	MS2	MS3	Mikro adım oranı (çözünürlük)	Uyartım modu
L	L	L	Tam adım	2 Faz
H	L	L	Yarım adım	1-2 Faz
L	H	H	Çeyrek adım	W1-2 Faz
H	H	L	1/8 Adım	2W1-2 Faz
H	H	H	1/16 Adım	4W1-2 Faz

Adım motor sürücü kartının elektriksel bağlantısı ve kullanılan bağlantı uçları Şekil 3.5’ de verilmiştir.



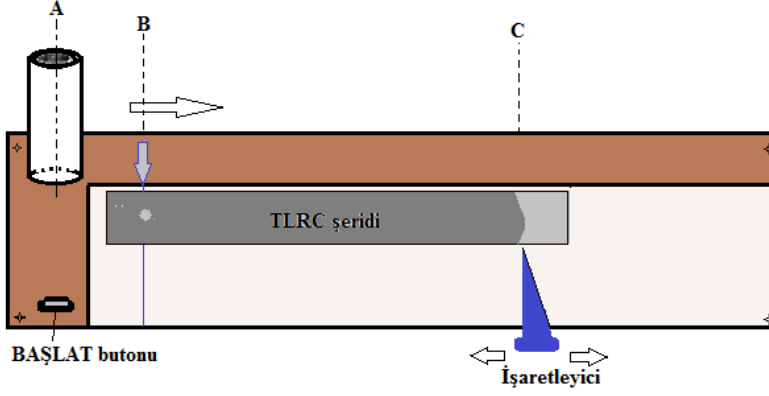
Şekil 3.5 Motor sürücü kartının bağlantı şeması (Pololu, 2018)

3.2 TLRC Tarayıcı Sistem Yazılımı

TLRC sistemi ile radyo işaretli şeritlerin taranmasını sağlamak amacıyla açık kaynak platformu Arduino yazılım geliştirme araçları kullanılarak programlanmıştır. Böylece TLRC şeridinin taranarak veriler bilgisayara aktarılmaktadır. Geliştirilen TLRC sisteminin işleyişi ve radyoışaretli şeritlerin okuma prosedürü şöyle gerçekleşmektedir (Şekil 3.6).

1. Dedektör A noktasında (Şekil 3.6) başlangıç pozisyonunda hazır durumda beklemekte iken, başlat butonuna basıldığında dedektör B noktasına kadar ilerler. Bu aşamada sayım işlemi yapılmamaktadır.
2. Detektör B noktasında geldiğinde sayıma başlar. Şerit boyunca her 1mm’ de sayım alınır.
3. Dedektör C noktasına ulaştığında tarama işlemi sona erer.
4. TLRC şeridi boyunca konum ve o konuma ait sayım değeri bilgisayara gönderilir.
5. Detektör C noktasına geldikten sonra hızlı bir şekilde A noktasına geri döner.

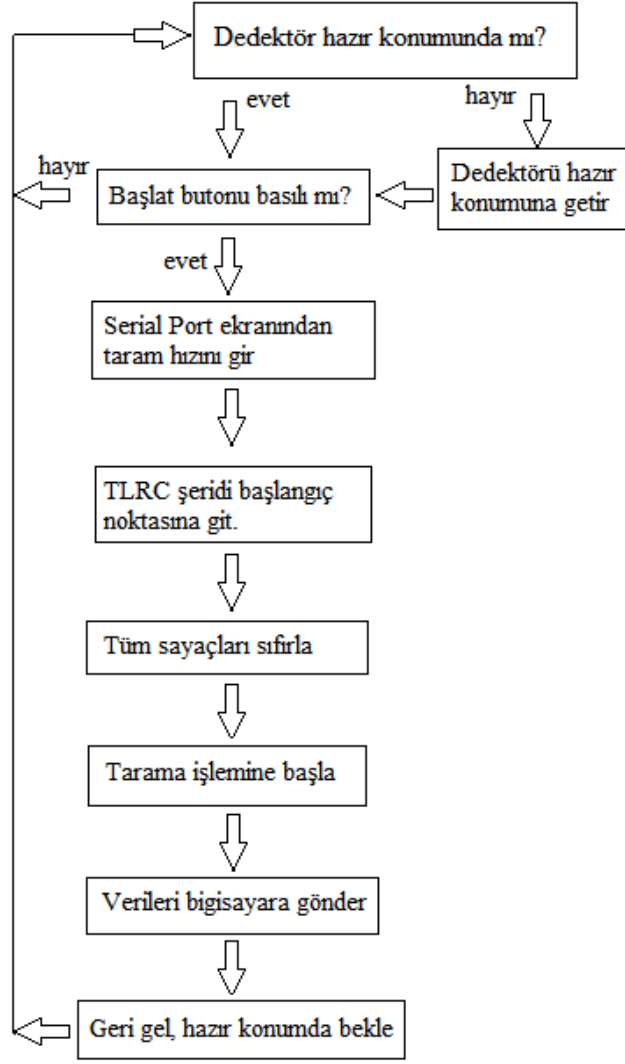
TLRC yazılım algoritması bu çalışma adımları dikkate alınarak tasarlanmıştır (Şekil 3.6). TLRC şeridinin okuma prosesine uygun bir yazılım algoritması tasarlanmıştır, Şekil 3.7' de TLRC tarayıcı yazılımının akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.6 TLRC Tarayıcı sistemin radyoışaretli şeridi okuma prosesi.

Tarayıcı sistemin çalışması:

TLRC tarayıcı sistemin çalışması sırasında karşılaşılabilecek olası hata ve sorunlar için donanım ve yazılım çözümleri üretilmiştir. Bu noktada karşılaşılabilecek en olası sorunlardan birisi olan güç kaynağı problemleridir. Tarama esnasında güç kaynağı problemleri sonucunda detektör tarama şeridi üzerinde herhangi bir yerde kalabilir. Böyle bir durumda tarayıcı sistemin başlangıç ve bitiş limit anahtarları kontrol edilerek detektörün A noktasına otomatik olarak getirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.7 TLRC yazılımı akış diyagramı

3.2.1 Motor sürücü kontrolü

Tarama hızı ve çözünürlüğün ayarlanabilmesi için sürücü karta gönderilen kare dalga'nın frekansı ile dedektör hareket hızı arasındaki bağıntı tespit edilmelidir. A4988 motor kontrol kartı 1/16 mikro adım modunda, bir adım ilerlemesi için sürücü kartına 32 step pals uygulanması gerekir (Pololu, 2018). TLRC Tarayıcı sistemde 1,8 °C' lik (200 adımlık) bir motor kullanıldığından 1 tur için 6400 (200x32) pals uygulanması gerekmektedir. Dedektörü yürütecek olan milin diş adımı 8mm olduğundan motorun bir tur dönüşünde, dedektör 8mm ilerleyecektir. Dedektörün 1mm ilerlemesi için $(200 \times 32) / 8 = 800$ pals gönderilmelidir. Başka bir deyişle, dedektörün 1 saniyede

1mm ilerlemesi istenirse adım motor kartına gönderilecek kare dalga frekansı 800Hz olmalıdır. Dedektörün daha yavaş ilerlemesi yani daha uzun süreli sayım yapılması için örneğin 1mm yolu 2 saniyede alması istenir ise, adım motor kartının STEP pinine 400Hz' lik bir pals gönderilmelidir.

A4988 adım motor kontrol kartına “tone” komutu ile frekansı değiştirilebilir pals gönderilerek motor sürülmektedir. Burada her bir 1mm sonunda toplanan sayım ve konum verisinin, bir dizi içinde tutulması ve kesme sayacının sıfırlama işlemleri için çok küçük de olsa bir zaman harcanmaktadır. Geçen bu süre zarfında dedektör ilerlemeye devam edeceğinden şerit üzerinde taranmayan bölgeler oluşacaktır. Bunu çözmek amacıyla bu esnada motora pals gönderiminin kesilmesi sağlayan, iç içe “for” döngüsü kullanılmıştır.

Adım motor kartı için kullanılan pals “delayMicroseconds” komutu ile oluşturulmuştur. Burada “Delay” komutu ile bekleme süresi, kare dalganın periyodu kadar olmalıdır. Dedektör hızının 1mm/s olması için T (periyot) = $1/f$ eşitliğinden $(1/800) = 0,00125$ saniye olarak hesaplanmıştır. Bu değer “HIGH” ve “LOW” sürelerinin bulunması için ikiye bölünerek “delayMicroseconds(hiz)” içindeki “hiz” değişkeni olarak (625µs) verilmiştir.

Şekil 3.8’ da iç içe “for” döngüsü kullanımı ile motor kontrolü sağlandığı kod satırları görülmektedir. Burada “cozunurluk” olarak tanımlanan değişken adım sayısını belirlemek için kullanılmaktadır. 1mm aralıklarda sayım alınması için bu değer 800’ dür. Bu değer düşürüldükçe çözünürlük artacaktır.

Dedektörün ilerleme (tarama) hızını belirleyen “hiz” değişkeni ise palsin frekansını için kullanılmaktadır. Bu değer 1mm/s’ lik hız için 625 us’ dir. “hiz” değeri yükseldikçe tarama hızı düşmektedir.


```

99     p = 0; //konum sayıcısını sıfırla
100    count = 0; //pals sayıcıyı sıfırla
101    for (i = 1; i < 420; i++) { //210mm ye aya
102        // Hızı belileyen döngü
103        for (int x = 0; x < cozunurluk; x++) {
104            digitalWrite(stepPin, HIGH);
105            delayMicroseconds(hiz); //
106            digitalWrite(stepPin, LOW);
107            delayMicroseconds(hiz); // 1 periyotluk
108        }
109        data[i] = count;
110        p++;
111        count = 0;

```

Şekil 3.8 Tarama hızı ve çözünürlük işlem kodları

3.2.2 Radyasyon sayımı

Şekil 3.8’de görülen kod satırlarında “count” değişkeninde tutulan sayımlar belirlenmiş aralıklarla (örneğin 1mm) “data[]” dizisine kaydedilmektedir. Aynı zamanda “P” değişkeni de bu belirlenmiş mesafe sonunda arttırılarak konum bilgisi elde edilmektedir. Detektör, TLRC şeridinin sonunu belirleyen limit anahtara geldiğinde döngüden çıkılmaktadır. Dizide tutulan veri bilgisayara gönderildikten sonra detektör başlangıç noktasına gelerek hazır konumda beklemektedir.

Arduino Mega 2560 kartı bu işlemleri gerçekleştirir iken aynı zamanda dedektörden gelen pals sinyallerini de saymaktadır. Bu işlem dış kesme (External interrupt) ile yapılabilmektedir. Arduino Mega 2560 kartında dış kesme için 2(0), 3(1), 21(2), 20(3), 19(4), 18(5) nolu uçlar kullanılmaktadır. Bu pinler “**attachInterrupt** (*digitalPinToInterrupt(pin), ISR, mode*)” komutu ile çalıştırılmaktadır. Burada ilk parametre “*digitalPinToInterrupt(pin)*” kullanılacak pini, ikinci parametre “*ISR*” kesme fonksiyonunun ismini ve son parametre “*mode*” ise kesme modunu belirler. Kesme işleminin hangi koşulda yapılacağı “kesme türü” ile gerçekleştirilir.

Tanımlanabilecek dış kesme türleri:

LOW: Pin 0 V ise kesme oluşur.

CHANGE: Pinde gerilim değişirse kesme gerçekleşir.

RISING: Yükselen kenarda kesme gerçekleşir.

FALLING: Düşen kenarda kesme gerçekleşir.

Yazılımda 2 nolu pin seçilmiş ve düşen kenar tetiklenme tanımlanmıştır. Tetiklenme gerçekleştiğinde “PalsSay” fonksiyonu çağrılarak sayımın tutulduğu değişken (count) bir arttırılır. Fonksiyon başlar başlamaz gelecek başka bir tetiklenme, fonksiyonu tekrar çağıracağı için bu durum “detachInterrupt()” komutu ile kesme fonksiyon kapatılarak önlenmektedir (Şekil 3.9).

```

187 void PalsSay() {
188     detachInterrupt(0);
189     count++;
190     attachInterrupt(0, PalsSay, FALLING);
191 }

```

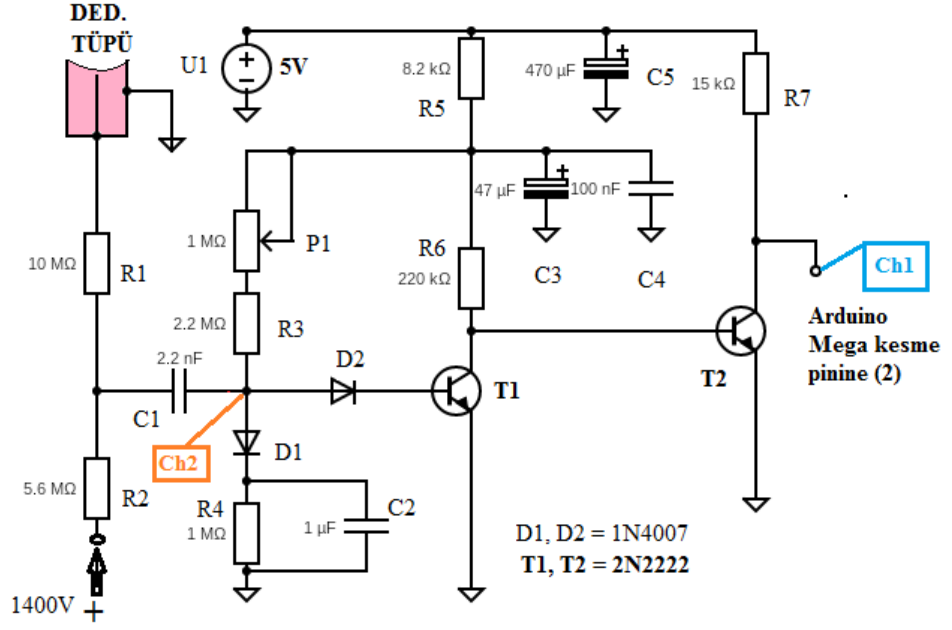
Şekil 3.9 Dış kesme işlemi kod satırları

3.3 GM Sayıcı ve Çevre Birimleri

3.3.1 Ön Yükselteç

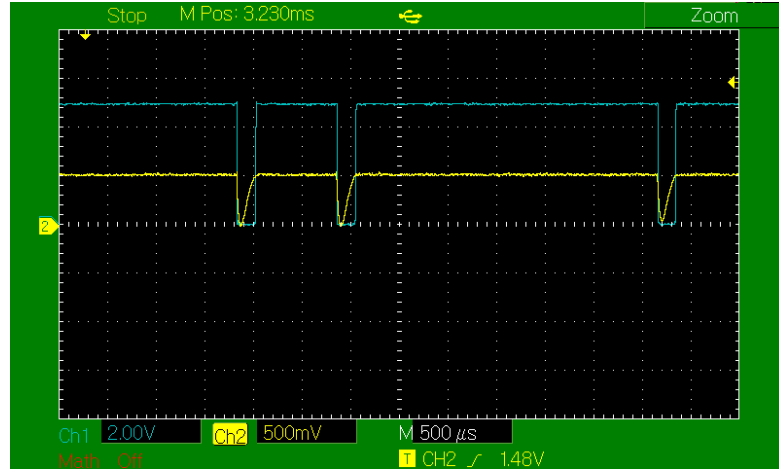
Tez kapsamında geliştirdiğimiz ön yükselteç aynı zamanda dedektör çıkışındaki sinyali, kare dalgaya çevirerek şekillendirmektedir (Şekil 3.9). GM dedektörlerine uygulanan gerilim yüksek olduğundan ön yükselteç girişindeki transistörlerin bozulmasına sebep olabilecek ters gerilim veya yüksek gerilim etkileri dikkate alınarak devre tasarımı yapılmıştır.

Şekil 3.10’ daki devrede dedektörden alınan sinyal R_1 , R_2 gerilim bölücü dirençler ve C_1 üzerinden alınmıştır. D_2 diyotu T_1 transistörünü ters polarmadan korumaktadır. D_2 diyotu oluşabilecek yüksek gerilimleri toprağa aktarmaktadır. C_2 kondansatörü besleme kaynaklı gürültüleri filtre etmektedir. R_5 ve C_5 , besleme kaynaklı gürültüleri süzerek bunların T_1 transistörüne geçişi bloke etmektedir. T_2 transistörü normalde iletimde olup, dedektörden pals geldiğinde kesime gitmektedir.

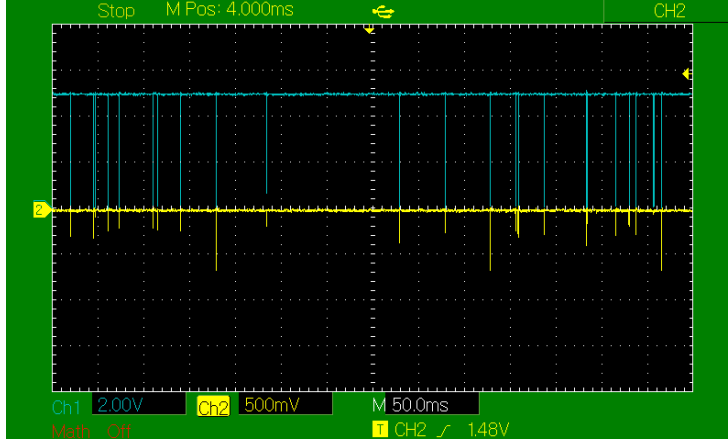


Şekil 3.10 Ön yükselteç devresi

Şekil 3.11 a ve b'de ön yükselteç giriş ve çıkış sinyalleri görülmektedir. Sarı renkli osiloskop kanalı (Ch2) yükselteç girişini, mavi renkli olan kanal (Ch1) yükselteç çıkışını göstermektedir.



a)



b)

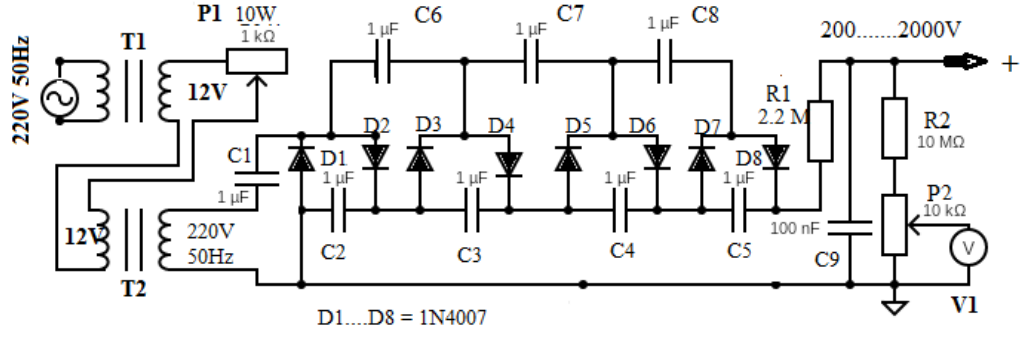
Şekil 3.11 a, b Ön yükselteç giriş ve çıkış sinyalleri.

3.3.2 Yüksek gerilim devresi

Geliştirilen TLRC tarayıcı sistemde farklı dedektörleri kullanmak amacıyla ayarlanabilir yüksek gerilim güç kaynağı tasarlanmıştır. Tasarım, düşük akım ve yüksek gerilim üretmenin en kolay yöntemi olarak bilinen Cockcroft-Walton gerilim katlayıcı tekniği kullanılmıştır (Ioannis and Emmanuel, 2010).

Şekil 3.12' de, devreyi şebekeden izole etmek amacıyla, 6W iki adet trafo kullanılmıştır. Trafo çıkışına seri bağlı bir potansiyometre (P_1) ile akım T2 trafosuna verilmektedir. T2 trafosu 12 voltu 220 V'a yükseltir. T2 çıkışındaki 220V diyot ve kondansatör devreleri ile katlanarak çıkışta 2000V civarında gerilim değerlerine ulaşılmaktadır. Burada akım sınırlaması, potansiyometre yerine bir yarıiletken devre kullanılarak yapılabilir. Böylece geri besleme yapılarak çıkış geriliminin otomatik olarak sabit kalması veya kontrolü sağlanabilir. Devrede R_1 ve C_9 elamanları filtreleme görevi yapmaktadır.

R_1 ve R_2 gerilim bölücü dirençleri üzerinden, sayısal voltmetre modülü ile gerilimin sürekli okunabilmektedir. Aynı zamanda bu devre elamanı ile güç harcanması sağlanarak kondansatörlerin boşaltılmaktadır. Devrenin iç direnci çok yüksek olduğundan, çıkış gerilimi çekilen akıma bağlıdır. Çekilen akım arttıkça gerilim düşmektedir. Şekil 3.13' de TLRC tarayıcı sistem için tasarlanmış yüksek gerilim kaynağının resmi görülmektedir.



Şekil 3.12 Yüksek gerilim devresi.



Şekil 3.13 Tez kapsamında geliştirilen Yüksek gerilim kaynağı

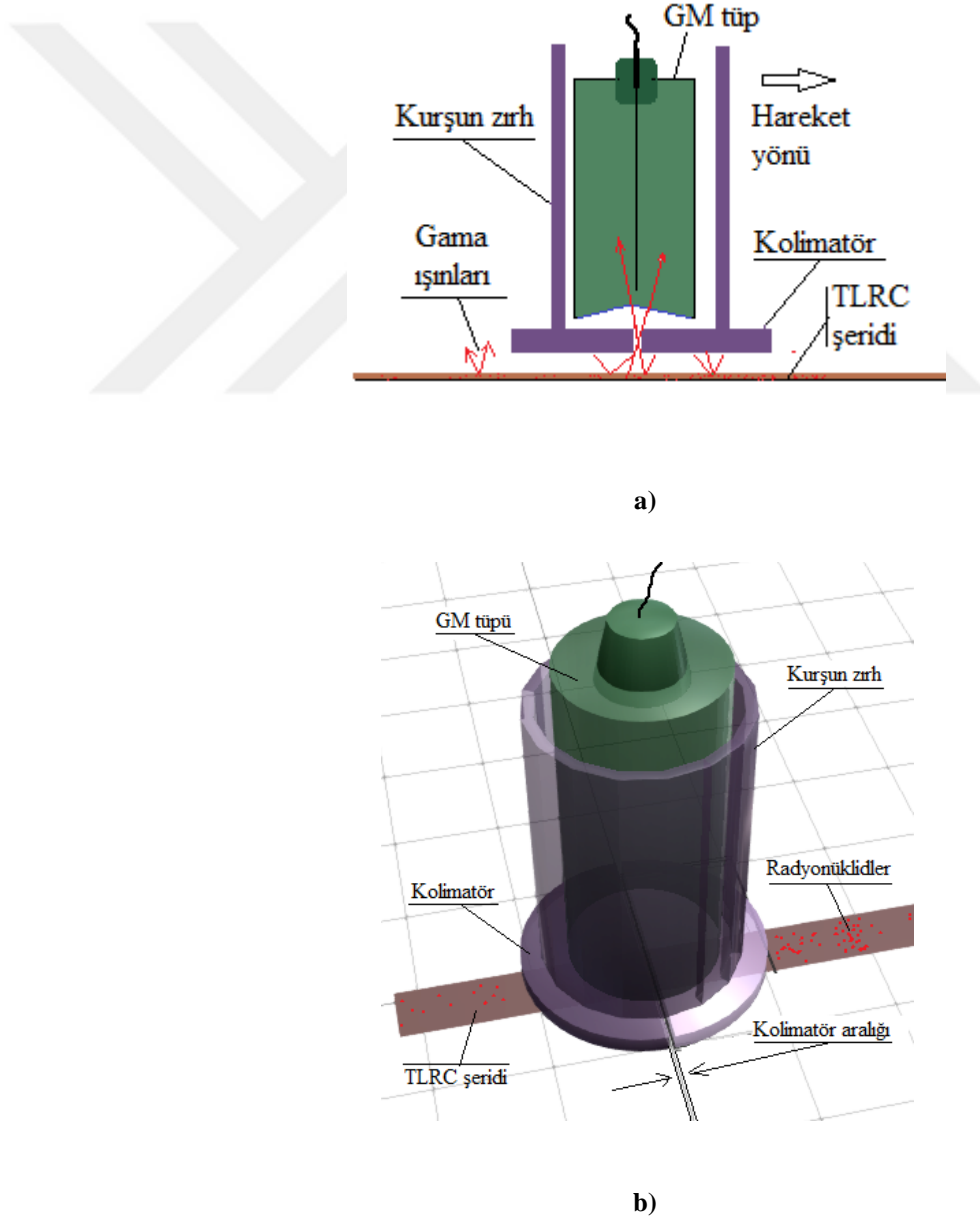
3.3.3 Arduino Mega 2560 kart bağlantıları

Geliştirilen sistemde, adım motor kartı için 12V ve Arduino için 5V olmak üzere iki ayrı gerilim kaynağı kullanılmıştır. Geliştirilen sistemde besleme kaynaklı hataları önlemek amacıyla Arduino kartta kullandığımız tüm sayısal pinleri 15kΩ direnç ile toprağa bağlanmıştır (Pull-up olarak kullanılan pinler hariç). TLRC Tarayıcı sistemi oluşturan GM sayım ve kontrol modüllerin resmi Şekil 3.14b' de görülmektedir.

TLRC Tarayıcı sistemin Arduino program kodları **Ek-2'** de verilmiştir.

3.4 Kolimatör

Silindir yapıdaki GM tüp ölçüm esnasında ortam radyasyonundan etkilenmemesi için kurşun bir kap içinde bulundurulmalıdır. Dedektör penceresi önüne konacak bir kolimatör ile zırlama yapılarak istenilen bir aralıktan radyasyonun geçmesini izin verilmektedir (Şekil 3.15). Böylelikle küçük bir kesit alanda aktivite ölçümü sağlanmaktadır. Bu tür sistemlerde kolimatör yeterince kalın ve aralığı istenilen sayım verimi sağlayacak açıklıkta olmalıdır. Geliştirilen TLRC sistemi için kullanılacak kolimatör kalınlığı ve aralığı deneyler çalışmaları sonucunda belirlenmiştir.



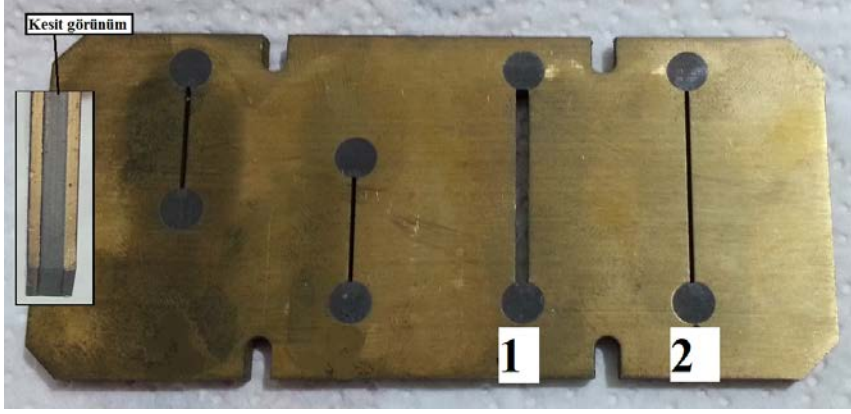
Şekil 3.15 Kolimatörün a) kesit görünümü b) perspektif görünümü.

3.4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kolimatörler

Standart Kolimatör (Kolimatör-A1 ve A2)

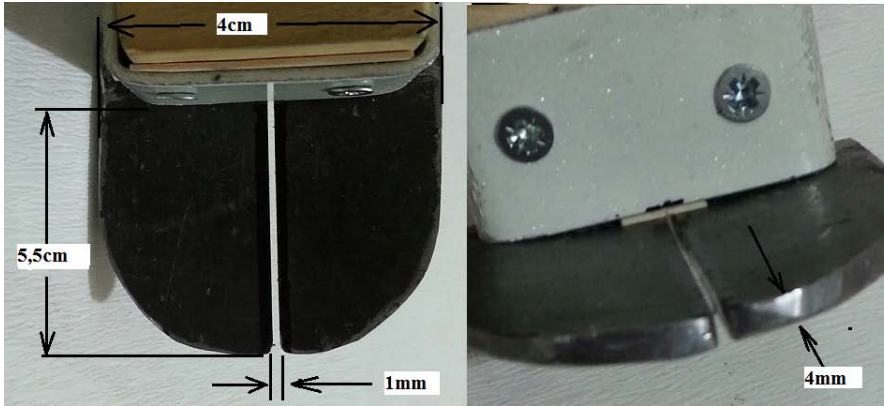
Enstitümüzde mevcut bulunan standart kolimatör deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere **Kolimatör-A1** ve **Kolimatör-A2** olarak numaralandırılmıştır. Bu kolimatör 1 mm kalınlığında iki bakır plaka arasına, 2 mm kalınlığında kurşun tabaka yerleştirilerek oluşturulmuştur. Kolimatör-A1 numaralı yarıık 1,8 mm ve Kolimatör-A2 numaralı yarıık 0,6 mm'dir.

Kolimatör-A1 ve A2: Bu iki yarığın kalınlıkları aynı olup, aralıkları farklıdır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Kolimatör-A1 ve A2 numaralı yarıklar.

Kolimatör-B; Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere tez çalışması kapsamında hazırlanan Kolimatör-B olarak adlandırılmıştır. Kolimatör-B deneysel çalışmalarda elde ettiğimiz sonuçlar dikkate alınarak 4mm kalınlığında ve 1mm yarıık aralığı olacak şekilde kurşundan hazırlanmıştır.(Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Tez kapsamında hazırlanan Kolimatör-B.

3.5 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Radyoışaretli Örnekler

Deneysel çalışmalarda enstitümüzün Nükleer Kimya laboratuvarında hazırlanmış İyot-131 (^{131}I) ve ^{131}I işaretli örnekler için selüloz ve Teknesyum-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) ve $^{99\text{m}}\text{Tc}$ örnekler için silika jel TLRC şeritleri kullanılmıştır. Kullanılan tüm TLRC şeritleri 1cm genişliğinde ve 10 cm uzunluğunda hazırlanmış olup ^{131}I ve $^{99\text{m}}\text{Tc}$ radyonüklidleri ile işaretlenmiştir. ^{131}I işaretli örnekler n-butanol /su /asetik asit (4:2:1) banyosunda, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ile işaretli örnekler metanol/su (2:8) ve serum fizyolojik bonyolarında geliştirme işlemi yapılmıştır. TLRC şeritlerine damlatılan ^{131}I ve ^{131}I örneklerin aktivitesi 0,8 – 8 μCi aralığında ve $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ve $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ile işaretli örneklerin aktivitesi 7 – 50 μCi aralığındadır. Kolimatör A ve B ile radyo bileşenler ile yapılan deney listesi Tablo 3.4’ de verilmiştir.

Tablo 3.4 Kolimatörler ve radyo bileşenler ile yapılan deneyler.

Radyo bileşen	Açıklama	Kolimatör-A1	Kolimatör-A2	Kolimatör-B
^{131}I -1	Serbest ^{131}I			+
^{131}I -2	Serbest ^{131}I			+
Yük. ^{131}I	Yükseltgenmiş ^{131}I	+	+	
^{131}I -A	^{131}I ile işaretli A	+	+	
^{131}I -B	^{131}I ile işaretli B			+
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -1	Serbest $^{99\text{m}}\text{Tc}$	+	+	
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -2	Serbest $^{99\text{m}}\text{Tc}$			+
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -3	Serbest $^{99\text{m}}\text{Tc}$			+

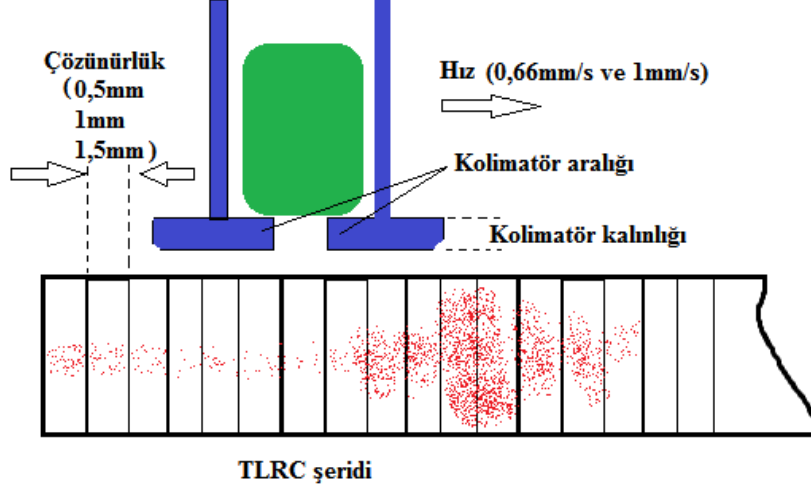
3.6 TLRC Tarama Parametreleri

Geliştirdiğimiz tarayıcı sistem yazılımında dedektörün tarama hızı için “Hız” değişkeni, sayım çözünürlüğü için de “Çözünürlük” parametreleri kullanılmıştır (Şekil 3.18). Kullanıcı yazılımda tanımlanan bu parametreleri değiştirerek tarama verimini iyileştirebilmektedir.

Hız; dedektörün tarama yönündeki hareketini belirler ve yapılan deneylerde tarama hızı olarak 0,66mm/s ve 1mm/s olarak iki değer kullanılmıştır.

Çözünürlük; dedektörün TLRC şeridini tarama çözünürlüğünü ifade eder. Kullanıcı geliştirilen yazılım ekranında çözünürlük değerini değiştirebilmektedir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda çözünürlük 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm alınarak taramalar yapılmıştır.



Şekil 3.18 Tarayıcı sistemdeki tarama parametreleri

Radyo bileşenlere ait örnekler hazırlandıktan sonra ilk olarak enstitümüzün Radyo kromatografi laboratuvarında bulunan BIOSCAN AR-2000 radio-TLC Imaging Scanner cihazı ile tarandıktan sonra (Şekil 3.19) aynı örnekler tez kapsamında geliştirilen TLRC tarayıcı sistemle taranmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.19 BIOSCAN AR-2000 radio-TLC Imaging Scanner.

BIOSCAN AR-2000 cihazının tarama çözünürlüğü ^{14}C için 1-2 mm, ^3H için 0,5-1 mm ve çoğu gamalar için 3mm dir (Eckert, 2017).



Şekil 3.20 TLRC Tarayıcı sistem deney düzeneği.

Tarama neticesinde oluşan veriler Arduino IDE program ara yüzü SerialPort ekranından alınarak Microsoft Exel programına aktarıldıktan sonra grafikleri çizilmiştir.

4. BULGULAR

Tez kapsamında geliştirilen TLRC tarayıcı sistemine ait ilk denemeler için Kolimatör-A1 ve A2 ile taramalar yapılarak sistemde kullanılacak kolimatörün özellikleri belirlenmiştir. Bu aşamada kolimatör ile yapılan taramalarda dedektör için 1mm/s hız ve 1mm çözünürlük değerleri seçilmiştir. Kolimatör-A1 ve A2 deneylerinden elde edilen sonuçlara uygun olarak TLRC tarayıcı sistem için yeni bir kolimatör (Kolimatör-B) tasarlanmış ve kromatogramlar alınmıştır.

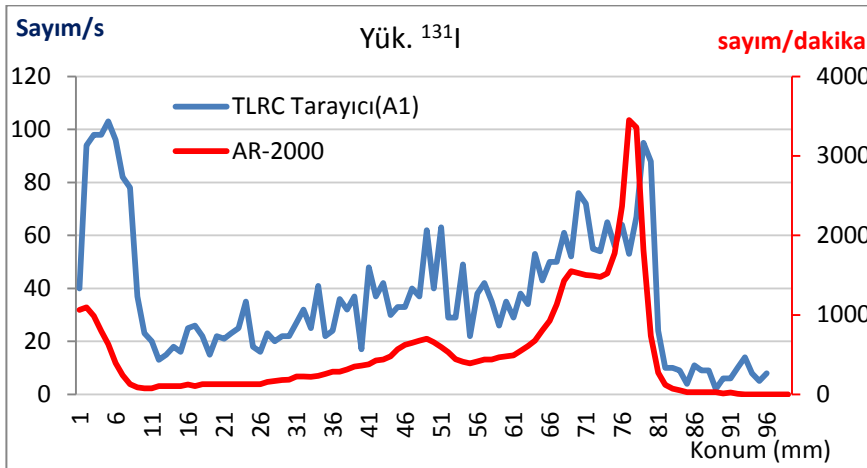
TLRC tarayıcı cihazı ile elde edilmiş grafiklerde dikey eksen (sayım/s) sayım değerlerini, yatay eksen (mm) ise TLRC şeridinin başlangıç noktasından itibaren konumu göstermektedir.

4.1 Kolimatör-A1 ve A2 İle Yapılan Deneysel Çalışmalar

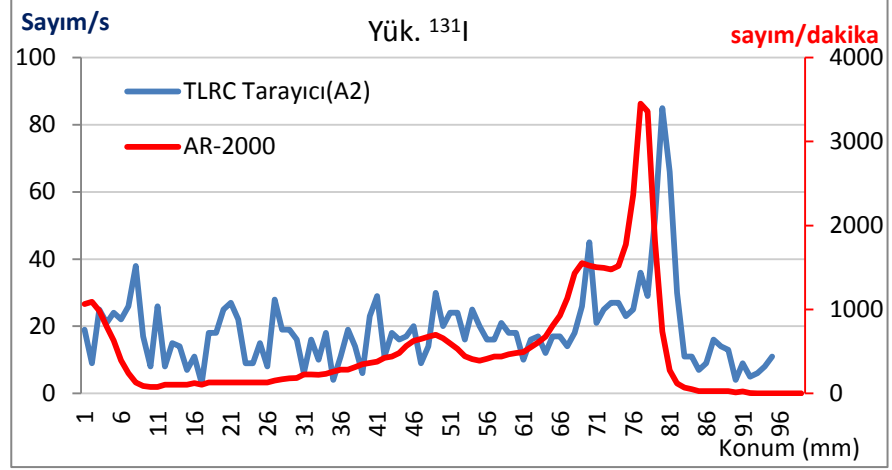
Kolimatör-A1 ve A2 ile yapılan taramalarda, dedektör hareket hızı 1 mm (Hız: 1 mm/s) ve çözünürlük 1 mm (çöz: 1 mm) seçilmiştir. Geliştirilen TLRC tarayıcı sistem ve **BIOSCAN AR-2000** cihazı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.1.1 Yük. ^{131}I örneği ile yapılan deneysel çalışmalar

Yük. ^{131}I bileşiğine ait BIOSCAN AR-2000 cihazı ve geliştirilen TLRC tarayıcı sisteminde kolimatör değiştirilerek alınan kromatogramlar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4.1 ^{131}I bileşiğinin Kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız: 1mm/s, çöz: 1mm)

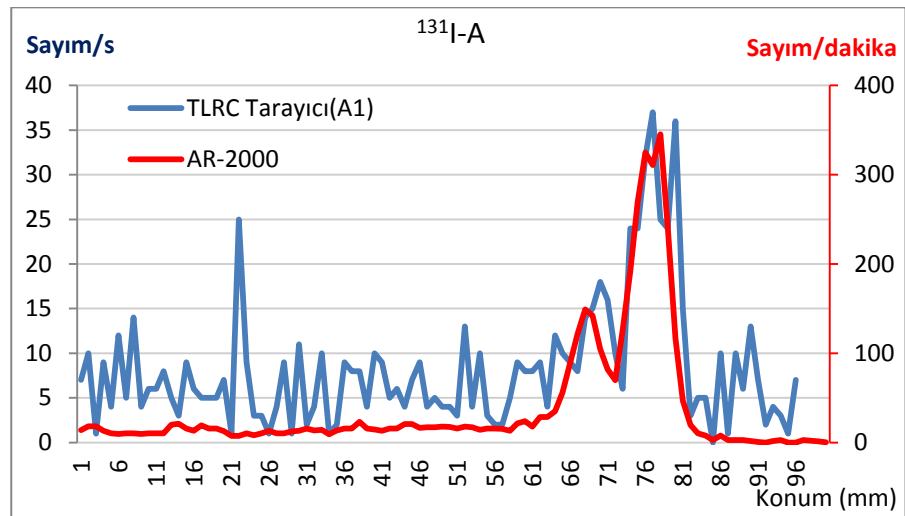


Şekil 4.2 Yük. ^{131}I bileşiğinin Kolimatör-A2 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, çöz: 1mm)

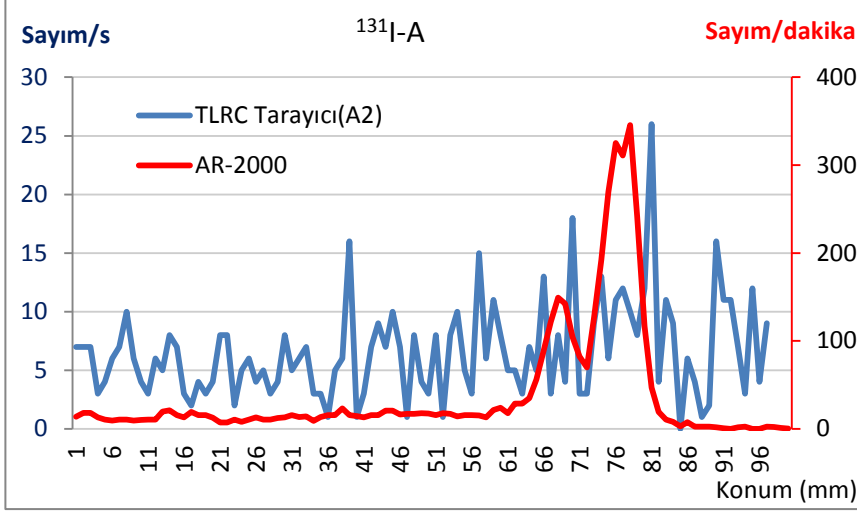
Şekil 4.1 ve 4.2’de art alan radyasyon etkisinin yüksek olduğu ve kromatogramların birbiriyle yeterli seviyede uyumlu olmadığı görülmektedir. Kolimatör-A1 ile alınan kromatograma ait sayım değerlerinin, Kolimatör-A2 ile alınan sayımlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi Kolimatör-A1’in Kolimatör-A2’den daha geniş yarıçapına sahip olmasıdır.

4.1.2 ^{131}I -A ile yapılan deneysel çalışmalar

Düşük aktiviteli bir örnek olan ^{131}I -A bileşiğine ait kromatogram Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ de verilmiştir.



Şekil 4. 3 Düşük aktiviteli ^{131}I -A bileşiğinin Kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız:1 mm/s, çöz: 1 mm)

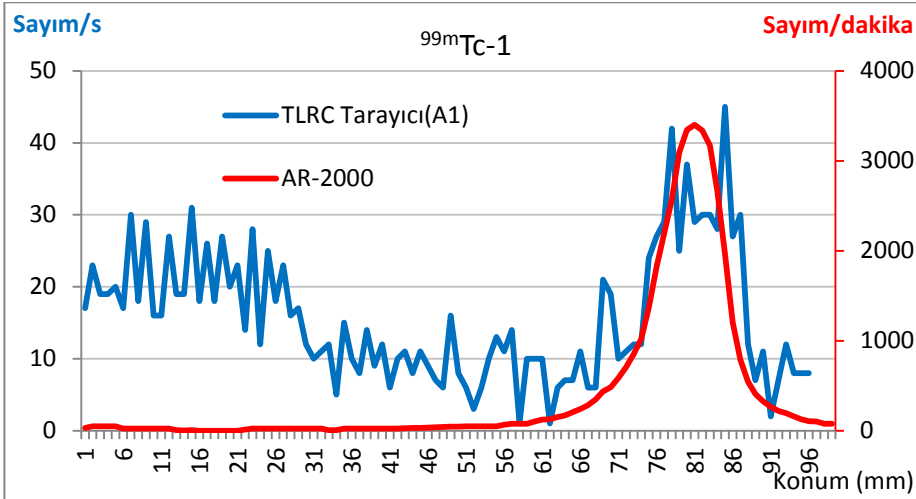


Şekil 4.4 Düşük aktiviteli $^{131}\text{I-A}$ örneğinin, kolimatör-A2 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, çöz: 1mm)

Düşük aktiviteli $^{131}\text{I-A}$ bileşiğinin Kolimatör-A1 ve A2 ile alınan kromatogramların uyumlu olmadığı görülmektedir.

4.1.3 $^{99\text{m}}\text{Tc-1}$ ile yapılan deneysel çalışmalar

$^{99\text{m}}\text{Tc-1}$ örneğinin Kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı Şekil 4.5' de verilmiştir.



Şekil 4.5 $^{99\text{m}}\text{Tc-1}$ örneğinin kolimatör-A1 ile alınan kromatogramı (Hız:1mm/s, Çöz: 1mm)

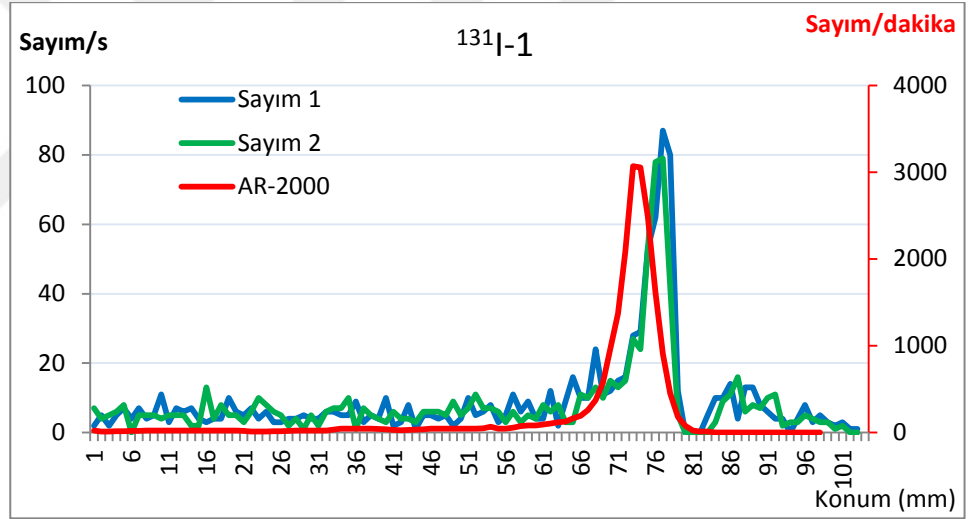
^{99m}Tc radyonüklidinin Kolimatör-A1 ile yapılan deneysel çalışmalarında düşük verimli sonuçlar alınmıştır. Bunun art alanın yüksekliğinden ve kolimatör kalınlığının yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Elde edilen deneysel sonuçlardan, **kolimatör kalınlığının 4 mm ve yarık aralığının 1 mm** olmasının uygun olacağına karar verilmiş ve bu amaçla Kolimatör-B tasarlanmıştır.

4.2 Kolimatör-B ile Yapılan Deneyler

4.2.1 ^{131}I -1 örneği ile yapılan kolimatör testi

^{131}I -1 örneğinin Kolimatör-B ile alınan kromatogramlar Şekil 4.6' da verilmiştir.

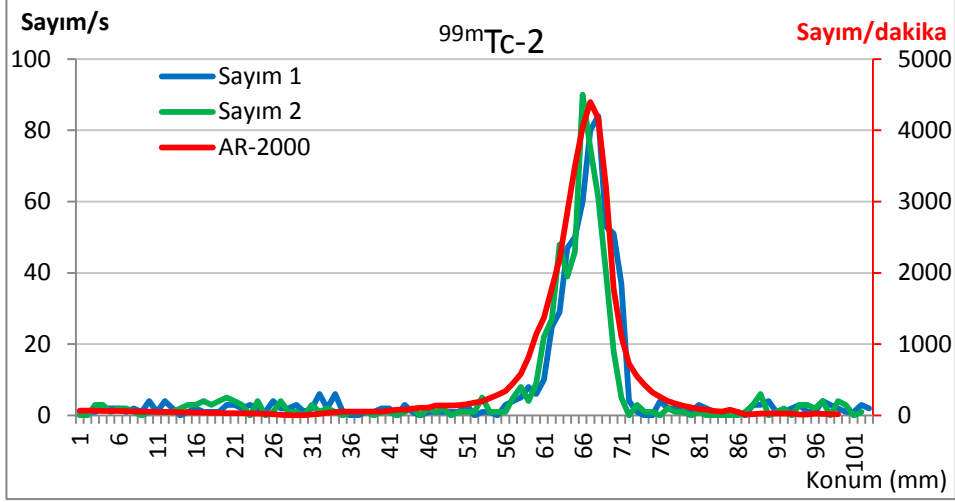


Şekil 4.6 Kolimatör-B ile alınan kromatogram (Hız: 1mm/s, çöz: 1mm)

Şekil 4.6' da ^{131}I -1 örneği ile alınan kromatogramlar karşılaştırılmıştır. Kolimatör-B' nin art alanı önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Pikler arasında yaklaşık 5 mm'lik bir kayma gözlenmektedir. Bu kaymanın nedeni TLRC tarayıcının konumsal kalibrasyon hatasından kaynaklanmaktadır.

4.2.2 ^{99m}Tc -2 örneği ile yapılan kolimatör testi

Şekil 4.7' de ^{99m}Tc -2 örneğinin, Kolimatör-B ile alınan kromatogramları verilmiştir.

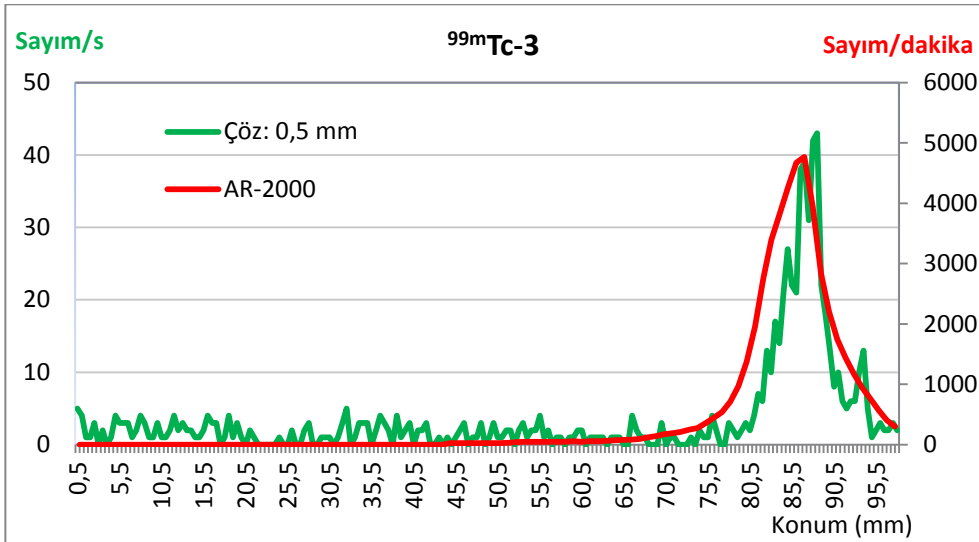


Şekil 4.7 Kolimatör-B ile alınan kromatogram (Hız:1mm/s, çöz: 1mm)

$^{99m}\text{Tc-2}$ örneğinin TLRC tarayıcı ve AR-2000 cihazı ile alınan kromatogramlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.7).

4.2.3 $^{99m}\text{Tc-3}$ örneği ile farklı çözünürlüklerde yapılan deneyler

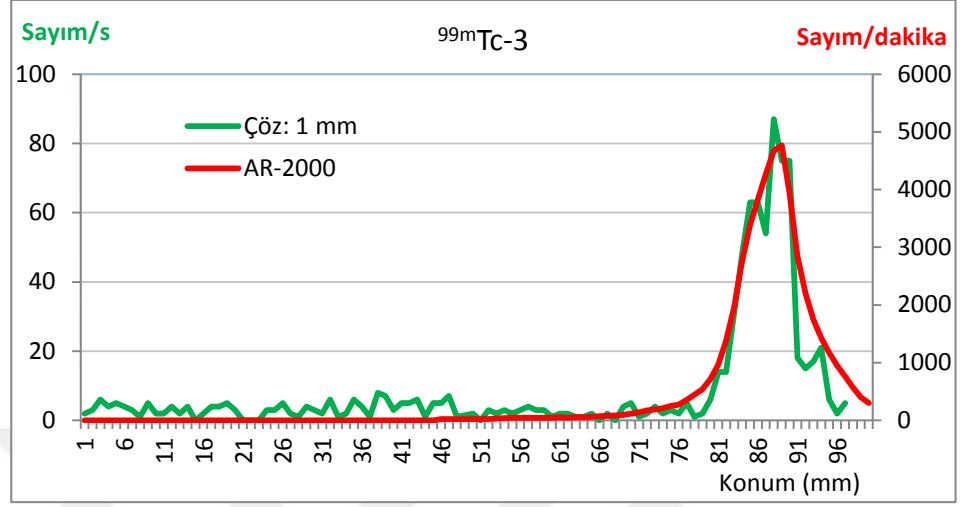
$^{99m}\text{Tc-3}$ örneği 1 mm/s hızda üç farklı çözünürlükte (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) kromatogramları alınarak çözünürlüğün etkisi incelenmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10).



Şekil 4.8 Kolimatör-B ile 0,5 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s)

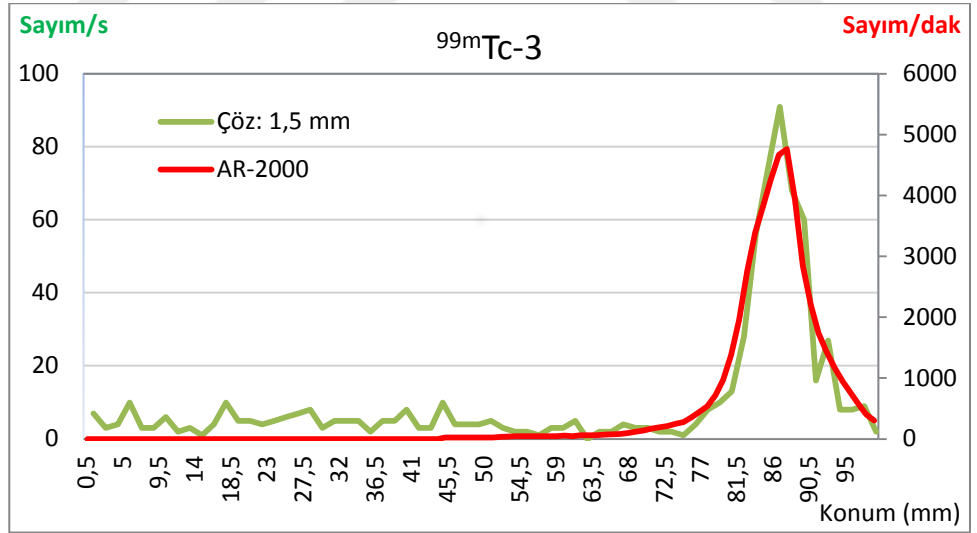
Şekil 4.8' de 0,5 mm çözünürlükte yapılan taramaların pik yüksekliklerinin düşük ve art alan radyasyonunun yüksek olduğu görülmüştür.

Burada pik yüksekliğini artırmak için dedektör hareket hızının düşürülmesi gerekecek, ama bunun sonucu olarak tarama süresini artacaktır.



Şekil 4.9 Kolimatör-B ile 1 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s)

1 mm çözünürlükte alınan kromatogramlar, bu çözünürlüğün ölçüm hassasiyeti için yeterli olduğunu göstermektedir (Şekil 4.9).

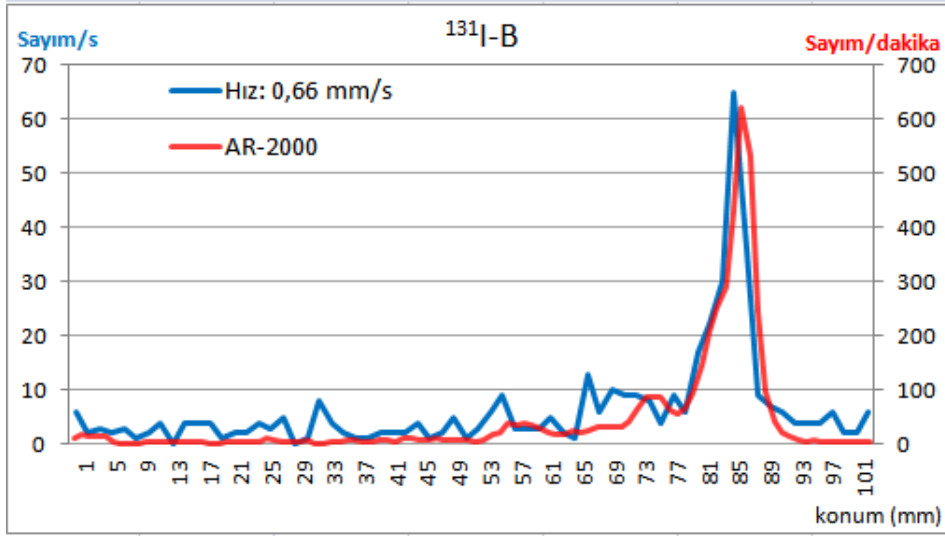


Şekil 4.10 Kolimatör-B ile 1,5 mm çözünürlükte alınan kromatogram (Hız: 1 mm/s)

1,5 mm çözünürlükte alınan kromatogramların konumsal açıdan çok iyi uyumlu olduklarını göstermektedir (Şekil 4.10).

4.2.4 ¹³¹I-B örneği ile yapılan deneyler

¹³¹I-B örneği düşük aktiviteli bir örnek olduğu için alınan kromatogramlarda pik yüksekliği düşüktür. Bu tür düşük aktiviteli sayımlarda ölçüm doğruluğunu arttırmak için dedektörün hareket hızı azaltılmalıdır. Bu aşamada yapılan deneylerde dedektör hareket hızı 1/3 oranında düşürülerek (0,66 mm/s) ve çözünürlük 1,5 mm yapılarak sayımlar alınmıştır (Şekil 4.11).

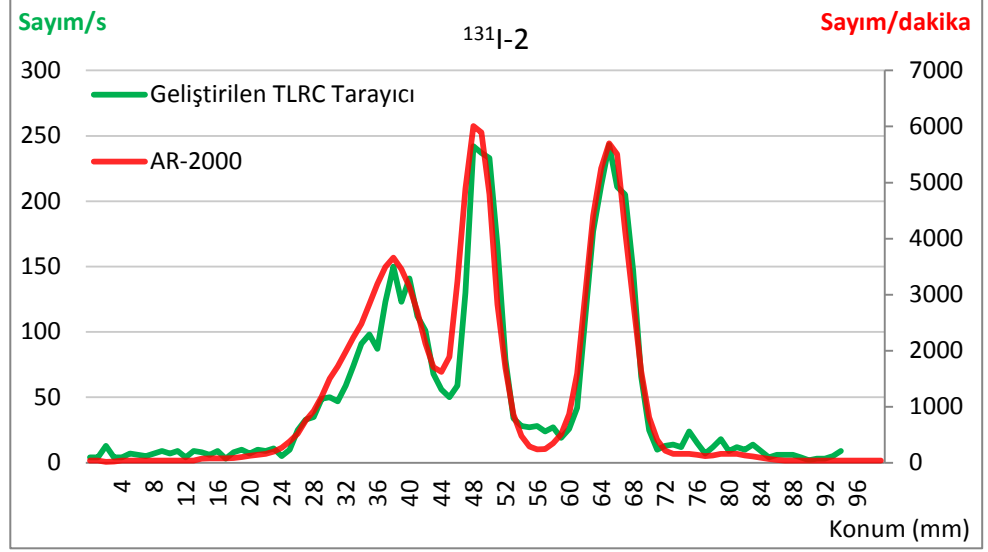


Şekil 4.11 Kolimatör-B ile 0,66 mm/s yürüme hızı ile alınan kromatogram (Çöz: 1,5 mm)

Şekil 4.11’ de 1,5 mm çözünürlükte ve 0,66 mm/s tarama hızında alınan kromatogramların uyumlu olduğunu görülmektedir. Geliştirilen TLRC tarayıcı sistem ile düşük aktiviteli örneklerin kromatogramları alınırken düşük tarama hızında olması sayım verimi açısından önemlidir.

4.2.5 ¹³¹I-2 örneği ile yapılan diğer deneysel çalışmalar

Bu deneysel çalışmada TLRC şeridi üzerine belirli aralıklarla ¹³¹I-2 örneği damlatılmıştır. Böylece birbirine yakın piklerin tarama verimi test edilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 $^{131}\text{I}-2$ bileşiğine ait kromatogramlar (Hız: 1mm/s, çöz:1 mm)

Belirli aralıklarla pik veren $^{131}\text{I}-2$ örneğinin, geliştirilen TLRC tarayıcı ve AR-2000 cihazı ile alınan kromatogramlarının birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.12).

Tez çalışması kapsamında geliştirilen TLRC Tarayıcı cihazın **Maliyet Tablosu ve Özellikleri** Ek-1' de verilmiştir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tezin amacı büyük maliyetler ödmeden, tasarımsal birimleri ülkemizde yapılmış, çok özel, ihtiyaca özgü, gerekli hassasiyete sahip, kullanımı basit bir TLRC tarayıcısı üretmektir.

Bu çalışmada sırasıyla 364 KeV ve 140 KeV enerjili gama yayımlayan ^{131}I ve $^{99\text{m}}\text{Tc}$ radyonüklidleri kullanılmıştır. Radyoaktivite aralığı ^{131}I için 0,8-8 μCi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ için ise 7-50 μCi 'dir. Kromatogram şeritleri iki farklı özellikte kolimatör ile taranmıştır. Enstitümüzde bulunan kalınlığı, 2 mm kurşun ve 2 mm bakırdan olan Kolimatör A ile yapılan deneysel çalışmalarda artalan sayımın yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak kolimatörün kalınlığının uygun olmadığı sonucuna varılmış ve daha kalın bir kolimatör tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda elde ettiğimiz sonuçlar hedef çözünürlüğün 1 mm olması gerektiğini ortaya koyduğundan tasarladığımız yeni kolimatör (Kolimatör B) yarık aralığı 1 mm olarak ayarlanmıştır. Bu kolimatör ile 1 mm/s ve 0,66 mm/s olmak üzere tarama hız değerlerinde 0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm çözünürlükte taramalar yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda 0,5 mm çözünürlükte yapılan taramalarda özellikle düşük radyoaktivite içeren TLRC şeritlerinde düşük sayım kalitesi gözlenmiştir. Bu çözünürlükte tarama hızı düşürülerek daha iyi sayım verimi elde edilmiş olmakla birlikte bu durum tarama süresinin çok uzamasına sebep olmaktadır.

Çözünürlük 1 mm olarak ayarlanmış taramalarda, pik yükseklikleri yeterli fakat konumsal doğruluk düşük olduğu görülmüştür. 1,5 mm çözünürlükte ise sayım verimi, konumsal doğruluk ve pik kalitesi artmaktadır. 1,5 mm çözünürlük ve 1mm/s hızda, pik yüksekliği ve konumsal doğruluğun en iyi olduğu grafikler elde edilmiştir. Çözünürlüğün 1,5 mm' ye ayarlandığı taramalarda, düşük radyoaktiviteli TLRC şeritlerinin sayımında daha sağlıklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tüm deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde geliştirilen GM dedektörlü TLRC tarayıcı cihazının Nükleer Tıpta sıklıkla kullanılan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ve ^{131}I radyonüklidlerin kalite kontrol çalışmalarında yeterli performansa sahip olduğu ve dolayısıyla kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Tasarlanan sistemin ticari ürünlerde bulunan mevcut yazılım arayüzlerinin sahip olduğu kullanım özellikleri eklenmek suretiyle benzer özellikler taşıyacak şekilde geliştirilebilir.

Tez kapsamında geliştirilen TLRC tarayıcı sisteme eksen sayısı ilave edilerek birden fazla TLRC şeridi taranabilir hale getirilerek çok şeritli taramaların gerçekleştirileceği çalışmalarda kullanıcıya zaman kazandıracağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkaş, A.**, 2013, “Radyasyon ölçüm cihazları”, TAEK-ÇNAEM, http://medikalfizik.org/uploads/files/14_MDF_Kongre/3_gun/Radyasyon_Olcum_Cihazlari%23Ayhan_Akkas.pdf(Erişim tarihi:11 Aralık 2018)
- Arduino**, <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>, (Erişim tarihi: 10 Şubat 2018)
- Azooz, A. A.**, 2009, “Operating a Geiger–Müller tube using a PC sound card”, *Eur. J. Phys.* 30, 57–67.
- Bakbak, A. ve Kuyucuoğlu, F.**, 2015, “Adım Motorunun Algılayıcısız Konum Tahmini”, TOK2015 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Denizli, (Bildiriler Kitabı, 246-249 s.)
- Bayburt, S. ve Bayburt, M.**, 2010, Laboratuvarlar İçin Kablosuz (Rf) Radyasyon İzleme Sistemi, ISSN:1306-3111 *e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences*, Volume: 5, Number: 2, Article Number: 1A010,5, 2010
- Bayburt, S. ve Bayburt, M.**, 2008, Laboratuvarlar İçin Radyasyon İzleme Sistemi ISSN:1306-3111, *e-Journal of New World Sciences Academy, Natural And Applied Sciences Nuclear Physics*, Volume: 3, Number: 3, Article Number: A0090
- Biber, F. Z.**, 2004, Estradiol Glukuronid Türevi Bir Radyofarmasötüğün Tasarlanması, Sentezi ve Radyofarmasötik Potansiyelinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Danışman Prof. Dr. Perihan Ünak, E. Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü
- BrightSpec**, “Radio-TLC Scanner”, <http://www.brightspec.be/brightspec/?q=node/25>, (Erişim tarihi: 5 Şubat 2018)
- Cuesta, C., Amaré, J., Cebrián, S., García, E., Ginestra, C., Martínez, M., Oliván, A. M., Ortigoza, Y., Solórzano, A. O., Pobes, C., Puimedón, J., Sarsa, M.L., Villar, J. and A., Villar, P.**,2018, “ Analysis Of The 40k

Contamination In NaI(Tl)Crystals From Different Providers In The Frame Of The Anais Project”, *International Journal of Modern Physics A* 29.

Çekiç, B., 2010, Brokoli (*Brassica oleracea Italica*) ekstraktı ile beslenen Albino Wistar sıçanlarda ^{99m}Tc -GH bileşiğinin tutulumu, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Nükleer Bilimleri Enstitüsü

Demirbağ, Ç., 2012, Bazı Deniz Kabuklularında Bulunan İndigo Türevlerinin Metal Komplekslerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İstanbul, 97 s.

Eckert & Ziegler Radiopharma, Inc., “radio-TLC Imaging Scanner”, <https://radiopharma.com/product/ar-2000/> (Erişim tarihi: 20 Aralık 2017)

Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi, 2014, Radyasyon Güvenliği El Kitabı, 53s.

Elysia S.A., “radio-TLC scanners” <http://www.elysia-raytest.com/en/cataloglight/c4~radio-tlc> , (Erişim tarihi: 25 Mart 2019)

Erdal, H., Adım Motorları, <https://mimoza.marmara.edu.tr/~herdal/stepmotors/ADIMMOTORLARI.ppt> (Erişim tarihi: 20 Şubat 2019)

Erdik, E., Obalı, M., Yüksekşık, N., Öktemer, A., Pekel, T. ve İhsanoğlu, E., 2000, Denel Organik Kimya, Ankara, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları; 3. Baskı, 835s.

FIU, “Photo Multiplier”, http://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/scint_compton.html# (Erişim tarihi: 18Şubat 2019)

Friedman, H., 1949, Geiger Counter Tubes, *Proceedings of the IRE*, Volume: 37, 791-808 pp.

Centronic, “Geiger Müller tubes”, <https://www.rsp-italy.it/Electronics/Databooks/Centronic/contents/Centronic%20-%20Geiger%20Tube%20Theory%20-%20ISS1.pdf> (Erişim tarihi: 28 Ekim 2018)

- Chae, K.Y., Cha, S.M. and Gwak, M.S.**, 2014, Development of a Portable Gas-filled Ionization Chamber, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol: 64, 516-521pp.
- Croisette, D. H. L. and Yarwood, J.**, 1951, The gas-filling and some characteristics of bromine-quenched Geiger-Müller counters,*Journal of Scientific Instruments*,Vol:28, 225-228pp.
- Fulbright, H. W.**, 1979, Ionization Chambers, *Nuclear Instruments And Methods*, 162:21-28pp.
- Garwin, E.L. and Roder, A.**, 1971, Emission Spectra Of Plastic Scintillators <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-tn-70-037.pdf> (Erişim tarihi: 21 Şubat 2019)
- Gündüz, T.**, 2002, Instrümental Analiz, Gazi Kitapevi, 5. Baskı, 1115 – 1273 s.
- Grillini, P. M.**, 2006, Thin-layer chromatography, *Comprehensive Analytical Chemistry*, 47(13): 413 – 442 p.
- Haar. J.**, “Iodine-131 Release Spreading Through Europe”, <https://www.decodedscience.org/iodine-131-release-spreading-through-europe/5688> (Erişim tarihi: 28 Nisan 2019)
- Haines, C, L.**, 1936, “Starting Potentials of Geiger-Müller Counters”, *Review of Scientific Instruments* 7,
- Ioannis C. K. and Emmanuel C. T.**, 2010, “Optimal Design of a Half-Wave Cockcroft–Walton Voltage Multiplier With Minimum Total Capacitance”*IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 25 , Issue: 9).
- Ishigaki, Y., Matsumoto, Y., Ichimiya, R., and Tanaka, K.**, 2013, “Development of Mobile Radiation Monitoring System Utilizing Smartphone and Its Field Tests in Fukushima”, *Sensors Journal*, Vol. 13, No. 10, IEEE.

- ISU Health Physics Radinf**, “Measurement of Radiation, Gas Filled Detector”, <https://sites.google.com/isu.edu/health-physics-radinf/radiation-and-radioactivity/gas-filled-detector> (Erişim tarihi: 3 Eylül 2018)
- Islam M. N., Asaduzzaman Kh., Hoq, M.**, 2012, “Design and Development of a Microcontroller Based Nuclear Counting System”, *Journal of Engineering and Applied Sciences* 7 (3):246-248.
- Jeon, S.J., Kim, K.M., Lim, I., Song, K. and Kim, J.G.**, 2017, Pixelated scintillator-based compact radio thin layer chromatography scanner for radiopharmaceuticals quality control, *Journal of Instrumentation*, 12.
- Jurisson, S. S. and Lydon, J. D.**, 1999, Potential Technetium Small Molecule Radiopharmaceuticals, *Chem, Rev.*, 99, pp. 2205-2218.
- Kamal, A.**, 2014, *Nuclear Radiation Detectors*, 1-78, Springer Heidelberg New York, 529P.
- Karadeniz, S.**, 2012, “Yarıiletken Dedektörler”, TAEK-SNAEM, VIII. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları Ve Dedektörleri Yaz Okulu, <https://indico.tarla.org.tr/event/29/sessions/104/attachments/825/326/skaradeniz.pdf> (Erişim tarihi: 12 Kasım 2018)
- Koltick, D.S., Novikov, I. S. and M. Harmless, H. M.**, 2008, “Geiger-Muller Tube-Based System and method for Radation Detection”, Patent No:US 2008/015947.6 A1
- Knoll, G. F.**, 2000, *Radiation Detection and Measurement* 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 796p.
- LabLogicSystems Ltd**, “radio-TLC Scanner”, <https://lablogic.com/nuclear-medicine-and-pet> , (Erişim tarihi: 4 Şubat 2018)
- Lieser, K. H.**, 2001, *Nuclear and Radiochemistry Fundamentals and Applications*, 2nd Edition, WILEY-VCH, Germany, 467p.
- Lutz, G.**, 2007 *Semiconductor Radiation Detectors*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 353p.

Mease, R. C. and Lambert, C., 2001, Newer Methods of Labeling Diagnostic Agents With Tc-99m, *Seminars in Nuclear Medicine*, 31(4), pp. 278-285).

Millî Eğitim Bakanlığı,2011, Step ve Servo Motorlar Modülü, 522EE0096, Ankara, 46s.

Millî Eğitim Bakanlığı, 2013, Kimya Teknolojisi Kromatografik Analizler, Ankara, 82s.

Nave, R., “Technetium-99m”, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/techneti um.html> (Erişim tarihi: Ocak 2019)

ORTEC, “Introduction to Charged-Particle Detectors”, <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/other/introduction-charged-particle-detectors.pdf?la=en> (Erişim tarihi: 20 Şubat 2019)

Owens, A., 2012, Compound Semiconductor Radiation Detectors, Taylor & Francis, Boca Raton, 567p.

Pilakouta, M., Savidou, A. and Vasileiadou, S., 2016, “A laboratory activity for teaching natural radioactivity”, *European Journal of Physics*, 38-1

Pololu Corporation, 2018, “ A4988 step motor datasheet”, <https://www.pololu.com/file/0J450/a4988 DMOS microstepping driver with translator.pdf> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2018)

Roberts, T.R., 2000, Radiochromatography 1rd ed, 173 p. eBook ISBN: 9780080858142

Royal Society of Chemistry, “technetium”, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/43/technetium> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2019)

Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc.,https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet_69771.pdf (Erişim tarihi:20 Şubat 2019)

Sampson, C. B., 1999, Textbook of Radiopharmacy Theory and Practice, Gordon and Breach Science Publishers, ISBN 90-5699-154-X, p. 530.

- Scionix**, “Plastic Scintillators”, <https://scionix.nl/frame/> (Erişim tarihi: 6Mart 2019).
- Sherma, J. And , Fried, B.**, 2003, Handbook of Thin-Layer Chromatography Third Edition, Marcel Dekker inc, New York, 1030p.
- Skoog, D.A., West, D.M. and Holler, F.J.**, 1999, Fundemantals of Analytical Chemistry(Analitik Kimya Temelleri 2), 7th ed, Editör : Kılıç E, Köseoğlu F, bilim Kitap Ltd. şti., Ankara, s. 701
- TAEK**, 2019, “Radyasyon Çeşitleri” <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/r02.htm> (Erişim tarihi: 19 Nisan 2019)
- Taşdemir, C.**, 2012, Arduino,Dikeyksen Yayınevi 10. baskı, 288s.
- Tsoufanidis, N.**, 1995, Measurement and Detection of Radiation, Taylor & Francis, 2nd Edition, Washington, 636p
- U.S.NRC**, 2010, “Semiconductor Detectors”, <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11229A683.pdf> (Erişim tarihi: 21 şubat 2019)
- Ünak, P., Altun, G. D., Teksöz, S. ve Müftüler, F. Z. B.**, 2017, Uygulamalı Temel Radyofarmasi, Ed., Nobel Tıp Kitapevleri
- Wang, P., Tang, X.B., Gong P., Huang, X., Wen, L.S., Han, Z.Y. and He, J.P.**, 2018,Design of a portable dose rate detector based on a double Geiger–Muller counter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* , 879, 147-152 pp.
- Ware, M. J., Bergeson, S. D., Ellsworth, J. E., Groesbeck, M., Hansen, J. E., Pace, D. and Peatross, J.**, 2015, Instrument for precision long-term β -decay rate measurements, *Review of Scientific Instruments*, 86
- Watanabe, T.**, 1999, A computational analysis of intrinsic detection efficiencies of Geiger–Mueller tubes for photons, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 438 439–446 PP.

Whited, R.C. and Schieber, M.M., 1979, Cadmium Telluride Andmercuric Iodide Gamma Radiation Detectors,113-123, Nuclear Instruments And Methods, 162.

Yousaf, M., Akyurek, T. and Usman, S., 2015, A comparison of traditional and hybrid radiation detector dead-time models and detector behavior, Prog. Nucl. Energy 83, 177–185 PP.

Yurt, A., 2007, DTPA bağlı toremifeninin ^{99m}Tc ile işaretlenerek radyofarmasötik potansiyelinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmalarım süresince Enstitü laboratuvarlarında her türlü çalışma imkânı sağlayan Nükleer Bilimler Enstitü Müdürü Sayın Prof. Dr. Fatma YURT ONARAN' a, laboratuvar çalışmalarım sırasında bana desteğini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Çiğdem İÇHEDEF'e, Sayın Doç.Dr. Ayfer YURT KILÇAR'a, Doktora Öğrencileri Kadriye Büşra KARATAY ve Melise KARATAY KUTMAN'a, Yüksek Lisans öğrencisi Cansu KAYAŞ'a, Yüksek Lisans eğitimim sırasında bana destek olup yol gösteren Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mehmet BAYBURT'a, Yüksek Lisans yapmama imkan sağlayan E.Ü. Hastanesi Müdür Yardımcısı Sayın Öğr. Gör. Ayşe SÖNMEZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda bana destek olan sevgili eşim Arzu SEZER ve değerli aileme çok teşekkür ederim.

29/ 04/ 2019

Fatih SEZER

ÖZ GEÇMİŞ

Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

Adı Soyadı : Fatih SEZER

Doğum Yeri : Balıkesir/TÜRKİYE

Doğum Yılı : 23/01/1975

Medeni Hali : Evli

E-Posta : fat1347@yahoo.com

Öğrenim Durumu

Yüksek Lisans : Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Uygulamalar (2016-2019)

Lisans : Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
(2010 – 2015)

Ön lisans : Balıkesir Üniversitesi MYO Endüstriyel
Elektronik Bölümü (1994-1996)

Lise : Balıkesir 100. Yıl Endüstri Meslek Lisesi
Elektronik Bölümü (1992-1994)

Mesleki Deneyim:

Sorumlu Yönetici : Ege Üniversitesi Hastanesi (2018-Devam
ediyor)

EKLER

Ek1: TLRC Tarayıcı cihazın Maliyet Tablosu ve Özellikleri

Ek-2: Tez kapsamında geliştirilen TLRC Tarayıcı programı Arduino kodu



Ek1: TLRC Tarayıcı cihazın Maliyet Tablosu ve Özellikleri**Maliyet Tablosu**

KULLANILAN MALZEME	FİYAT (TL)
Tarayıcı ray seti (30 cm) ve bağlantı parçaları	300
Adım motoru (Nema 17 - 17HS2408S)	200
Adım motor sürücü kartı (A4988)	20
Arduino Mega Kartı	200
GM dedektörü (ZP 1400)	2000
Yüksek Gerilim Kaynağı ve Amplifikatör Tasarımı	250
Diğer aksamlar ve parçalar	500
Toplam	3470 TL

Birim malzeme fiyatları dolar kuru üzerinden Türk Lirası karşılıkları çıkarılarak hesaplama yapılmıştır. (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası 29.04.2019)

TLRC Tarayıcı Özellikleri:

- **Tarama alanı:** 20 cm'ye kadar TLRC şeritleri
- **Radyasyon tipi:** 1 MeV' den düşük enerjili gamalar (^{99m}Tc , ^{131}I)
- **Çözünürlük:** 1 ve 1,5 mm (ayarlanabilir)
- **Tarama hızı:** 1 mm/s (ayarlanabilir).
- **Kullanıcı arayüzü:** Arduino seriport ekranı (tarama sonucu oluşan piklerin konumları, değerleri ve grafiği görebilme).
- **Kullanımı basit**
- **Bakımı kolay**
- **Kullanılan dedektör tipi dolayısıyla gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaz**

Ek 2- Tez kapsamında geliştirilen TLRC Tarayıcı programı Arduino kodu

```

int cozunurluk = 800; //1200 ise 1.5mm,800 ise 1mm, 400 ise 0.5mm
//aralıklarda örnek alır
int hiz = 625; //625=1mm/s, 937.5=0.66mm/s, hız ayarını belirler,
byte sayimpin = 2;
byte stepPin = 5; //yön pini
byte dirPin = 4; //adım komutu giriş pini
//byte geiger_input = 2; // harici kesme girişi
byte ustsivic = 3; //üst sınır sivic pini
byte bbuton = 7; //baslatma butonu
byte altsivic = 6; //alt sınır sivic pini
byte stepkart = 8; //MOTOR KARTI KONTROL
long int count = 0; // sayımın tutulduğu sabit
long int data [420]; // verinin tutulduğu tek boyutlu dizi,
//konum p'de tutuluyor.
int i = 0;
int p = 0;
float maks = 0; //bölme işleminde kullanılacak
int konum = 0;
int yaz = 0;
float a = 0; //rasyonel sayı olarak
int durum = 0;
//long int z1 = 0;
//long int z2 = 0;
float sure = 0;
//////////Geiger sayaç modu çalışma sabitleri
byte secimpin = 22; //Geiger modu-Tarayıcı modu seçim butonu bağlı
long int G = 0; //geiger sayacının tutulduğu sabit

void setup() {
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(altsivic, INPUT );
  pinMode (bbuton, INPUT);

```

```

pinMode (ustsivic, INPUT_PULLUP);
pinMode (stepkart, OUTPUT);
pinMode (sayimpin, INPUT);
Serial.begin(9600);
attachInterrupt(0, PalsSay, FALLING); // 2nolu pin
// attachInterrupt(1,kesme,FALLING);// 3nolu pin
analogWrite(13, 127);//-----silinecek
}
void loop() {
  digitalWrite (stepkart, HIGH);// stepkartı kapat
  if (digitalRead (6) == LOW) {alt sivici oku hazır degilse geri git
geri();
  }
  altsivic = digitalRead (6); //sınır sivic oku
  ustsivic = digitalRead (3);// üst svici oku
  bbuton = digitalRead (7); //baslat butonunu oku
  if ((bbuton == HIGH && altsivic == HIGH ) && ustsivic == HIGH) {
tarama();
  }
  secimpin = digitalRead (22);
  if (secimpin == HIGH) {
    Geiger();
  }
  if (Serial.available()) {
    Serial.read();
tarama();
  }
}
void tarama() {
  if (Serial.available()) {
    Serial.print("Tarama hızını giriniz ");
    hiz = Serial.read();
  }
  digitalWrite (stepkart, LOW); //stepkartı aktif et
  digitalWrite(dirPin, HIGH); // ileri yonde hareket komutu

```

```

//sivicden kurtulma mesafesi
for ( int y = 0; y < 19500; y++) { //Tarama noktasına ulaşınca
//kadar olan mesafe için
digitalWrite(stepPin, HIGH);
delayMicroseconds(20);
digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(20);
digitalWrite(stepPin, HIGH);
delayMicroseconds(20);
digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(20);
ustsivic = digitalRead(3); //sona gelme kontrolü
if (ustsivic == LOW) {
geri();
}
}
//sayacı tarama başlamadan önce sıfırla
digitalWrite (stepkart, LOW); //stepkartı aktif et
digitalWrite(dirPin, HIGH); // ileri yonde hareket komutu
//z1 = millis();

//VERİ TOPLAMA modu başlıyor-----
//1mm yol alması için 800 adım gerekir.
p = 0; //konum sayıcısını sıfırla
count = 0; //pals sayıcıyı sıfırla
for (i = 1; i < 420; i++) { //210mm ye ayarlanmış maxumum yol
// Hızı belileyen döngü
for (int x = 0; x < cozunurluk; x++) {
digitalWrite(stepPin, HIGH);
delayMicroseconds(hiz); //
digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(hiz); // 1 periyotluk kare dalga tamamlandı
}
data[i] = count;
p++;

```

```

count = 0;
ustsivic = digitalRead(3);//sona gelme kontrolü
if (ustsivic == LOW) {
break;
}
}
//z2 = millis();
a = 0;
konum = 0;
maks = 0;
yaz = 0;
delay(1000);

//maksimum değer bulma
for (int d = 1; d <= p; d++) { //p, katedilen maksimum milimetreyi ifade eder
if (data[d] > maks) {
maks = data[d];
konum = d;
}
}
//grafik fonksiyonunu başlat
for (int d = 1; d <= p; d++) {
Serial.print(d);
Serial.print("- ");
Serial.print(data[d]);
Serial.print(" ");
a = data[d] / maks ; //sayının büyümemesi için önce bölme yapıldı
yaz = a * 50 ; //en fazla 100 karakter olacak şekilde ayarla
for (int t = 0; t <= yaz; t++) { //Grafik oluşturmak için sayım
//miktarı kadar sağa doğru çizgiler koyar
Serial.print("|");
//Serial.print(yaz);
}
Serial.println();
}

```

```

//genel bilgileri yaz-----
Serial.print("çözünürlük= ");
Serial.println(cozunurluk);
Serial.print("hız");
Serial.print("hiz");
Serial.print("konum: ");
Serial.print(konum);
Serial.print(" de , Maksimum değer= ");
Serial.print(maks);
Serial.print(" Rf=");
Serial.print((konum - 5) / ((p / (800.00 / cozunurluk)) - 5)); //Rf nin bulunması

Serial.println();
//sure = ((z2 - z1) / 1000.00);
Serial.print("sure(sn)=");
Serial.print(sure);
Serial.print(" Çözücü Yürüme mesafesi(mm)= ");
Serial.println(p / (800.00 / cozunurluk));
//konumu yatay yazdır-----
for (int d = 1; d <= p; d++) {
    Serial.print(d);
    Serial.print(", ");
}
Serial.println();
//datayı yatay yazdır
for (int d = 1; d <= p; d++) {
    Serial.print(data[d]);
Serial.print(", ");
}
Serial.println();
geri();
}

void geri() { //DEDEKTÖR GERİ YÜRÜTME
    digitalWrite (stepkart, LOW); //stepkartı aktif et

```

```
digitalWrite(dirPin, LOW); // geri yönlendirme komutu
while (digitalRead(6) == 0) {
  digitalWrite(stepPin, HIGH);
  delayMicroseconds(20);
  digitalWrite(stepPin, LOW);
  delayMicroseconds(20);
}
digitalWrite (stepkart, HIGH); //stepkartı kapat
}
void PalsSay() { //dedektörden gelen den gelen puls kesmesi
  detachInterrupt(0); //2nolu pin için sıfır kodu, 3nolu pin için 1 kodu
  count++;
  attachInterrupt(0, PalsSay, FALLING);
}
void Geiger() {
  for (int y = 0; y < 100; y++) {
    delay(2000); //1 saniyelik sayımlar alıyor
    G = count;
    Serial.println(G);
    count = 0;
    if (digitalRead(22) == LOW) {
break;
    }
  }
}
[/code]
```