

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DÜŞÜK SEVİYE SIVI SİNTİLASYON SAYIM (LSC) TEKNİĞİ İLE İÇME SULARINDA  
TOPLAM ALFA VE BETA AKTİVİTESİNİN ÖLÇÜLMESİ İÇİN STANDART BİR YÖNTEM  
UYGULANMASI**

**RUFİYET GÜVEN**

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI**

**SAĞLIK FİZİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ANKARA**

**2015**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Rufiyet GÜVEN tarafından hazırlanan “Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Sayım (LSC) Tekniği İle İçme Sularında Toplam Alfa ve Beta Aktivitesinin Ölçülmesi için Standart Bir Yöntem Uygulanması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı Sağlık Fiziği Programı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç.Dr. Gaye Özgür ÇAKAL

**Eş Danışman** : Prof. Dr. Haluk YÜCEL

**Jüri Üyeleri** :

**Prof. Dr. Haluk YÜCEL**

Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Medikal Fizik Anabilim Dalı

**Prof. Dr. Mustafa KARADAĞ**

Gazi Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fizik Bölümü

**Doç. Dr. Niyazi MERİÇ**

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

**Doç. Dr. Mustafa Çetin GÜLEÇYÜZ**

Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

**Yrd. Doç. Dr. Gaye Özgür ÇAKAL**

Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Medikal Fizik Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Doç. Dr. Niyazi MERİÇ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DÜŞÜK SEVİYE SIVI SİNTİLASYON SAYIM (LSC) TEKNİĞİ İLE İÇME SULARINDA TOPLAM ALFA VE BETA AKTİVİTESİNİN ÖLÇÜLMESİ İÇİN STANDART BİR YÖNTEM UYGULANMASI

Rufiyet GÜVEN

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Gaye Özgür ÇAKAL

Eş Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

İnsanların maruz kalabileceği doğal radyasyon, karasal ve kozmik kaynaklardan ileri gelir. İçme sularının kaynağı yer altı sularıdır ve yer altı sularına kayalardan çözünerek geçen radyonüklitler sebebiyle sulara her zaman radyoaktivite bulunma riski vardır. İçme suları kaynaklı alfa ve beta iyonlaştırıcı radyasyonunun dokularda oluşturabileceği hasarı ve dolayısıyla, sağlık riskini asgaride tutmak gereklidir. Bu nedenle, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) içme suları nedeniyle kişinin alabileceği dozu 0,1 mSv/yıl ile sınırlamıştır. İçme sularının radyasyon açısından izlenmesinde, Avrupa Birliği tarama seviyesini toplam alfa aktivitesi için 0,1 Bq/L ve toplam beta aktivitesi için 1 Bq/L olarak belirlemiştir. Bu değerler, Ulusal mevzuatımız gereği aynı şekilde uygulanmaktadır. İçme sularındaki toplam alfa ve beta yayıncılar için izin verilen aktivite sınır değerlerinin altında kalan, düşük seviyedeki radyoaktivitenin hassas şekilde ölçülmesi çok önemlidir.

Bu tez çalışmasının amacı, içme sularında radyoaktivite ölçümü için EPA 900 prosedürüne göre geleneksel yöntem orantılı sayaç (PC) ve ASTM D7283-06 prosedürüne göre düşük seviye radyoaktivite ölçebilen sıvı sintilasyon sayım (LSC) tekniklerini karşılaştırmaktır. İçme suyu örnekleme en az 1 L olmak üzere, Ankara'nın farklı semtlerinden alınan 53 adet musluk suyu ile 38 adet ticari şişe suyu toplanarak yapılmıştır. Laboratuvarında numuneler, numune kabına radyonüklit adsorpsiyonunu önlemek amacıyla PH<2 olacak şekilde asitlendirilmiştir. Aynı numuneden belirli hacimlerde ayrılan özdeş numuneler, belirli işlemlere göre hazırlandıktan sonra, P-10 gaz akışlı orantılı sayaç (Canberra LB4110) ve düşük seviye LSC (Quantulus1220) ölçüm sistemleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Her iki teknikle de yapılan toplam alfa ve toplam beta analizleri sonucunda, Ankara ili musluk sularında ve şişe sularında, izin verilen aktivite sınır değerlerinin üzerinde bir radyoaktiviteye rastlanmamıştır. Rutin radyoaktivite taramalarında, düşük seviye LSC tekniğinin, numune hazırlama süreci daha basit, PMT'nin yüksek sintilasyon verimi nedeniyle daha kısa sayım süresinde yüksek sayım istatistiği vermesi sonucu kesinliği ve doğruluğu daha yüksek, tekrarlanabilir sonuçların elde edildiği ve daha güvenilir olduğu değerlendirilmiştir. Tezde elde edilen analiz bulgularına dayalı olarak bu iki yöntemin uyumu ve farklılıkları tartışılmıştır.

2015,79 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** İçme suyu, toplam alfa ve beta, LSC, orantılı sayaç, puls şekil analizi (PSA), düşük seviye aktivite

## **ABSTRACT**

### **Master Thesis**

## **APPLICATION OF A STANDARD METHOD FOR THE MEASUREMENT OF GROSS ALPHA AND BETA ACTIVITIES IN DRINKING WATER BY USING LOW LEVEL SCINTILLATION COUNTING (LSC) TECHNIQUE**

**Rufiyet GÜVEN**

**Ankara University Institute of Nuclear Sciences**

**Department of Medical Physics**

**Health Physics Master Degree Program**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gaye Özgür ÇAKAL**

**Co-supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL**

The natural radiation exposure to human being is mainly arising from terrestrial and cosmic sources. The source of drinking water is under-groundwater and there is always a risk of radioactivity due to the presence of radionuclides coming from the rocky structures. It is essential that hazards to tissue, and hence the health risks due to alpha and beta ionizing radiation from radionuclides in drinking waters is kept at a minimum level. For this reason, World Health Organization (WHO) stipulated the radiation dose limit of 0.1 mSv/y for the individual, depending on drinking water consumption. For survey purposes, European Union (EU) was determined the allowed limits of drinking waters for gross alpha activities as 0.1 Bq/L and gross beta activities as 1 Bq/L. These limit values are also adopted in our National Regulations. Therefore, it is very important to measure accurately these very low level radioactivities occurring in drinking water samples.

The aim of this thesis is to compare conventional proportional counter (PC) technique using EPA 900 method with low level Liquid Scintillation Counting (LSC) technique using ASTM D7283-06 standard. 53 tap water samples from different districts of Ankara and 38 commercial bottled waters each having at least 1 L were used in this study. The collected samples were then conditioned, by keeping in the laboratory as pH<2 to avoid the radionuclide adsorption on the walls of the container. Identical samples prepared from the same coded sample were prepared according to the procedures and analyzed by using gas flow (P-10) proportional counter (Canberra LB 4110) and low level LSC system (Quantulus 1220).

The gross alpha and beta activity results in the Ankara tap water and bottled water samples obtained by using both of these techniques indicated that there is no observed the radioactivity values above the required limits. In routine radioactivity surveys, low level LSC technique can be considered to be a more reliable method due to its relatively easy sample preparation and high scintillation efficiency of PMTs, thus resulting in high sensitivity. With use of LSC method, reproducible, more accurate and precise results can be obtained as a result of high count statistics acquired in a short time. In the thesis, the advantages and disadvantages of these two practical techniques based on our measurements in drinking water were compared and discussed.

**2015,79 pages**

**Key Words:** Drinking water, gross alpha and beta, LSC, proportional counter, pulse shape analysis (PSA), low level activity

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca özgün fikirleri, derin bilgisi ve paylaşımcı yapısıyla bana her zaman yol gösteren ve yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof.Dr.Haluk YÜCEL'e, çözümleyici ve pozitif tutumuyla her konuda desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Gaye Ö. ÇAKAL'a, üzerimde emeği olan bütün hocalarıma,

Özellikle örnek toplama aşamasında yanımda olup destek veren bütün arkadaşlarıma, Sezen LİMON'a, Asuman KOLBAŞI'na, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nün bütün idari ve akademik personeline,

Bütün yaşamım boyunca hiçbir konuda desteğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen annem Firdevs KURT'a, varlığıyla bize mutluluk veren kızımız Nevin Ece GÜVEN'e, her zaman destekçim olan eşim Mehmet H. GÜVEN'e, yeğenim Ali GÜL'e ve bütün aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Rufiyet GÜVEN

Ankara, Ağustos 2015

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iv</b>
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>3</b>
2.1 İçme Suyundaki Radyasyon Kaynakları ve Sağlık Etkisi.....	3
2.2 İçme Sularında Toplam Alfa ve Beta Analizi .....	7
2.2.1 Orantılı Sayaç Tekniği ile Radyoaktivite Ölçümü .....	11
2.2.1.1 Gaz Akışlı Orantılı Sayacın Çalışma Prensibi .....	12
2.2.2 Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Tekniği ile Radyoaktivite Ölçümü .....	19
2.2.2.1 Sıvı Sintilasyon Sayım (LSC) Sistemi Çalışma Prensibi.....	20
<b>3. MATERYAL VE METOD</b> .....	<b>30</b>
3.1 Örnekleme .....	30
3.2 Örnek Hazırlama .....	31
3.2.1 Orantılı Sayaç Tekniği için Örnek Hazırlama.....	32
3.2.1.1 Numune Özsoğurması için Standart Hazırlama.....	32
3.2.1.2 İçme Suyu Örneklerinin Hazırlanması.....	32
3.2.2 LSC Tekniği için Örnek Hazırlama .....	33
3.2.2.1 Alfa ve Beta PSA (Puls Şekil Analizi ) Standart Kalibrasyon Örneklerinin Hazırlanması.....	33
3.2.2.2 Alfa, Beta ve Radyoaktif Olmayan (Boş) Matris Standart Setlerinin Hazırlanması.....	33
3.2.2.3 İçme Suyu Örneklerinin Hazırlanması.....	34
3.3 Toplam Alfa ve Beta Tayin Yöntemleri.....	35
3.3.1 Orantılı Sayaç İle Toplam Alfa ve Beta Tayini .....	35
3.3.1.1 Orantılı Sayaç Kalibrasyonları .....	36
3.3.1.1.1 Plato Kalibrasyonu .....	36
3.3.1.1.2 İstenmeyen Karışma (Crosstalk) Kalibrasyonu .....	37

3.3.1.1.3 Doğal Fon Kalibrasyonu .....	37
3.3.1.1.4 Verim Kalibrasyonu .....	38
3.3.1.1.5 Özsoğurma Etkisinin Belirlenmesi .....	39
3.3.1.2 Örneklerin Sayılması ve Aktivite Derişimlerinin Belirlenmesi .....	39
3.3.1.3 Asgari Ölçülebilen Derişim (MDC) Hesabı.....	40
3.3.2 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi (LSC) İle Toplam Alfa ve Beta Tayini.....	40
3.3.2.1 LSC Kalibrasyonları.....	41
3.3.2.1.1 PSA Kalibrasyonu .....	41
3.3.2.1.2 Verim ve Sönümlenme Etkisinin Belirlenmesi.....	42
3.3.2.2 Örneklerin Sayılması ve Aktivite Derişimlerinin Belirlenmesi .....	44
3.3.2.2.1 Taşma (Spillover) faktörünün belirlenmesi .....	44
3.3.2.2.2 Net sayım hızının hesaplanması.....	45
3.3.2.2.3 Net sayım hızının taşma (spillover) düzeltmesi .....	46
3.3.2.2.4 Aktivite derişimlerinin hesaplanması.....	47
3.3.2.2.5 Asgari ölçülebilen derişim (MDC) hesabı .....	47
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>49</b>
4.1 Orantılı Sayaç Tekniğı ile Elde Edilen Bulgular.....	49
4.1.1 Orantılı Sayaç Kalibrasyonları .....	49
4.1.1.1 Plato Kalibrasyonu .....	49
4.1.1.2 İstenmeyen Karışma (Crosstalk) Kalibrasyonu .....	50
4.1.1.3 Doğal Fon Kalibrasyonu .....	50
4.1.1.4 Verim Kalibrasyonu .....	51
4.1.1.5 Özsoğurma Etkilerinin Belirlenmesi.....	52
4.1.2 Orantılı Savaşta Toplam Alfa ve Beta Aktivite Derişimleri.....	56
4.2 Sıvı Sintilasyon Sayacı ile Elde Edilen Bulgular.....	57
4.2.1 LSC Kalibrasyonları.....	57
4.2.1.1 PSA (Puls Şekil Analizi) Kalibrasyonu .....	58
4.2.1.2 Verim ve Sönümlenme Etkisinin Belirlenmesi.....	59
4.2.2 LSC’de Toplam Alfa ve Beta Aktivite Derişimleri .....	62
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>78</b>

## SİMGELER DİZİNİ

bis-MSB	1,4-Bis(2-metilsitril)benzen
PBD	2-(4-Bifenilil)-5-fenil-1,3,4-oksadiazol
POPOP	1,4-bis(5-feniloksazol-2-il)benzen
PPO	2,5-difeniloksazol

## KISALTMALAR

ALL	Alfa Alt Seviye (Alpha Lower Level)
BUL	Beta Üst Seviye (Beta Upper Level)
GL	Gösterge Seviyesi (Guidance Level)
IDC	Kişisel Doz Dönüşüm Faktörü (Individual Dose Conversion)
M	Gaz Çoğalma Faktörü (Gas multiplication factor)
MCL	İzin Verilen Azami Derişim Seviyeleri (Max. Concentration Level)
MDC	Asgari Ölçülebilen Derişim (Min. Detectable Concentration)
MDA	Asgari Ölçülebilen Aktivite (Min. Detectable Activity)
PD	Puls Ayrımı (Pulse Discrimination)
PDD	Puls Bozunma Ayrımı (Pulse Decay Discrimination)
PDA	Puls Bozunma Analizi (Pulse Decay Analysis)
PMT	Fotoçoğaltıcı Tüp (Photomultiplier Tube)
PSA	Puls Şekil Analizi (Pulse Shape Analysis)
QIP	Sönümlenme Gösterge Parametresi (Guench Indicating Parameter)
ROI	İlgilenilen Bölge (Region of Interest)
TR-PDA	Zaman Çözümlü Puls Bozunma Analizi (Time Resolved Pulse Decay Analysis)



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Sularda radyolojik tehlikeleri kontrol basamakları.....	9
Şekil 2.2 Orantılı sayacın temel elemanları .....	12
Şekil 2.3 Orantılı sayaçta alfa ve beta pulsları ve platoları.....	16
Şekil 2.4 Beta üst seviye (BUL) ve alfa alt seviye (ALL) ayırıcılar ve bu iki seviye arasında kalan ölü bant .....	17
Şekil 2.5 Sıvı Sintilasyon Sayımında Salınan Radyasyonun Kaydedilmesi .....	22
Şekil 2.6 Bir çözücü moleküle ait enerji seviye diyagramı.....	22
Şekil 2.7 Çift PMT'li LSC'de sinyal toplanması .....	23
Şekil 2.8 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen alfa yayınlayıcı <sup>241</sup> Am ve beta yayınlayıcı <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y radyonüklitlerinin spektrumları .....	24
Şekil 2.9 Sönümleme ile gerçekleşen verim kaybına örnek .....	25
Şekil 2.10 Jablonski enerji diagramı .....	26
Şekil 2.11 <sup>36</sup> Cl ve <sup>241</sup> Am için PMT anodunda oluşan elektrik pulsları.....	27
Şekil 2.12 Sıvı sintilatörde alfa ve beta pulslarının karakteristik ışık puls şekilleri .....	28
Şekil 3.1 Ankara ilinden toplanan musluk suyu numunelerinin alındığı yerlerin konumları .....	30
Şekil 3.2 Ticari olarak satın alınan şişe sularının dolun tesislerinin konumları .....	31
Şekil.3.3 Örnek toplanmasından sayım alımına kadar uygulanan basamaklar .....	31
Şekil 3.4 Orantılı sayaçta ölçülmek üzere paslanmaz çelik planşet içinde hazırlanmış su numunesi.....	32
Şekil 3.5 LSC'de ölçülmek üzere cam vialde hazırlanmış su numunesi .....	35
Şekil 3.6 Canberra LB4110 Düşük Seviye Alfa ve Beta Sayım Sistemi.....	36
Şekil 3.7 Quantulus 1220 Ultra Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi.....	41
Şekil 4.1 Orantılı sayaçta elde edilen plato eğrisi .....	49
Şekil 4.2 A1 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi .....	52

Şekil 4.3 A2 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi .....	52
Şekil 4.4 A3 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi .....	53
Şekil 4.5 A4 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi .....	53
Şekil 4.6 A1 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi.....	54
Şekil 4.7 A2 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi.....	54
Şekil 4.8 A3 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi.....	55
Şekil 4.9 A4 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi.....	55
Şekil 4.10 Sıvı Sintilasyon Sayım Sisteminin PSA kalibrasyonu eğrisi .....	58
Şekil 4.11 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen alfa yayınlıyıcı <sup>241</sup> Am radyonüklitlerinin spektrumlarında sönümlemenin etkisi .....	59
Şekil 4.12 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen beta yayınlıyıcı <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y radyonüklitlerinin spektrumlarında sönümlemenin etkisi .....	59
Şekil 4.13 Alfa parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütle sine bağlı değişimi .....	60
Şekil 4.14 Alfa parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütle sine bağlı değişimi .....	61
Şekil 4.15 Beta parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütle sine bağlı değişimi .....	61
Şekil 4.16 Beta parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütle sine bağlı değişimi .....	62
Şekil 4.17 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen 35 numaralı musluk suyuna ait alfa ve beta pencerelerindeki spektrumlar.....	63
Şekil 5.1 T kodlu Ankara ili musluk suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam alfa aktivite derişimleri.....	68
Şekil 5.2 B Kodlu ticari şişe suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam alfa aktivite derişimleri.....	68
Şekil 5.3 T kodlu Ankara ili musluk suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam beta aktivite derişimleri .....	69
Şekil 5.4 B Kodlu ticari şişe suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam beta aktivite derişimleri .....	70

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 İçme sularında bulunabilecek bazı radyonüklitlerin dokudaki menzilleri.....	5
Çizelge 2.2 ICRP yumuşak dokusu ve A150 doku eşdeğeri plastik malzeme kompozisyonları .....	6
Çizelge 2.3 İçme Sularında Toplam Alfa ve Beta için İzin Verilen En Yüksek Derişim Seviyeleri (MCL) .....	8
Çizelge 2.4 Bazı radyonüklitler için gösterge seviyeleri (GL) ve doz dönüşüm faktörleri .....	10
Çizelge 3.1 Orantılı sayacın alfa ve beta verim değerlerini belirlemek için kullanılan standart kaynak bilgileri .....	38
Çizelge 4.1 Orantılı sayaçta crosstalk kalibrasyonu değerleri .....	50
Çizelge 4.2 Orantılı sayaç doğal fon değerleri.....	50
Çizelge 4.3 Planşet geometrisi için (5,02cm çaplı) orantılı sayacın alfa ve beta parçacıkları için verim değerleri .....	51
Çizelge 4.4 Musluk suyu örneklerinin orantılı sayaç ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri.....	56
Çizelge 4.5 Şişe suyu örneklerinin orantılı sayaç ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri.....	57
Çizelge 4.6 Musluk suyu örneklerinin LSC ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri.....	64
Çizelge 4.7 Şişe suyu örneklerinin LSC ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri.....	65
Çizelge 5.1 LSC ve PC tekniklerinin uygulanması için kullanılan mevcut sayım sistemlerine ait bazı parametreler.....	71

## 1. GİRİŞ

İnsanların doğal radyasyon kaynaklı ışınlanmalarına karasal ve kozmik radyasyon sebep olur. Toprak ve kayalardan salınan radon gazı ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $T_{1/2}=3.8$  gün) ve toron gazı ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $T_{1/2}=55.6$  s), toprak içeriğindeki uranyum, toryum ve bunların bozunma ürünleri ile aynı zamanda  $^{40}\text{K}$  ve atmosferden gelen kozmik radyasyon doğal radyasyonlardır. Su ve gıdalarla birlikte vücudumuza aldığımız  $^{40}\text{K}$  gibi radyonüklitler nedeniyle az da olsa vücudumuzda doğal radyoaktivite vardır. İçme sularının kaynağı ise yeraltı sularıdır. Yeraltı sularına kayalardan çözünerek geçen radyonüklitler sebebiyle sularda radyoaktivite bulunması her zaman mümkündür. Doğal radyonüklitlerden yayınlanan alfa ve beta parçacıkları, yüklü ve enerjetik parçacıklar olup, iyonlaştırıcı radyasyon olarak iç ışınlamalarda tüm enerjilerini dokuya bırakmaları nedeniyle doz riskleri yüksektir. Çevrede doğal olarak var olan alfa yayınlı radyonüklitlerin çoğu, 4-6 MeV enerji bölgesinde parçacıklar yayınlırlar. Benzer şekilde, yayınlanan beta parçacıklarının maksimum uç nokta enerjileri ( $E_{\max}$ ) tipik olarak 2,5 MeV'in altındadır. Bir kağıt ile durdurulabilecek kadar kısa menzilli olan alfa parçacıkları veya havada birkaç cm'den birkaç metreye kadar yol alabilen beta parçacıkları, ciltten içeriye girdiklerinde doz etkileri ciddi doku hasarına neden olabilir. Buna karşılık bu parçacıklar, özellikle alfalar, vücuda solunum ve gıda yoluyla (ya da açık yaradan) girmiyorsa genelde zarar vermeden cilt yüzeyinde ölü tabakada (0,07 mm) soğurulurlar. Radyonüklitler, vücut içine alındığında ise doku ve hücre hasarına sebep olarak kanser riskini arttırlırlar (ICRP 103 2007).

İçme suları kaynaklı alfa ve beta iyonlaştırıcı radyasyonunun dokularda oluşturabileceği hasarın ve dolayısıyla, sağlık riskinin asgari düzeyde tutulması gereklidir. Sulardaki toplam alfa ve beta yayınlı radyonüklitler için izin verilen aktivite sınır değerlerinin altında kalan, düşük seviyedeki radyoaktivitenin hassas şekilde ölçülmesi çok önemlidir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) içme suları nedeniyle kişinin alabileceği dozu 0,1 mSv/yıl ile sınırlamıştır. Avrupa Birliği'nin 98/83/EC sayılı insani kullanım amaçlı suların kalitesine dair konsey direktifinde alfa yayınlı radyonüklitler için 0,1 Bq/L, beta yayınlı radyonüklitler için 1 Bq/L sınır değerleri verilmektedir. Bu değerler, Ulusal mevzuatımız İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (25730 sayılı ve 17/2/2005 tarihli Resmi Gazete) gereği aynı şekilde uygulanmaktadır. Toplam alfa ve beta analizi birçok amaç

için yapılır. Havza kaynak su temini, şehir şebeke suyu, arazide kuyu açılması, artezyen suları, nehir suları, göl ve baraj sularında çevresel radyoaktivite, düşük seviye sıvı atıklar, işyeri taramaları, düşük seviye radyoaktif atıkların karakterizasyonu ve kaza sonrası çevresel kirlilik durumlarında uygulanır.

Bu tezde, içme sularındaki alfa ve beta radyoaktivite içeriği nedeniyle oluşabilecek içme suyu radyasyon dozunun değerlendirilmesinde temel alınacak toplam alfa ve toplam beta aktivitelerinin ölçülmesi için iki farklı tekniğin uygulanması amaçlanmıştır. Toplam alfa ve beta radyoaktivite ölçümünde geleneksel olarak kullanılmakta olan P-10 gaz akışlı (%90Ar+%10CH<sub>4</sub>) Orantılı Sayaç (PC) tekniği ve son teknolojik gelişmelerle birlikte son 10 yıldır yaygınlaşan Sıvı Sintilasyon Sayacı (LSC) tekniği kullanılmıştır. Rutin çevresel radyoaktivite izlemeleri için içme suyu örneklerinde radyoaktivite ölçümlerinin yapılması önemlidir. Orantılı sayaç tekniğinde “EPA 900 İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Aktivitesi Tayini Standart Test Metodu”, LSC tekniğinde ise “ASTM D7283-06 Sıvı Sintilasyon Sistemi ile Sularda Alfa ve Beta Aktivitesi için Standart Test Metodu” uygulanarak numuneler hazırlanmıştır. Her iki teknikle de numune sayımları yapılarak aktivite derişimleri (Bq/L) belirlenmiştir.

Yapılan literatür araştırmasından edinilen bilgiye göre; Türkiye’de çeşitli bölge veya iller için toplam alfa ve beta analizi çalışmaları mevcuttur (Yarar ve Kam 2005, Damla vd. 2006, Bozkurt vd. 2007, Kam ve Bozkurt 2007, Değerlier ve Karahan 2010, Yalçın ve Gürler 2006, Karahan vd. 2000). Bugüne kadar uygulanan ölçüm tekniği geleneksel orantılı sayaç tekniğidir. Sınır değerlerinin aşıldığı, Kayseri bölgesi nehir, kuyu, baraj ve maden sularında aktivite değerlerinden standard bir yaklaşımla etkin doza geçiş için de hesaplamalar yapılmıştır (Doğan 2015). Ayrıca, ülkemizde toplam alfa ve beta radyoaktivite analizinde, şimdiye kadar orantılı sayaç tekniği kullanılmasına rağmen, yeni, daha kesin ve doğru sonuçlar verebilen, düşük seviye radyoaktivite ölçümü ile ilgili LSC tekniği kullanılarak yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu tezin birinci bölümünde; radyoaktivite ölçümü ile ilgili kuramsal temeller açıklanmıştır. İkinci bölümünde; materyal ve kullanılan deneysel teknikler verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde elde edilen bulgular sunulmuştur. Tartışma ve sonuç bölümünde ise uygulanan orantılı sayaç ve LSC tekniklerinin birbirlerine üstünlükleri ile mevcut dezavantajları yönünden bir karşılaştırma yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. İçme Suyundaki Radyasyon Kaynakları ve Sağlık Etkisi

Çevresel radyasyon, doğal (kozmetik ve karasal radyasyon) ve çeşitli yollardan üretilen yapay kaynaklardan oluşur. Radyoaktif maddeler çevrede doğal olarak oluşabilir (örnek: Uranyum, Toryum ve bozunma ürünleri, Potasyum-40, Rubidyum-87). İnsanların doğal radyasyona maruziyetinin önemli bir kısmı, doğal kaynaklı radyoaktif maddenin vücuda alınması ile olur.

Radyoizotoplar vücuda solunum (inhalation), gıda yoluyla (ingestion), enjeksiyon ya da açık yaradan girebilir. Radyonüklitler vücudun içerisinde iç ışınlamaya ve dolayısıyla, hücre hasarına neden olurlar. İç ışınlama, vücuttan biyolojik olarak atılınca ve radyonüklit fiziksel olarak tamamen bozununcaya kadar devam eder. Radyonüklit, elementin kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişen bir hızla vücuttan atılır. Aynı elementin bütün izotopları kararlı olup olmamasından bağımsız olarak aynı hızda vücuttan atılır (Tsoulfadinis ve Landsberger 2010).

Doğal kaynaklardan meydana gelen ortalama yıllık insan maruziyeti 2.4 mSv/yıl olarak tahmin edilmektedir (UNSCEAR 2000). İnsanların maruz kaldığı radyasyon birçok faktöre bağlı ve bölgesel değişiklikler gösterebilir. Bunlar; deniz seviyesinden yükseklik, topraktaki radyonüklitlerin türü ve miktarı, hava, gıda ve içme suyundaki radyonüklitlerin kompozisyonu, vücuda solunum veya sindirim yoluyla alınanların miktarıdır.

İçme suyunun radyonüklit içeriği şunlardan oluşabilir:

- Doğal oluşan radyoaktif türler (örneğin içme suyu kaynaklarındaki toryum ve uranyum bozunma serilerindeki radyonüklitler, özellikle  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  ve diğer birkaçı)
- Doğal oluşan radyoaktif maddeleri içeren teknolojik işlemler (örneğin, minerallerin işlenmesi ve çıkarılması ya da fosfatlı gübre üretimi)
- Nükleer tesislerinden atılan radyonüklitler
- Radyonüklit üretimi

- Medikal ya da sanayide radyoaktif maddelerin uygunsuz imhası ile çevreye dağılması
- Önceden çevreye atılan radyonüklitler

İçme suyunun toplam maruziyete katkısı genelde çok küçüktür ve bunun büyük kısmı uranyum ve toryum bozunma serilerinde doğal olarak oluşan radyonüklitlerden kaynaklanır. Nükleer yakıt döngüsünden ve radyoaktif maddenin medikal ya da diğer kullanımlarından ortaya çıkan radyonüklitler içme suyu kaynaklarına da karışabilir. Bu kaynaklar yasal olarak kontrol edilmekte ve içme suyunun kirlenmesi durumunda da kontrol mekanizması devreye girmektedir. (WHO 2004, TAEK 2000)

İyonize edici radyasyon olan alfa ve beta parçacıklarını yayınlayan radyonüklitler sulara bulunabilir. Alfa parçacıkları, yüklü parçacıklardır ve madde içinde oldukça yavaş ilerlerler. Bu nedenle yolları boyunca atomlarla yüksek olasılıkla etkileşirler ve bu etkileşmelerin her biri sırasında enerjilerinin bir kısmını aktarırlar. Sonuç olarak alfa parçacıkları enerjilerini çok hızlı kaybederler ve yoğun ortamlarda çok kısa mesafe gidebilirler. Beta parçacıkları ise alfa parçacıklarından çok daha küçüktür ve daha hızlı ilerlerler. Bu nedenle birim yol boyunca daha az etkileşime girerler ve alfa parçacıklarına göre enerjilerini daha yavaş kaybederler. Beta parçacıkları alfa parçacıklarına göre daha uzun yol alabilirler (Martin vd. 2006).

Çizelge 2.1’de içme sularında bulunabilecek alfa veya beta yayıcı bazı radyonüklerin enerjileri, alfa veya beta yayılma olasılıkları, doz dönüşüm faktörleri ve dokudaki menzilleri verilmiştir. Alfaların enerjileri betaların enerjilerinden oldukça yüksek olmasına karşın dokudaki menzilleri 30-40 µm civarındadır. Betaların menzilleri ise enerjilerine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir.

Çizelge 2.1 İçme sularında bulunabilecek bazı radyonüklitlerin dokudaki menzilleri (NIST 2015)

Radyonüklit (Başlıca yayınlanan parçacık)	Enerji E (keV)	Yayınlanma olasılığı f (%)	Doz dönüşüm faktörü* (MeV/Bq-s)	Dokudaki menzil** (µm)
<sup>238</sup> U (alfa)	4038 (5)	0,078 (12)	0,0031 (5)	26,6
	4151 (5)	21 (3)	0,87 (11)	27,1
<sup>234</sup> U(alfa)	4722,4 (14)	28,42 (9)	1,342 (4)	32,4
	4774,6 (14)	71,38 (16)	3,408 (8)	32,9
<sup>226</sup> Ra(alfa)	4601 (1)	6,16 (3)	0,2834 (14)	31,1
	4784,34 (25)	93,84 (11)	4,490 (5)	33,1
<sup>241</sup> Am(alfa)	5442,80 (13)	13,1 (3)	0,713 (16)	40,4
	5485,56 (12)	84,8 (5)	4,65 (3)	40,9
<sup>228</sup> Ra(beta)	12,7 (7)	30	9,7x10 <sup>-4</sup>	6,4
	25,6 (7)	20	0,00130	23,2
	39,1 (7)	40 (4)	0,0040 (4)	48,9
	39,5 (7)	10,0 (10)	0,00100 (10)	49,7
	7,2 (5) ortalama beta enerjisi	100 (4)	0,0072 (6)	2,4
	546,0 (14)	100	0,1958	2730,0
<sup>90</sup> Sr(beta)	195,8 ortalama beta enerjisi	100	0,196	694,7
	17,0 (5)	84 (3)	0,00349 (17)	1,9
<sup>210</sup> Pb(beta)	63,5 (5)	16 (3)	0,0026 (5)	11,2
	6,0 (6) ortalama beta enerjisi	100 (4)	0,0061 (6)	112,8

\* NNDC veri tabanı (<http://www.nndc.bnl.gov/chart/chartNuc.jsp>)

\*\* A150 doku eşdeğeri plastik

Genelde 10 MeV'den az enerjili yüklü parçacıkların menzili mm ve daha kısa mesafe olduğundan tüm enerjilerini çok küçük bir hacime aktarabilirler. Yüklü parçacıklar için iç ışınlama doz hızı prensip olarak Eşitlik (2.1) ile hesaplanabilir (Yücel 2013).

$$\dot{H} = \frac{\int_0^{\infty} E \times S(E) \times Q(E) \times dE}{m} \quad (2.1)$$



burada;

$\dot{H}$ : Doz hızı (Sv/s)

E: Enerji (J)

S(E): Birim zamanda yayınlanan parçacık sayısı =  $f \cdot A$

f: Yayınlanma olasılığı

A: Aktivite (Bq)

Q(E): Kalite faktörü (Alfalar için 20, betalar için 1 alınır)

m: İlgilenilen doku veya organ kütlesi (kg)'dir.

Ancak iç ışınlamaya neden olan radyonüklitler, aynı zamanda X- veya gama fotonları da yayınlarsa, fotonlar nedeniyle oluşan ilave doz ayrıca hesaplanmalıdır ve bunun hesabı daha ayrıntılı değerlendirmeleri gerektirir (Yücel 2013, Tsoulfanidis ve Landberger 2010).

Çizelge 2.2 ICRP yumuşak dokusu ve A150 doku eşdeğeri plastik malzeme kompozisyonları (NIST 2015).

Atom	ICRP yumuşak doku (Yoğunluk=1,00000 g/cm <sup>3</sup> , Ortalama uyarma enerjisi=72,300000 eV) Ağırlıkça bulunma kesri	A150 doku eşdeğeri plastik (Yoğunluk= 1,12700 g/cm <sup>3</sup> , Ortalama uyarma enerjisi=65,100000 eV) Ağırlıkça bulunma kesri
H	0,104472	0,101327
C	0,232190	0,775501
N	0,024880	0,035057
O	0,630238	0,052316
F		0,017422
Na	0,001130	
Mg	0,000130	
P	0,001330	
S	0,001990	
Cl	0,001340	
K	0,001990	
Ca	0,000230	0,018378
Fe	0,000050	
Zn	0,000030	

Doz hesabı Çizelge 2.2'de kimyasal kompozisyonu verilen doku eşdeğeri plastik (A150) için yapılabildiği gibi, ICRP yumuşak dokusu için de ölçülen radyoaktivite esas

alınarak ve doz dönüşüm faktörleri uygulanarak hesaplanabilir. Su numunelerinde verilen sınır değerlerin üzerinde radyonüklitlerin derişimlerinin ölçülmesi halinde, her su numunesi aktivite değeri ve bireylerin yıllık su tüketimine uygun bir toplam doz hesaplanır. Toplam gösterge dozu 0,1 mSv/yıl'dan küçük ise içme suyu tüketiminden sağlığa zararlı bir etki beklenmez (EC 1998, WHO 2004).

Radyasyonun akut sağlık etkileri (kan hücrelerinde azalmaya neden olan) çok ciddi durumlarda oluşur. Ölüm, bütün vücudun veya vücudun büyük kısmının yüksek doza maruziyeti ile olur (IAEA 1998). İçme sularındaki radyonüklitlerin düşük seviyesi nedeniyle radyasyonun akut sağlık etkileri söz konusu değildir (WHO 2004).

İçme suyunda uranyumun artan seviyelerine maruziyet böbrek fonksiyonlarında değişmelere yol açar. Bu da ilerideki potansiyel böbrek yetmezliğinin göstergesi sayılabilir. Canlı bir dokuda iyonlaştırma süreci kromozomlara ve hücrenin diğer parçalarına zarar verebilir. Bu hasar hücrenin ölümüne veya doğal olmayan üremesine neden olabilir. Eğer hücre kontrolsüz şekilde çoğalırsa kanser oluşur. Diğer taraftan, belli elementlerin belli organlarda birikimi yoğunlaşır. Örneğin radyum (kalsiyum kimyasına uygun) kemiklerde, iyot ise tiroitte birikir. Uranyum ve bozunma ürünlerinin bozunması sonucu yayınladığı radyasyonun kanserojenik etkisi (radyotoksosite) ve kimyasal toksisitesi sebebiyle böbreklere zarar verdiği bilinmektedir (EPA 2000).

## **2.2. İçme Sularında Toplam Alfa ve Beta Analizi**

Toplam alfa ve beta analizi birçok amaç için yapılır. Havza kaynak su temini, şehir şebeke suyu, arazide kuyu açılması, artezyen suları, nehir suları, göl ve baraj sularında çevresel radyoaktivite, düşük seviye sıvı atıklar, işyeri taramaları, düşük seviye radyoaktif atıkların karakterizasyonu ve kaza sonrası çevresel kirlilik durumlarında uygulanır.

Özellikle içme suyu kaynakları toplam alfa ve beta analiz metoduyla ölçülür. Bu ölçüm suyun radyolojik karakterizasyonu için çok kullanışlı bir kontrol ölçümüdür. Ayrıca radyonüklite özel metodlar ile ileri analizlerin yapılmasına karar vermek için de kullanılabilir. Çizelge 2.3'de içme sularında toplam alfa ve beta için izin verilen en yüksek derişim seviyeleri (MCL) verilmiştir. Bu sınır değerlere göre ulusal ve

uluslararası düzenleyici kuruluşlar içme suyunun radyolojik kalitesinin kontrolünü sağlarlar.

Çizelge 2.3 İçme sularında toplam alfa ve beta için izin verilen en yüksek derişim seviyeleri (MCL).

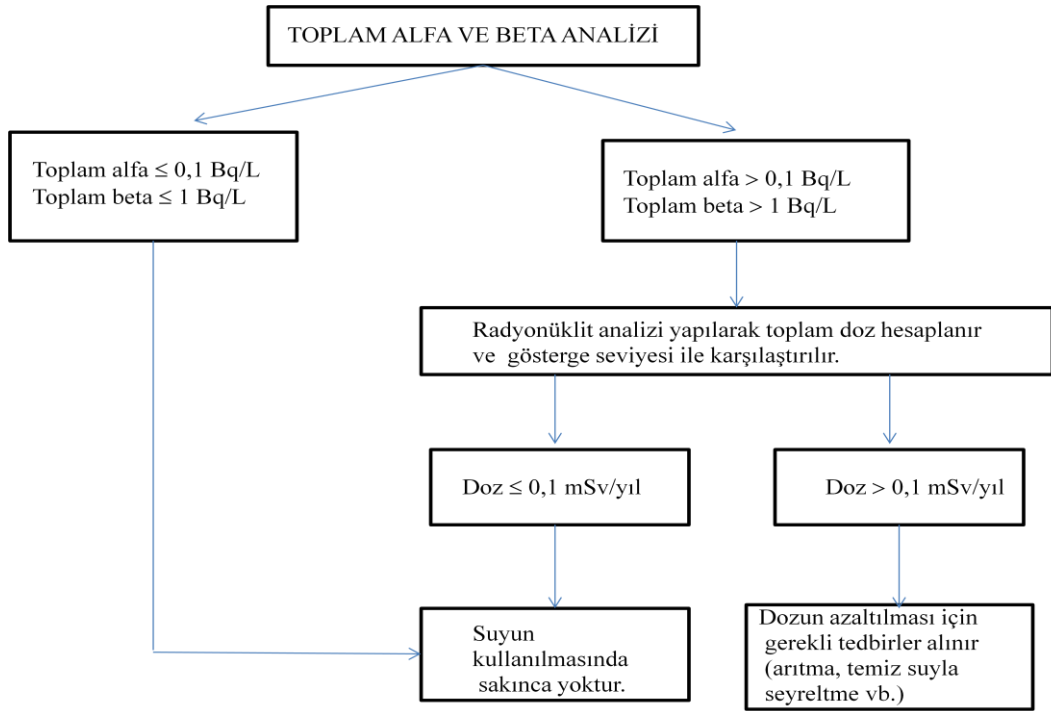
<b>Yönetmelik/Direktif</b>	<b>Toplam Alfa MCL(Bq/L)</b>	<b>Toplam Beta MCL(Bq/L)</b>
Avrupa Birliği,1998	0,1	1
25730 Sayılı İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2005	0,1	1 (Tritiyum için 100)
WHO (Dünya Sağlık Örgütü), 2011	0,5	1

Çizelge 2.3'deki sınır radyoaktivite seviyelerinin altındaki örneklerde ileri analizler önerilmez ve içme suyunun kullanımına müsaade edilir. Ancak bu seviyeler aşırsa radyonüklitlerin türü ve derişimi belirlenmelidir. Düzenli toplam alfa ve beta ölçümleri içme suyu kaynaklarındaki radyoaktif kirliliğin hızlı tespiti için de pratik bir işlemdir.

$^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  ve radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) uçucu olmaları sebebiyle numune hazırlığında kaybedildiği için toplam alfa ve beta analizine dahil değildir. Normal durumda içme suyu kaynaklarında toplam alfa ve beta analizine dahil olan çoğu radyonüklit uzun ömürlüdür. Uranyum ve toryum bozunma serilerinden önemli sayılan alfa ve beta yayınlayıcılar  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ 'dır ve ölçümleri hassas tekniklerin uygulanmasını gerektirir. Doğal uranyum,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  kısa ömürlü ürünleri ile dengededir.  $^{40}\text{K}$  bütün doğal sularda önemli miktarda vardır. Ancak vücuttaki potasyum miktarı belli bir değerde sabittir. Su ile alınan  $^{40}\text{K}$  önemli bir katkı sağlamayacağından genelde analize dahil edilmez (WHO 2004).

Radyolojik tehlikelerin tespitinde, kontrol amaçlı, rehber alınan yaklaşım Şekil 2.1'de akış şeması şeklinde verilmiştir. Birinci aşama; toplam alfa ve beta aktivite derişimlerinin (Bq /L) izin verilen seviyelerin altında olup olmadığını belirlemek için başlangıç taramasıdır. Bu seviyelerinin aşılması halinde, ikinci aşama; radyonüklit

derişimlerinin araştırılması ve her radyonüklit için özel güvenlik düzeyleri (gösterge seviyeleri, guidance level, GL) ile karşılaştırılmasıdır (WHO 2004).



Şekil 2.1 Sularda radyolojik tehlikeleri kontrol basamakları

İçme sularındaki radyonüklitlerin gösterge seviyeleri (guidance level, GL) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$GL = \frac{IDC}{h_{ing} \times Q} \quad (2.2)$$

GL: İçme sularındaki radyonüklitlerin gösterge seviyeleri, Bq/L

IDC: Sular için kişisel yıllık doz sınırı (Burada 0,1 mSv/yıl alınmıştır)

$h_{ing}$ : Yetişkinler tarafından vücuda alınan doz dönüşüm katsayısı, mSv/Bq

Q: yıllık vücuda alınan içme suyu hacmi, L/yıl

Tüketilen su miktarı yetişkinler (17 yaş üzeri) için 730 L/yıl, çocuklar (2-17 yaş) için 350 L/yıl ve bebekler (0-2 yaş) için 250 L/yıl olarak tahmin edilir (EPA 2014).

Bazı radyonüklitler için gösterge seviyeleri (GL) ve doz dönüşüm faktörleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bazı radyonüklitler için gösterge seviyeleri (GL) ve doz dönüşüm faktörleri.

Radyonüklit	Doz dönüşüm faktörü (mSv/Bq)	Gösterge seviyesi (Bq/L)
<sup>238</sup> U	$4,5 \times 10^{-5}$	3,0
<sup>234</sup> U	$4,9 \times 10^{-5}$	2,8
<sup>226</sup> Ra	$2,8 \times 10^{-4}$	0,5
<sup>228</sup> Ra	$6,9 \times 10^{-4}$	0,2
<sup>90</sup> Sr	$2,8 \times 10^{-5}$	4,9
<sup>241</sup> Am	$2,0 \times 10^{-4}$	0,7

Toplam alfa veya beta için izin verilen seviyelerin (alfa için 0,1 Bq/L, beta için 1Bq/L) altındaki aktivite derişimleri için herhangi bir işlem yapılmaz, suyun kullanılmasında bir sakınca yoktur. İzin verilen seviyelerin üzerinde bir aktivite derişimi sözkonusu olduğunda ayrıntılı analize tabi tutularak olası radyonüklitlerin aktivite derişimleri belirlenir. Bulunan sonuçlar için Eşitlik (2.3) uygulanır ve koşul sağlanması halinde toplam gösterge dozu için verilen 0,1 mSv/yıl değerinin aşılmadığı kabul edilir. Aksi durumda toplam gösterge dozu aşılmıştır, su kullanılamaz ve dozun azaltılması için arıtma veya seyreltme gibi işlemler uygulanır.

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{GL_i} \leq 1 \quad (2.3)$$

$C_i$ : i-nci radyonüklitinin aktivite derişimi (Bq/L)

$GL_i$ : i-nci radyonüklitinin gösterge seviyesi (Bq/L)

n: Radyonüklit sayısı

Bu değerlendirmede, trityum, <sup>40</sup>K, radon ve radon bozunma ürünlerine ait izotop derişimleri dikkate alınmaz. Trityum doğal radyasyon seviyeleri oldukça düşüktür ve yüksek olması yapay radyasyon kaynakları bulunduğunu gösterir. Trityum için sınır değer (100 Bq/L) aşılmış ise hangi izotoplardan kaynaklandığına dair detaylı analiz yapılarak gösterge dozu hesaplanır. Bununla birlikte yüksek beta aktivitesi rastlanmadığı durumlarda rutin trityum analizine gerek görülmez (DWIQ 2005).

İçme sularında toplam alfa ve beta ölçümünde en çok kullanılan metodlar gaz akışlı orantılı sayaç, ZnS sintilatör ve sıvı sintilasyon yöntemlerine dayanır (Palomo vd. 2011). Kuyu tipi NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve yüzey engelli yarı iletken dedektörlü bir alfa spektrometresinin bileşiminden oluşan bir sayım sisteminin sularda radyoaktivite analizi için kullanımı önerilmiştir ve yer altı suyu analizlerinde başarıyla uygulanabileceği ifade edilmiştir (Bonotto vd 2009). Toplam alfa ve beta analizinden sonra radyonüklite özgü çalışmak için alfa ve gama spektrometreleri kullanılabilir (Kehagia vd. 2007, Montana vd. 2013). Bu tez çalışmasında gaz akışlı orantılı sayaç tekniği ve düşük seviye sıvı sintilasyon tekniği ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### **2.2.1. Orantılı Sayaç Tekniği ile Radyoaktivite Ölçümü**

Sularda radyoaktivite analizi, çoğunlukla geleneksel gaz akışlı orantılı sayaç tekniğine dayanır. Gaz akışlı orantılı sayaçta ölçülmek üzere EPA 900 metoduna göre numunelerden elde edilen kalıntılar planşetlere alınarak hazırlanır (Zikovsky 2006, Sanchez vd. 2013). Bu açıdan EPA 900 birçok laboratuvar tarafından kullanılan basit bir yöntemdir. Bu yöntem, suyun belirli şartlarda (süre, sıcaklık, vb) buharlaştırılması esasına dayanır. Bu yöntemde özellikle toplam alfa içerikleri için düşük dedeksiyon limitlerine ulaşılabilir. Ancak, örnek hazırlığının uzun zaman alması, kalıntı miktarın her numunede farklı özsoğurmaya neden olması, homojen yüzey dağılımı olmaması gibi sorunlar yöntemin kullanışlı bir yöntem olmasını engeller. Bununla birlikte, EPA900 metodunun birçok muhtemel girişimi ve dezavantajı da vardır ve iyileştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır (Semkow vd. 2004).

Hem kalibrasyon standartlarında hem de numunelerde çöktürme kaynaklı olarak kalıntının homojen dağılmaması bilinen bir problemdir ve ölçülen aktivite sonuçlarında hataya sebep olur. Kalıntıların daha homojen dağılımı için planşet yüzeylerinin pürüzlü hale getirilmesi ve sıcaklık kontrolü ile birlikte iki basamakta buharlaştırmayı içeren bir yöntem önerilmiştir (Semkow vd. 2004). Bu yöntemde, ısı yüzeye düzgün bir şekilde dağılır ve iki basamaklı buharlaştırma ile daha erken ve homojen çöktürme oluşur. Ayrıca hatalar, standart ve örneklerin farklı geometrisinden de kaynaklanabilir (Semkow ve Parekh 2001).

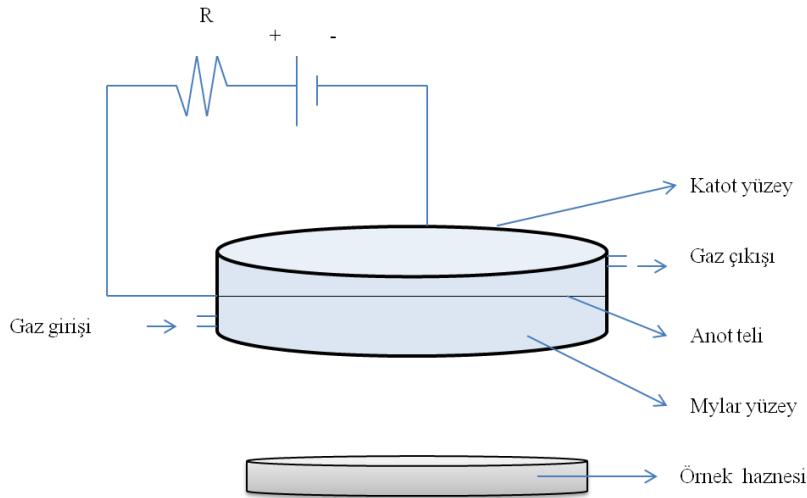
Gaz akışlı orantılı sayaç metodunun dezavantajları:

- Örnek hazırlığı emek yoğun ve zaman alıcı laboratuvar çalışması gerektirir.
- Örnek hazırlama ve su kompozisyonuna bağlı olarak aktivite ölçüm hassasiyeti yüksek değildir.
- Sudan elde edilen kalıntı miktarı toplam çözünen katılara bağlıdır. Ancak toplam çözünen katıların miktarı, alfa ve beta parçacıklarının öz soğurulmasının artmasına sebep olur.
- Toplam çözünen katılar ve suyun kimyasal kompozisyonu sayım değerini etkiler.

Orantılı sayaçta örnek miktarının azlığı ve verimin düşük olması düşük dedeksiyon sınırları elde edilmesini zorlaştırır. Ancak çok daha uzun sayım süresi uygulanarak bu zorluk kısmen aşılabılır. Bu durumda, uzun süre ölçüm yapan cihazda yüksek gerilim ünitesinde kararlılık sorunu ve yükselteç kısmında kazanç kayması sorunu ortaya çıkabilir.

### 2.2.1.1 Gaz Akışlı Orantılı Sayacın Çalışma Prensibi

Orantılı sayaçlar gaz doldurulmuş dedektörler olup daha çok, alçak enerjideki X-ışınlarının dedeksiyon ve spektroskopisinde, nötron dedeksiyonunda, alfa ve beta radyasyonlarının dedeksiyonunda kullanılırlar. Orantılı sayaçta, içerisine gaz doldurulmuş kapalı bir hacim dedeksiyon ortamını oluşturmakta ve aralarına yüksek voltaj uygulanacak anot ve katot bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Orantılı sayacın temel elemanları.

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi orantılı sayaçlar genel olarak silindirik geometride olup ince bir tel şeklinde olan anot, iç yüzeyi katot olarak görev yapan ve sürekli gaz akışı olan kabın eksenini boyunca yer alır.

Elektrik alanın ufak değerlerinde elektron ve pozitif iyonlar elektrotlara doğru hareket ederlerken ortamdaki nötral gaz molekülleri ile birçok etkileşme yaparlar, artan alan şiddeti ile serbest elektronlar daha fazla kinetik enerji kazanırlar. Eğer bu enerji gaz moleküllerinin iyonizasyon enerjisinden daha fazla ise bu etkileşmeler sonucunda da iyon çiftlerinin oluşması mümkün olur.

Bu ikincil iyonizasyon işlemi ile serbest kalan elektronlar, elektrik alanın etkisiyle hızlanarak diğer gaz molekülleri ile çarpışırlar ve ilave iyonizasyon olaylarına neden olurlar. Böylelikle gazın iyonizasyonu çoğaltması bir şelale gibi devam eder ve Townsend Çığı olarak isimlendirilir. Bu çığ tipi çoğalma elektronların anotta toplanmasıyla sona erer. İkincil iyonizasyon olaylarının sayısı başlangıçtaki iyon çifti sayısı ile orantılıdır.

Radyoaktif kaynaktan gelen parçacıklar dedektörde voltaj pulsları oluşturmakta ve sonrasında bu pulsların genlikleri önyükselteç ve yükselteçlerde arttırılmaktadır. Pulslar daha sonra puls yükseklik analizörlerine yönlendirilirler, analizörler sadece belirli genlikteki pulsların geçmesini sağlarlar ve çıkışlarına yerleştirilen sayıcılar ile bu genlikteki pulslar rakam olarak sayılır (Bor 2009).

#### **a) Gazlı Dedektörlerde İyonizasyon**

İçerisinde gaz bulunan kapalı bir ortam ve aralarına elektrik alan uygulanabilecek iki elektrot dikkate alındığında, ortama gelen radyasyon, gaz atomları ile etkileşerek atomik uyarma ve iyonizasyon şeklinde enerjisini kaybeder. İyonizasyon sonucunda oluşan serbest elektronlar ve pozitif iyonlar, elektrotlar arasına uygulanan elektrik alanın etkisi ile anot ve katota ulaşarak bir iyon akımı meydana getirirler. Birçok gazda iyonizasyon enerjisi 10-20 eV mertebesinde, ancak radyasyon enerjisi her zaman iyonizasyona değil gaz atomlarının uyarılmasına da harcanabilir (atoma gevşek bağlı elektronların aldıkları enerji ile bir üst yörüngeye çıkıp daha sonra geri dönmeleri). Bu nedenle gaz içerisinde bir iyon çiftinin oluşması için gerekli enerji, ortalamadan daha fazla olup 30-35 eV civarındadır. Örneğin, enerjisi 5 MeV olan bir alfa parçacığı havada yaklaşık



olarak  $1,5 \times 10^5$  iyon çifti oluşturur (havada bir iyon çifti için gerekli ortalama enerji 34 eV'dir).

Ortam içerisinde kullanılacak bazı gaz (elektronegatif gaz) tiplerinde serbest elektronların nötral gaz moleküllerine bağlanması sonucu negatif iyon oluşumu ile karşılaşılır. Bu iyon, iyonizasyon sonucu ortaya çıkan pozitif iyonun tüm özelliklerini taşır ancak yükü negatiftir. Örneğin oksijen, elektronların hemen bağlandığı bir gaz örneğidir ve elektronlar hızla negatif iyonlara dönüşürler, diğer taraftan azot, hidrojen ve hidrokarbon gazlarında durum tersinedir ve serbest elektron iyonlaşmadan yoluna devam eder (Knoll 2000).

#### **b) Gaz Çoğalma Faktörü**

Orantılı Sayaçlarda Kullanılan Gaz çoğalma faktörü (M) gelen radyasyon tarafından bir iyon çifti yaratılması durumunda, sayaç içerisinde oluşan toplam serbest elektron sayısıdır. Orantılı sayaçta meydana gelen toplam yük,  $Q = M N e = M (\Delta E / w) e$ 'dir ve burada  $\Delta E$  gelen radyasyon tarafından sayaca bırakılan enerji miktarı,  $w$  ise bir iyon çifti yaratılması için gerekli ortalama enerjidir. Bu ifadeden anlaşılacağı gibi  $Q$ , yani çıkışta elde edilen yük, soğurulan enerji ( $\Delta E$ ) ile orantılıdır. İşte bu nedenle, bu sistemlere orantılı sayaçlar denir ve bu orantı sadece gaz çoğalma faktörünün sabit olması durumunda geçerli olup uzay yükünün anot teli etrafındaki elektrik alanını değiştirmemesi gerekir. Uzay yükünün büyüklüğü, birincil iyonizasyon ve gaz çoğalmasına bağlıdır. Eğer birincil iyonizasyon çok küçük ise uzay yükünün orantıyı etkilemeyeceği  $M$  değeri  $10^5$  veya  $10^6$  dır. Diğer taraftan eğer birincil iyonizasyon çok kuvvetli ise  $M$ 'nin kritik değeri daha düşüktür ve sayacın boyutu, kullanılan gaz tipi gibi parametrelere bağlıdır.

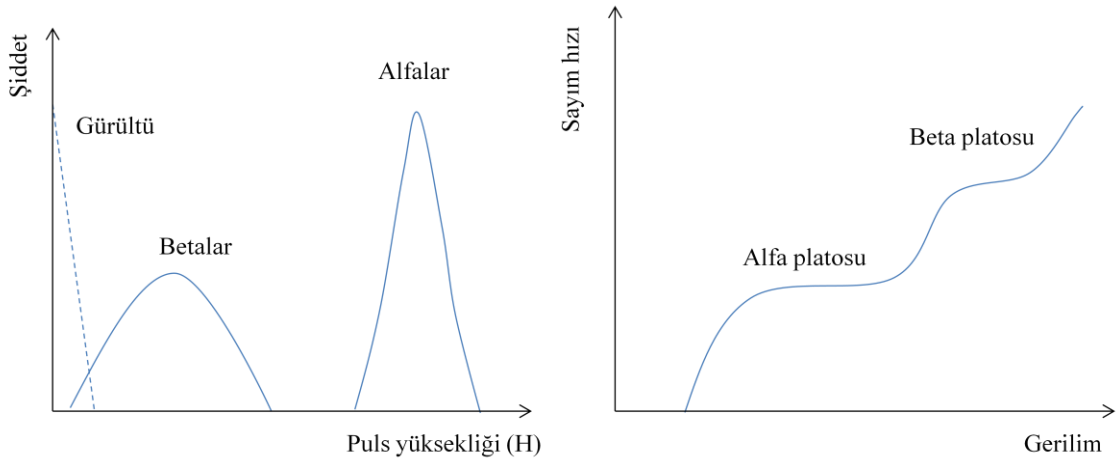
Orantılı sayaçta kullanılan gaz moleküllerinin elektrona bağlanarak negatif iyon oluşturma özelliği minimum olmalıdır. Bazı sistemlerde gaz oda içerisinde yalıtılmış olarak bulunmakta, bazılarında ise gazın dış bir ünite ile sürekli dolaşımı sağlanmaktadır. Yalıtılmış sistemler daha kullanışlı olmakla beraber mikroskopik kaçaklar nedeniyle ömürleri daha kısadır, gaz dolaşımı olan sistemlerde ise oda içerisinde birikmiş olan havanın, elektro negatif özelliği nedeniyle, ortamdan

temizlenmesi gerekir. % 0,1 miktarındaki oksijen nedeniyle, serbest elektron sayısının % 10'unun 1 cm'lik hareket sonucunda kayıp olması mümkündür.

Orantılı sayaçtaki gaz çoğalımı, esas olarak elektronlar ile nötral gaz atomları arasındaki çarpışmalar sonucu oluşan ikincil iyonizasyondan kaynaklanır. Bu etkileşmeler sırasında, hiçbir elektron üretiminin olmadığı uyarılma olayı da ortaya çıkabilir. Uyarılan bu gaz molekülleri, tekrar taban seviyeye dönerlerken görünür ya da ultraviyole bölgede ışık salınımı yaparlar. Bu ışık fotonları ise gaz içerisinde gevşek bağlı elektronlarla etkileşerek ilave iyonizasyon yaratabilirler ya da dedektör duvarlarından fotoelektrik etkileşmeyle elektron sökebilirler. Bu şekilde foton etkisiyle oluşan elektronlar, orantıyı bozduğu ve sahte pulslar meydana getirdiği için orantılı sayaçta istenmezler. Bu nedenle söndürücü gaz da denen metan gibi çok atomlu bir gaz esas gaza ilave edilir. Böylece fotonların soğurulması sağlanmış ve foton kaynaklı iyonizasyon etkisi ortadan kaldırılmış olur. Orantılı sayaçlarda % 90 Argon ile %10 Metan karışımı (P-10 gazı) en fazla tercih edilen gaz karışımıdır.(Knoll 2000).

### c) Sayım Platosu

Orantılı sayaç için voltajda olabilecek ufak bir oynama, meydana gelen iyon çifti sayısında veya sayım hızında oldukça büyük farklılık ortaya çıkaracaktır. Bu durumda radyoaktif parçacıkların sayımında ortaya çıkan sayım farklılıklarının, olayın kendisinden mi yoksa voltaj değişikliğinden mi olduğunu söylemek mümkün değildir. Sayım sistemlerinde voltaj değişikliğinde karşılaşılabilecek sayım farklılığının bilinmesi gerekir. Bu işlem ise sayacın yüksek voltaj platosunun elde edilmesiyle gerçekleştirilir. Her biri farklı derecede primer iyonizasyon meydana getiren farklı parçacıkların dedeksiyonunda ayrı ayrı platolar elde edilir. Beta parçacıklarının tipik enerjilerinde, bu parçacıkların menzilleri oda boyutlarını aşar bu nedenle oluşan pulslar sadece betaların kayıp ettikleri bir kısım enerji ile orantılıdır. Betalara ait pulslar bu nedenle aynı enerjideki alfa pulslarına göre çok daha küçük genliktedirler, ayrıca gaz içerisindeki değişken yolları nedeniyle puls genlikleri daha geniş bir aralığa yayılmıştır. Şekil 2.3'de alfa ve betalara ait pulslar ve platolar görülmektedir, önce alfa sonra ise beta platosu elde edilir. Betalara ait puls yüksekliklerindeki geniş dağılım ve alçak genlikteki gürültüye daha yakın olmaları nedeniyle beta platosu daha dardır ve alfaya göre daha fazla bir eğimi vardır.

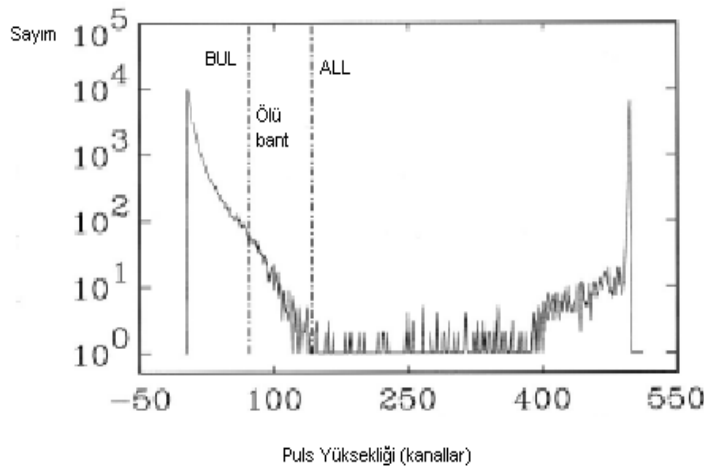


Şekil 2.3 Orantılı sayaçta alfa ve beta pulsları ve platoları

Bazı durumlarda esas puls takiben bazı yalancı pulslar görülürler, bu pulsların gelen radyasyon ile bir ilgisi yoktur. Bu pulsların bir nedeni, çığ sırasında meydana gelen uyarılmış atomlardan fotonların salınmasıdır. Bu fotonlar hemen katota ulaşarak yüzeyinden fotoelektrik olay ile elektron koparabilirler, daha sonra bu elektronlar anota ulaşarak bir başka çığ yaratabilir. Bu çığa ait puls, esas pulsa göre katot-anot arasındaki mesafenin aşılması için gerekli süre kadarlık bir gecikme ile ortaya çıkar. Birçok sayaçta bu süre mikro saniye mertebesindedir. Eğer kullanılan gaz monoatomik değil, bir gaz karışımı ise bu fotonlar gaz atomlarından da elektron koparabilirler. Birden fazla fotoelektronun üretilmesi durumunda bu pulsa ait genlik daha fazla olacaktır. Henüz nedeni tam anlaşılmayan diğer bazı nedenler, esas pulsa göre yüzlerce mikro saniye gecikmiş olan sahte pulslar üretirler. Muhtemel nedenler, pozitif iyonların katota ulaşmalarından sonraki etkileşmeleri, katot duvarlarından elektron salınımları, esas gazdaki yarı kararlı seviyeler ya da bir önceki çığa ait olup uzay yükü nedeniyle gecikmeye uğramış elektronlardır. Uzun gecikmeli sahte pulslar, her zaman tek bir primer elektronunkine eşit genlikte pulslar verirler ve bu nedenle ancak çoğaltma faktörünün büyük değerlerinde algılanırlar. Sayım platosunun sonuna yaklaşıldığında uygulanan voltaj bu sahte pulsların sayılmasına neden olur ve sayım hızı aniden artmaya başlar. Bu yüzden plato sonunun hassasiyetle belirlenmesi gerekmektedir (Knoll 2000).

#### d) Alfa ve Beta Puls Ayrımı

Orantılı gaz sayacında aynı örnekten alfa ve beta radyoaktivite tayininde alfa ve beta parçacık ayrımı prensibi puls yüksekliğine dayanır. Bir pulsun yüksekliği belirli bir değerin üzerinde ya da altında ise, bir elektronik kontrol sistemi kullanılarak, alfa ve beta parçacıkları ayırt edilebilir. Bu işlem, diskriminatör olarak bilinen elektronik filtreler ile yapılır. Alfa ve beta enerji bölgelerinde yüksek ve düşük enerji seviyeleri belirlenir. Bir düşük enerji seviyesi ile gürültü pulslarının beta pulslarına eklenmesi engellenebilir. Yüksek enerji seviyesi ile alfa parçacıklarının tüm pulsları sayılabilir.



Şekil 2.4 Beta üst seviye (BUL) ve alfa alt seviye (ALL) ayırıcılar ve bu iki seviye arasında kalan ölü bant (Semkow ve Parekh 2001).

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi alfa ve beta parçacık pulsları arasında bir bölge vardır. Numunenin kalınlığı ve ortalama atom numarasına bağlı olarak, bir pulsun sınıflandırılmasında alfa ya da beta karışıklığı olabilir. Düşük enerjili alfaların enerjilerinin zayıflatılması puls yüksekliğini betanın üst seviyesine indirebilir. Aynı şekilde numunede yüksek enerjili beta yayıcı varsa, önemli ölçüde zayıflatılmış olmayabilir ve puls alfa bölgesinin düşük enerji kısmında ortaya çıkabilir. Sonuçta, bu bölgede dedektör sadece puls yüksekliği ile parçacık türünü ayırt edemez. Bu parçacıkların karışık olarak algılanma olayına crosstalk (istenmeyen karışma) denir. Optimum alfa ve beta ayırımını gerçekleştirmek ve alfa ve beta karışımını en aza indirmek için cihazın crosstalk ayarı yapılmalıdır. Bir ölü bölge oluşturularak alfa ve beta üstüste binmesi en aza indirilebilir. Bu bir beta üst seviye (BUL) ve alfa alt seviye

(ALL) ayırıcı ayarlayarak yapılır. Bu iki seviye arasında kalan bölgeye “ölü bölge” denir ve ölü bölgede kalan sayımlar toplam sayıma eklenmez.

#### e) Doğal Fon Sayımı

Radyasyon dedeksiyonunda doğal fon belirlenmesi örneğin net sayımını belirlemek için gereklidir. Oldukça düşük değerlerin tesbitinde doğal fon düzeltmesinin yapılmaması sonuca önemli derecede bir hata getirecektir. Doğal fon sayımı ortamda bulunabilecek radyoaktif kaynaklardan, yapı malzemesinden ve kozmik ışıklardan kaynaklanabileceği gibi sistem içindeki malzeme ve elektronik gürültü sebebiyle de oluşabilir. Sistemde örnek saymadan önce örnek haznesi ve boş örnek planşetleri temizlenerek sayım alınır ve hesaba katılır. Bu doğal fon değerleri net sayım hızlarını hesaplamada kullanıldığı gibi cihazın kararlılığını değerlendirmek için de kullanılır. Normalde doğal fon sayım süresi örnek sayım süresine göre daha uzundur. Uzun bir doğal fon sayımı kullanarak, nihai aktivite derişiminin belirsizliği azaltılır. Fakat duruma göre daha kısa sayım süreli doğal fonlar da kullanılır. Uzun ve kısa doğal fon sayımı ile rutin kontroller yapılmalıdır (EPA 2014).

#### f) Dedeksiyon Verimi ve Özsoğurma Etkisi

Herhangi bir dedektörün, dedeksiyon veya sayım verimi (detection counting efficiency), dedektörün aktif hacmine, onun şekline, dedektör-kaynak geometrisine ve dedektörün yakın etrafındaki malzemelerdeki (dedektör penceresi, uç kabı, etraftaki zırh v.b.) etkileşmelerine bağlıdır. Bu nedenle, dedeksiyon verimi, dedektör ve diğer elemanların etkisini de kapsayacak şekilde komple bir dedektör sistemi için tanımlıdır. Dedektör veriminin ilgilenilen radyonüklitin aktivitesi verilmek istendiğinde, kullanılan dedektöre özgü olarak ölçülmesi zorunludur. Dedektör verimi, nicel analizler için gerekli olan ve dedektörün performansını gösteren önemli bir parametredir.

Belirli bir kaynak-dedektör mesafesindeki, bir dedektörün verimi, aktivitesi bilinen bir kaynak kullanılarak Eşitlik 2.1'deki ifade ile elde edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{N_k}{N_g} \quad (2.1)$$

Burada,  $N_k$ , dedektörde dakikada kaydedilen sayım sayısı (cpm) ve  $N_g$ , kaynaktan dedektör yüzeyine dakikada gelen parçacık sayısıdır (dpm).

Hem alfa hem de beta parçacıklarının toplam aktivite ve enerjileri, örnek kütlelerine bağlı olarak özsoğurma sebebiyle azalır. Kütesiz kabul edilen bazı kaynaklar vardır. Bunlar genellikle elektrolizle elde edilen standartlardır. Mevcut kaynakların türleri ne olursa olsun, öz soğurma eğrisinin, ölçülecek numunelerin ortalama kütlesi ile eşleşen örneklerle çizilmesi gerekir. Özsoğurma eğrileri farklı katı miktarı içeren standart örnekler kullanılarak çizilir. Bilinen miktarda aktivite, standart örneklerle, bütün örneklerle eşit olacak şekilde eklenir. Katıların kütlesi yaklaşık 5 mg dan başlayarak alfa için 120 mg ve beta için 200 mg'a kadar değişmektedir (EPA 2014). Toplam alfa beta analizinde özsoğurma etkisi alfalarda betalara göre daha belirgindir ( Sanchez vd. 2009, Timon vd. 2013).

### **2.2.2. Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Tekniği ile Radyoaktivite Ölçümü**

Alfa-beta ayrımı olan LSC tekniğinde, orantılı sayaç tekniğinde karşılaşılan zorlukların çoğu aşılmıştır. Ancak, suda çözülmüş mineral ya da organik maddelere bağlı değişken sönümlenme sintilasyon kaybına yol açabilir, dolayısıyla girişim düzeltilmesi hala gereklidir. Bu durum kalibrasyonlarda dikkate alınmalıdır ( Kleinschmidt 2004).

LSC tekniği, su numunesinin direkt ya da konsantre edilme işleminden sonra sıvı sintilasyon kokteyli ile karıştırılması sonrası alfa-beta ayrımını kullanarak sayılması temeline dayanır. Numune konsantre edilmişse, kalıntı birkaç ml seyreltik HCl, HNO<sub>3</sub> veya H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile çözüldükten sonra sıvı sintilasyon kokteyli ile karıştırılır. Su, sintilasyon örnek kaplarında (vial) doğrudan konsantre edilebilir ya da su örneği başka bir kaptan buharlaştırılarak konsantre edilip su veya kalıntısı sintilasyon vial'ine alınabilir (ASTM D7283-06, Forte 2007). Sanchez vd. (2013) farklı sintilasyon kokteylleri kullanarak sularda alfa ve beta aktivitelerini araştırmıştır.

Toplam alfa ve beta analizlerindeki kalibrasyonlar; alfa ve beta kanal girişimlerinin ayırım performansının optimizasyonu için alfa ve beta verimlerinin belirlenmesi, seçilen alfa ve beta pencerelerindeki girişimleri temsil eden sayımların belirlenmesini içerir (ASTM D7283-06). Kalibrasyonda kullanılan standart örnekler ile numune

kompozisyonları ve sönüm seviyeleri uyumlu ise sonuçlar gerçek numuneleri yeterli derecede temsil eder. Optimum puls ayırım ayarları (Pulse Discrimination, PD), verim, doğal fon ve girişim de sönümlenmeye bağlı olduğundan gerçek örneklerde sönümlenme düzeltilmesi yapılmalıdır (Palomo 2011).

Bu tezde, alfa ve beta puls şekillerinin ayrımı (pulse shape analysis, PSA) yapılarak kalibrasyon yapılmıştır. Her su numunesi önceden belirlenmiş en uygun (optimum) PSA ayarında ölçülmüştür. Optimum PSA belirlenmesi konusunda çeşitli araştırma ve yaklaşımlar vardır (Warwick ve Croudace 2002, Rusconi vd 2006, Sanchez-Cobeza vd 1992, Zapata-Garcia vd 2011, Todorovic vd 2012, Lin vd 2012, Waleed 2013). Bu kalibrasyonların yapılmasında en büyük dezavantaj alfa ve beta girişimlerinin ve optimum PD ayarının parçacık enerjisine göre de değişmesidir. Gerçek numuneler geniş bir aralıkta değişen parçacık enerjilerine sahip alfa ve beta yayımlayıcıları içerebilir. Beta girişimi parçacık enerjisi ile artarken alfa girişimi parçacık enerjisi ile azalır. Artan sönümlenme ile yüksek enerjili beta parçacıkları düşük enerjili parçacılara kıyasla aynı PSA'da daha fazla girişim yapar. Bunun yanında yüksek enerjili alfa parçacıkları aynı PSA'da düşük enerjili parçacıklara kıyasla daha az girişim yaparlar. Bu nedenle, kalibrasyonlar için uygun sönümlenme düzeltmeleri gereklidir. Sayım yapılacak örnekler sönümsüz ve PD kalibrasyonunda kullanılan standart örneklerle benzer ise girişim düzeltilmesi önemli değildir. Analiz edilecek gerçek örneklerde beklenen radyonüklitlerin ortalama enerjileri ile uyumlu standartlar kullanılarak alfa ve beta kalibrasyonlarını yapmak tercih edilir (Cook 2012).

### **2.2.2.1 Sıvı Sintilasyon Sayım (LSC) Sistemi Çalışma Prensipleri**

Sıvı sintilasyon sayımı (LSC) veya sıvı sintilasyon analizi (LSA) 1950'li yıllardan beri radyoaktivite ölçümü ve nicel analiz için kullanılan bir tekniktir. Bu ölçüm tekniği çevre radyoaktivitesinin izlenmesi, herhangi bir nükleer kaza anında radyoaktif kirlenmenin boyutunun tespit edilmesi ve halk sağlığı için gerekli önlemlerin alınması amacıyla  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  gibi beta yayımlayıcı belirli radyoizotopların nitel ve nicel analizinde kullanılan geçerli bir yöntemdir.

Düşük düzeyde ( $< 1\text{Bq/L}$ ) çevresel radyoaktivite izleme, temel nükleer fizikte bozunma olaylarının tespiti, radyoizotop uygulamaları ve nükleer güç santral sahalarında kirlilik ölçümleri ve/veya yakıt yönetimi faaliyetlerinde sıvı sintilasyon analizi kullanılır.

Sıvı sintilasyon sayımı, radyoaktif analitin, nükleer bozunumuna ait kinetik enerjisinin ışık enerjisine (sintilasyon fotonlarına) dönüştürme yeteneği olan sıvı kimyasal içerisinde düzgün dağıtılması ile tanımlanan analitik bir tekniktir.

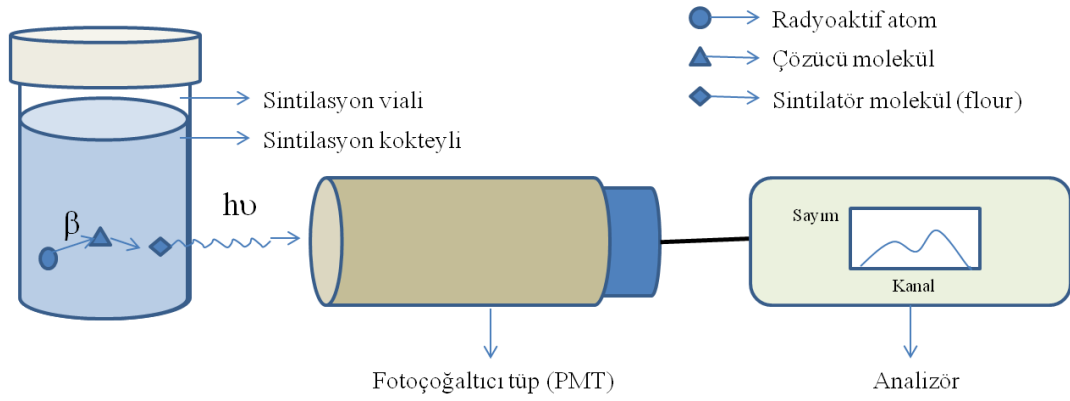
LSC'de ölçülmek üzere numune hazırlarken, radyonüklit kokteyl adı verilen malzeme ile karıştırılır. Kokteyl, toluene, dioxane, p-Xylene gibi çözücü (solvent), UV dalga aralığında (334-385 nm) ışık yayan p-terphenyl, PPO, PBD gibi sintilatör ve dalga boyu kaydırıcı (400-425 nm mavi ışık) POPOP, bis-MSB gibi maddelerden oluşan bir organik sıvıdır.

Bozunma enerjisi kokteyle aktarılır ve sintilasyon fotonlarına dönüşür Radyonüklitin aktivitesini belirlemek için fotoçoğaltıcı tüp (PMT) ile bu fotonlar sayılır (Şekil 2.5).

#### **a) Radyasyonun Sıvı Sintilatörle Etkileşimi ve Sayımı**

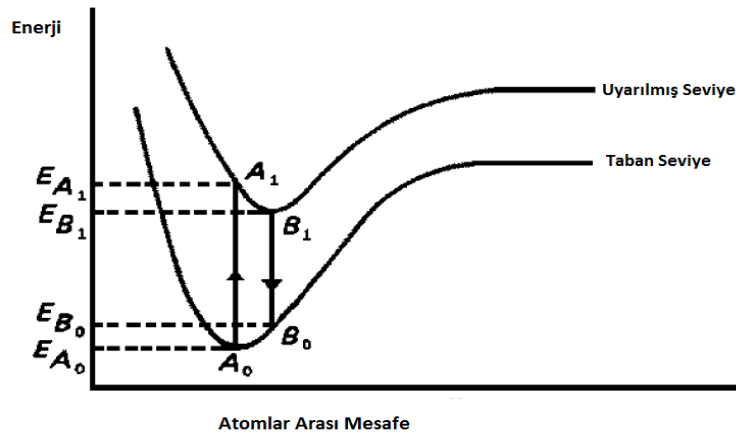
Sıvı sintilasyon kokteylleri radyoizotopların yaydığı enerjiyi soğurur ve ışık parıldamaları (sintilasyon) gibi yeniden yayar (emisyon). Bu iki işlemi, yani soğurma ve emisyonu gerçekleştirmek için, kokteyl iki temel bileşen, çözücü ve çözünen (fluor) içerir. Çözücü, radyoaktif bozunma enerjisini soğurma işlemini gerçekleştirir. Çözücü içinde çözülmüş fluor molekülleri, soğrulan enerjiyi ışığa dönüştürür. Pek çok farklı kokteyl farklı numune kompozisyonlarında kullanım aralığını genişletmek için ek maddeler içerir, fakat sintilasyonu çözücü ve fluor karışımı sağlar.





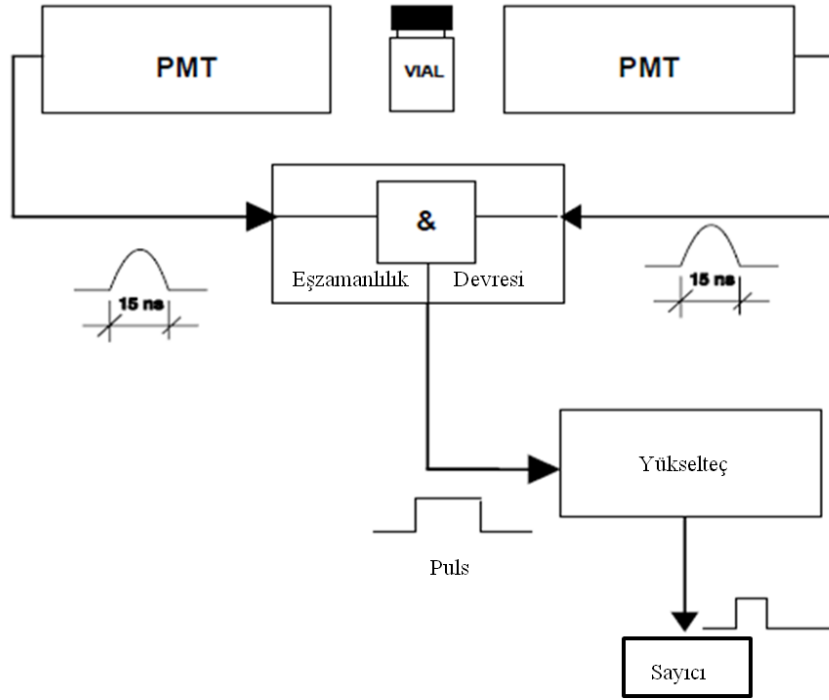
Şekil 2.5 Sıvı sintilasyon sayımında salınan radyasyonun kaydedilmesi

Şekil 2.5'te yayılan radyasyonun kokteyl (çözücü ve çözünen karışımı) ile etkileşimi ve sistem tarafından kaydedilmesi görülmektedir. Radyoaktif bozunma ile örnekten beta parçacığı salınır ve bu parçacığın enerjisi çözücüye aktarılır. Etkin enerji aktarımını sağlamak için numuneye uygun çözücü kullanılmalıdır. Yoğun bir sıvı olan sintilasyon kokteylinde beta parçacığı kısa mesafede bütün enerjisini kaybeder. Bu enerji ortam tarafından soğrulur. Bu süreç, ısı, iyonlaştırma ve uyarılma şeklinde gerçekleşir. Uyarılma sırasında moleküler enerji seviyesi taban seviyeden ( $A_0$ ) uyarılmış seviyeye ( $A_1$ ) çıkar.  $A_1$  pozisyonu minimum enerji noktası değildir. Molekül enerjisini latis titreşimleri ile ısı olarak salar ve enerji seviyesi  $B_1$  noktasına hareket eder.  $B_1$  noktası hala bir uyarılmış seviyedir. Uyarılan çözücünün enerjisi UV ışığı olarak salınır, çözücü molekülü taban seviyeye ( $B_1$ 'den  $B_0$ 'a) döner. Bu olay Şekil 2.6'deki enerji seviye diagramında gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Bir çözücü moleküle ait enerji seviye diyagramı (Knoll 2000).

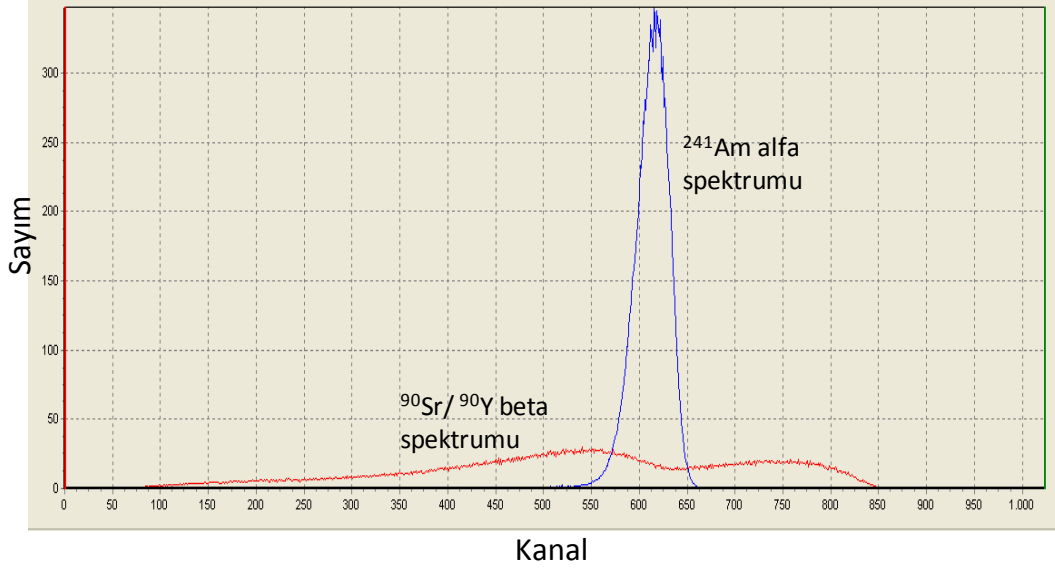
Fluor molekülleri tarafından UV ışınları emilir ve taban seviyeye dönerken de mavi dalga boyunda ışık yayar. Nükleer bozunma olayları yaklaşık 10 foton/keV enerji üretir. Bu enerji 5 nanosaniye seviyesinde bir zaman diliminde salınır. Uyarılan flour moleküllerinden salınan toplam foton sayısı sintilasyonu oluşturur. Üretilen ışık şiddeti soğurulan parçacığın enerjisi ile orantılıdır. Mavi dalga boyu aralığındaki ışık fotonları, uygun fotokatot yüzey tepkisi olan fotoçoğaltıcı tüpün (PMT) fotokatoduna çarpar. Fotokatot yüzeyinde oluşan fotoelektronlar, sintilasyon fotonlarının sayısı ile orantılı olarak elektriksel puls üretirler. LSC’de normalde iki adet PMT vardır. PMT puls yüksekliği vial içindeki olayın konumuna bağlıdır. 100 foton üreten bir olay eğer PMT’ye yakınsa daha geniş bir puls ile gösterilir. Eğer her iki PMT’den gelen sinyal de aynı anda (yaklaşık 20 nanosaniye içinde) olursa, gelen pulsların yüksekliği toplanarak çıktı elde edilir. (Şekil 2.7)



Şekil 2.7 Çift PMT’lü LSC’de sinyal toplanması

Bu çıktı sintilasyonun toplam şiddeti ile orantılıdır. Bu analog puls, maksimum yüksekliğe çıkıp sonra sıfıra düşer. Elektrik pulsunun yüksekliği, parçacığın enerjisini ifade eden dijital bir değere çevrilir, analizörü geçer ve her LSC kanalının dijital değeri

ile karşılaştırılır. Her kanal, çoklu kanal analizörünün hafıza biriminde bir adrestir. Her kanaldaki puls sayısı çıktı olarak alınır. Bu sayede numune analiz edilmiş olur ve spektrum, radyasyonun enerjisi ya da kokteylde çözünen radyoaktif maddenin miktarı hakkında bilgi verir. Örnek bir LSC spektrumu Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen alfa yayınlıyıcı  $^{241}\text{Am}$  ve beta yayınlıyıcı  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  radyonüklitlerinin spektrumları

Şekil 2.8’de görüleceği üzere, yüksek iyonlaştırıcı kabiliyete sahip alfalar daha dar bir spektrum verirken, beta spektrumu nispeten daha yayvandır. Bu beta spektrumunda gözlenen iki pik tepesi ise,  $^{90}\text{Sr}$  ve  $^{90}\text{Y}$ ’un betalarını temsil etmektedir.

### b) Sönümlenme Etkisi

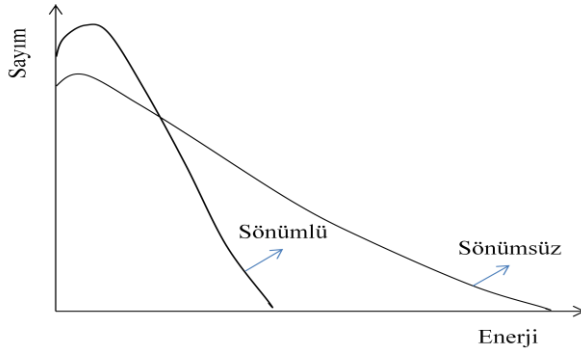
LSC’de sayım yaparken numuneden yayılan bozunma enerjisinin, mavi ışık fotonlarına dönüşümü esnasında, ölçüm verimini etkileyen faktöre sönümlenme (quenching) denir. Sönüm, radyonüklitten dedekte edilen enerji spektrumunun daha düşük bir enerjiye doğru kaymasına neden olur. Sönümlenme, kimyasal, optik (renk etkisi) ve fiziksel olmak üzere üç çeşittir.

- Bazen safsızlık olarak adlandırılan kimyasal sönüm (chemical quench), çözücüden çözüneneye enerji transferindeki radyasyonla aktarılan enerjinin kaybına neden olur.
- Optik ya da renk sönümü (color quench) çözüneneye üretilen fotonların

azalmasına neden olur.

- Fiziksel sönüm (physical quench), örneğin fiziksel formu nedeniyle gerçekleşir.

Kimyasal sönüm, ışık dönüşümünden önce radyoaktif beta enerjisini soğurur. Renk sönümü, sintilatörün yaydığı dalga boyu aralığındaki ışığı soğurur. Bu durumda yayılan fotonların sayısı değişmez, ama fotoçoğaltıcı tüpe ulaşan foton sayısını azaltır. Sönümün her tipi ışık pulslarının tümünün enerjisini ve dakikadaki toplam sayımı azaltır. Sönümleme ile gerçekleşen verim kaybına bir örnek, Şekil 2.9'da verilmiştir.

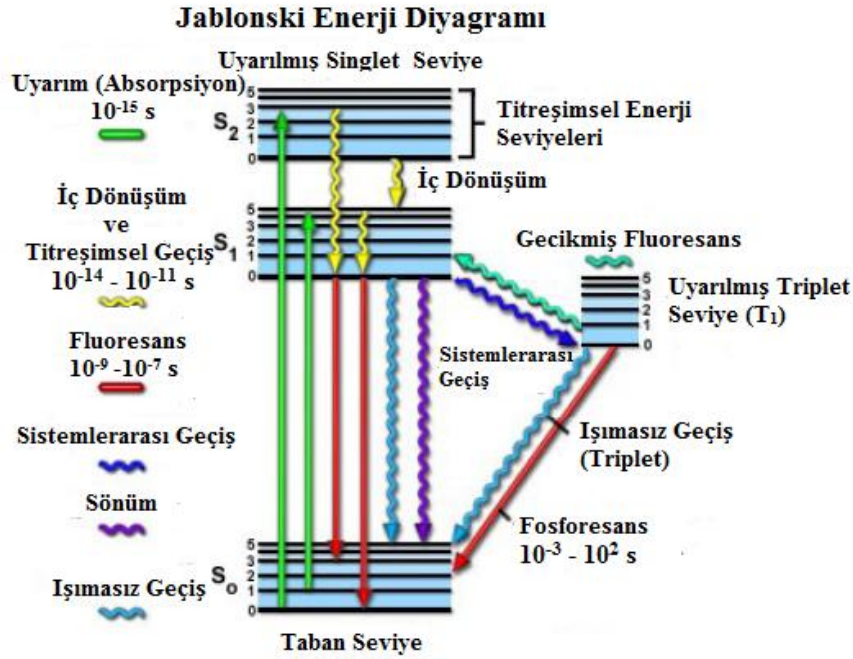


Şekil 2.9 Sönümleme ile gerçekleşen verim kaybına örnek.

Standartlar ve numuneler mümkün olduğunca birbirine yakın sönümleme derecesinde olmalıdır. Numuneler standartlardan sönümleme derecesi bakımından farklı olduğunda, standartların sönümlemesi numuneleri daha iyi yansıtacak şekilde modifiye edilmelidir. Numune sönümlemesi varsa taşma (spill) hesabının düzeltilmesi yapılabilir.

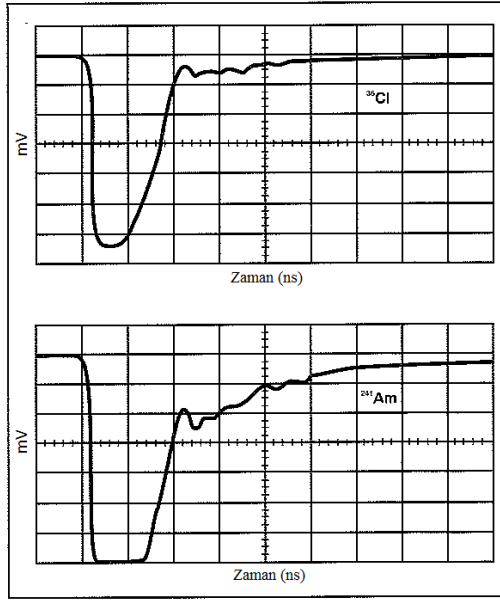
### c) Alfa ve Beta Puls Ayrımı

LSC ile alfa salıcı radyonüklitlerin aktivitesini ölçme kalibreyeti yıllardır bilinmektedir. Alfa ve beta salıcı radyonüklitlerin PMT anotta farklı şekiller ürettiği saptanmıştır. Alfa ve beta ayrımı bu temele dayalı yapılabilir. Alfa ve beta ayrılması ile ilgili çalışmaların çoğu bugün devam etmektedir. Alfa olaylarının beta olaylarından nasıl ayrıldığını anlamak için prosesleri moleküler seviyede incelemek gereklidir. Alfa ve beta olayları, dedektörün PMT anodunda üretilen elektrik pulsları incelenerek ayrıştırılabilir. Bu da alfa pulslarının beta pulslarından zaman ekseninde daha uzun olmasına dayanır.



Şekil 2.10 Jablonski enerji diyagramı ( Yücel 2013)

Sintilasyon olayı ani bileşen ve gecikmiş bileşenden oluşur. PMT'nin katodundaki foton olayları kokteyldeki fluor moleküllerinin uyarılmış tekli (singlet; S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>,...gibi) ve üçlü (triplet, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, ... gibi) seviyelerinin radyoaktif bozunmasından kaynaklanır (Şekil 2.10). Ani bileşen, uyarılmış singlet seviyenin hızlı, eksponansiyel bozunmasından (<80ns) oluşur. Gecikmiş bileşen ise, triplet seviyedeki molekülün sadece triplet seviyedeki başka bir molekül ile çarpışmasıyla olur. Bu da daha uzun bir yaşam süresiyle sonuçlanır (>300ns). Işığın ani ve gecikmiş bileşenlerinin bağlı miktarlarının farklı tipteki parçacıkların neden olduğu özgül iyonizasyona bağlı olduğu bilinmektedir. Alfa parçacıklarının daha yüksek özgül iyonizasyonu, uyarılmış moleküllerin büyük bir kısmının triplet seviyede olmasını sağlar. Alfa enerjisi nedeniyle oluşan pulsun gecikmiş bileşeni, beta enerjisi nedeniyle oluşan pulstan tipik olarak daha uzun sürer. Bu da puls şekil analizinin (PSA) parçacık dedeksiyonunda kullanılma sebebi olup, alfa ve beta ayrımını içerir. Şekil 2.11 5,4-5,5 MeV bölgesinde alfa parçacıkları üreten <sup>241</sup>Am ile maksimum enerjisi (E<sub>max</sub>) 750 keV olan beta parçacıkları üreten <sup>36</sup>Cl arasındaki puls şekillerinin farkını ve spektral çakışmayı göstermektedir.



Şekil 2.11  $^{36}\text{Cl}$  ve  $^{241}\text{Am}$  için PMT anodunda oluşan elektrik pulsları (Cook 1996).

PSA'nın en etkin kullanımı alfa sayımında olmasına rağmen bu teknik doğal fon ayırımında da kullanılabilir. PSA değerleri, bir değer aralığında ayarlanabilir. Optimum PSA'da performans katsayısı (figure of merit)  $E^2/B$  maksimum olur. Ayrıca optimum PSA kullanıcı tarafından belirlenir ve vial tipine ve numunenin kimyasal içeriğine özgüdür. Sönümlenme, kokteyl tipi, numune hacmi, vial tipi alfa ve beta puls ayırımını etkileyen faktörlerdir.

#### d) Puls şekil ayırımı

Puls şekil ayırım teknikleri, nötron spektrometride gama doğal fonunu reddetmek için, sıvı sintilasyon sayımında fisyon olaylarının izolasyonu için yaygın olarak uygulanır. Bu teknikler, Puls Şekil Analizi (PSA: Pulse Shape Analysis), Puls Bozunma Analizi (PDA: Pulse Decay Analysis), Zaman Çözümlü Puls Bozunma Analizi (TR-PDA: Time Resolved Pulse Decay Analysis ) olarak isimlendirilir. Bu tekniklerin hepsi puls bozunma zamanının bazı boyutlarını ölçen elektronik devrelere dayanır.

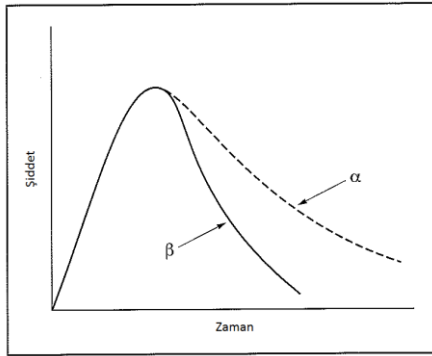
#### i) Puls Şekil Analizi (PSA)

PSA, sintilasyon pulsunun kuyruğunun yükünü birleştiren ve aynı pulsta toplam yük ile karşılaştıran bir metoda dayanan puls şekil ayırım tekniğidir. PSA seviyelerinin farklı ayarları pulsu ya uzun (alfa pulsuna benzeyen) ya da kısa (beta pulsuna benzeyen)

kategoriye atar. Böylece farklı PSA ayarları uzunluklarına göre pulsları kategorize eder. Tipik olarak PSA ayarının artırılması uzuna doğru daha çok pulsa (ya da alfa kategorisine) yönlendirir. Ancak bu tekniğin nasıl uygulandığına bağlı olarak tersi de doğru olabilir yani ayarı arttırmak daha çok alfa sayımını beta kategorisine yönlendirebilir. Puls şekil analizini yapmak için birçok metot vardır. Bunlar arasında yavaş crossover zamanlaması, hızlı crossover zamanlaması ve puls yükseklik tetikleyicisinin sabit kesri bulunur.

## ii) Puls Bozunma Analizi (PDA)

Alfa parçacıklarınca üretilen triplet seviyelerin büyük bir yüzdesi PMT anotta elektronik pulslara çevrilir. Bu, numune kokteylinde üretilen beta parçacıkları ve gama fotonlarından elde edilenden 30 ns kadar uzun olabilir. Grafikselsel gösterimi Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12 Sıvı sintilatörde alfa ve beta pulslarının karakteristik ışık puls şekilleri (Cook 1996)

PDA sıfırdan geçiş zamanı (zero-cross timing) tekniğine dayanır. Genelde sıfırdan geçişe hassas devrenin mükemmel alfa-beta ayırımına müsaade ettiği kanıtlanmıştır. Alfa'nın beta ve gama olaylarından ayırımını daha ileri optimize etmek için anot pulsları toplanır, yavaşlatılır ve düşük geçiş filtresinden (low pass filter) geçirilerek ileri şekillendirilir. Bu dalga fonksiyonunun türevi bir sıfır geçiş noktası pulsu üretir. Bu bilgidenden optimum puls bozunma ayırımı (PDD) pulsların iki tipi için de sıfır geçiş noktaları arasında ayarlanabilir.

### **iii) Zaman Çözümlü Puls Bozunma Analizi (TR-PDA)**

TR-PDA, TR-LSC doğal fon ayırımı ve puls bozunma analizinin birleşik kullanımınıdır. PDA'ya TR-LSC uygulayarak beta olarak yanlış sınıflandırılmış alfa olayları ayrılır. Çünkü alfa pulslarının uzun kuyrukları (gecikmiş bileşen) doğal fon olaylarına benzer. Böylece beta olarak yanlış sınıflandırılan alfa olayları, beta MCA'sından elimine edilir. Ek olarak beta olaylarının yanlış sınıflandırılması düşecektir çünkü TR-PDA daha yüksek optimum PDD değerine kaymayı sağlar. Daha yüksek PDD değerlerinde birkaç beta olayı alfa pulsları için gerekli zaman şartını yerine getirir. Bu da alfa MCA'sına giren beta pulslarının azalmasını sağlar.

### **e) Yanlış sınıflandırma eğrileri**

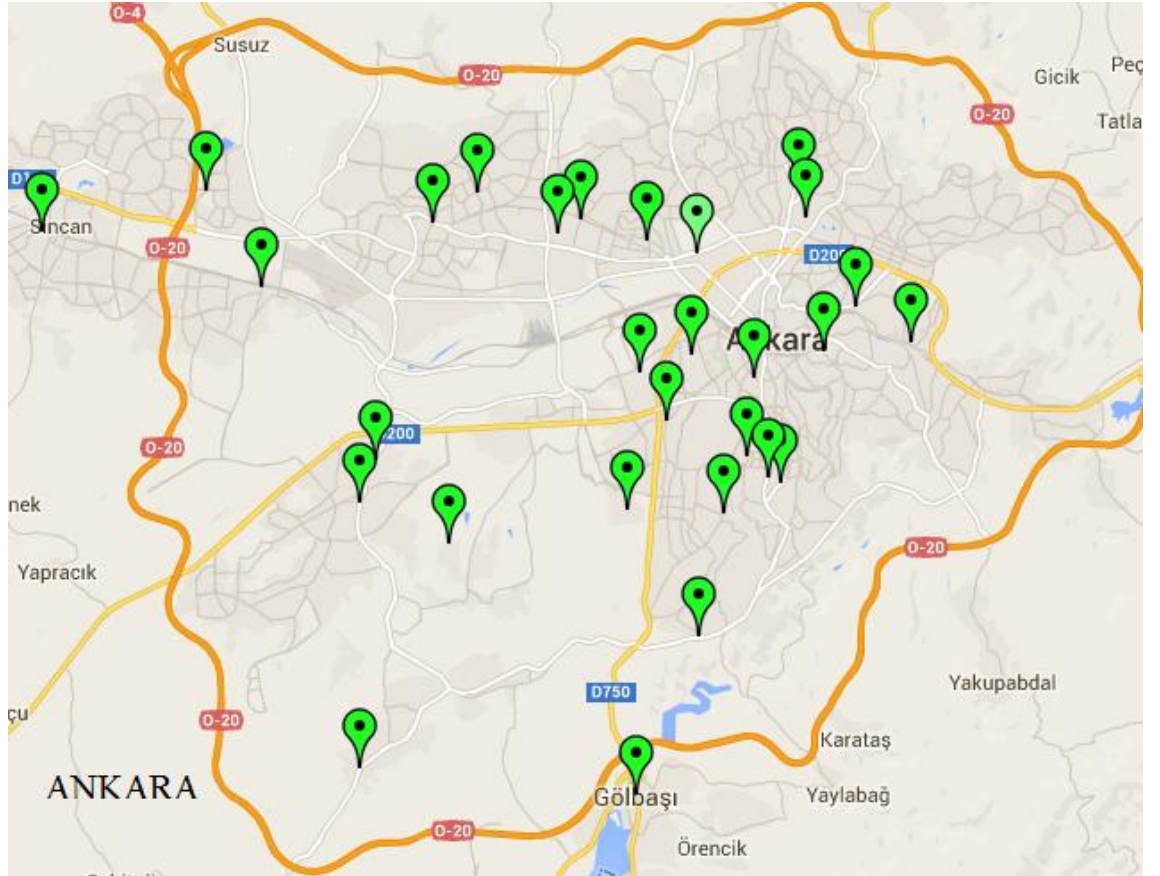
Alfa-beta ayırım performansını optimize etmek için doğru puls şekil ayırım ayarını belirlemek gereklidir. Bu tez çalışmasında puls şekil ayırımı için PSA yöntemi kullanılmıştır. Optimum PSA'nın belirlenmesi ilgilenilen enerji aralığında saf alfa ve saf beta yayınlayan iki standart kaynak gerektirir. En doğru sonuçlar için standartlar, kimyası, hacmi, vial tipi gibi özellikler yönünden gerçek numunelere benzer şekilde hazırlanmalıdır. Ayrı optimum PSA ayarları da özgün alfa ve beta standart çiftlerinden türetilir. Optimum ayarlara ulaşmak için her standart, PSA ayar aralığında tek başına sayılır ve beta MCA'sındaki alfaların yanlış sınıflandırması (%) ve alfa MCA'sındaki betaların yanlış sınıflandırması (%) PSA'ya karşı aynı grafikte çizilir. Belirlenen optimum PSA iki eğrinin kesişme noktasıdır. Bu da alfa ve beta olaylarının en iyi ayrıldığı noktadır (Cook 1996).



### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Örnekleme

Ankara'nın çeşitli semtlerinden toplanan 53 adet musluk suyu ve ticari olarak satılan 38 adet şişe suyu ile çalışılmıştır. Musluk suyu örnekleri, şehir şebekesinden akan içme suyu kaynağından en az 1L olacak şekilde toplanmıştır. EPA 900 prosedüründe önerildiği gibi, örnekler toplandıktan sonra, uzun süreler beklemesi halinde tortulaşmayı ve yosunlaşmayı önlemek için, litre başına yaklaşık 15 ml 1N HNO<sub>3</sub> eklenerek pH'ları 2'ye getirilmiştir. Şişe suyu örnekleri de temin edildikten sonra aynı şekilde asitlendirilerek muhafaza edilmiştir. Ankara'dan toplanan T kodlu musluk sularının alındığı yerlerin konumları Şekil 3.1'de yeşil etiketlerle ve ticari olarak satılan B kodlu şişe sularının dolum tesislerinin konumları Şekil 3.2'de mavi etiketlerle verilmiştir.



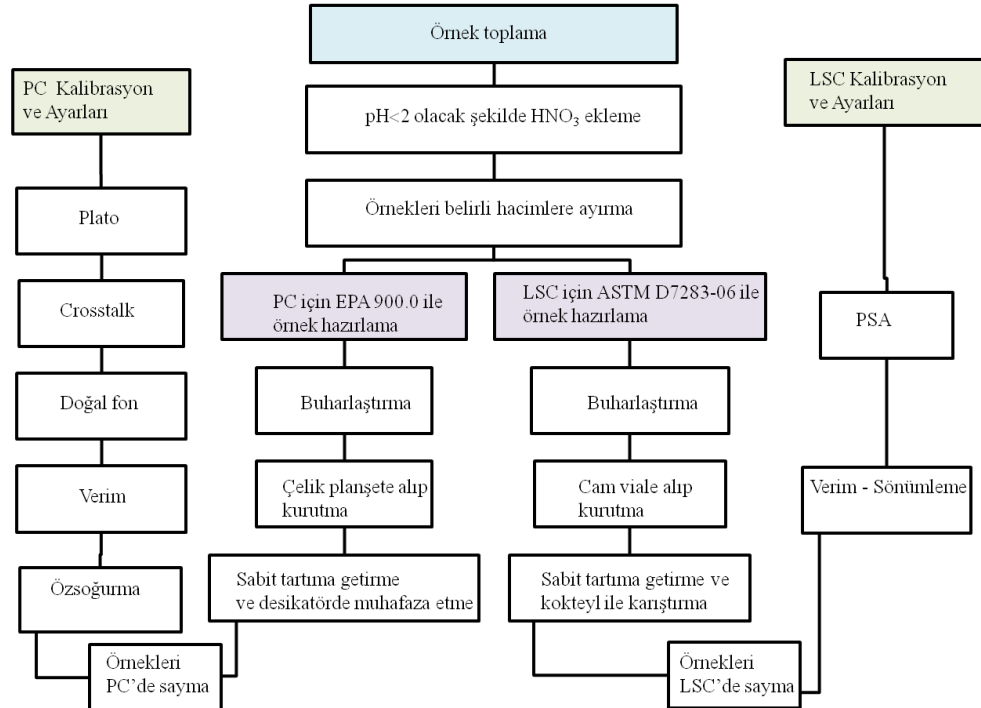
Şekil 3.1 Ankara ilinden toplanan musluk suyu numunelerinin alındığı yerlerin konumları.



Şekil 3.2 Ticari olarak satın alınan şişe sularının dolum tesislerinin konumları.

### 3.2. Örnek Hazırlama

Bu tezde kullanılan bütün musluk suları, şişe suları ve standart örnekler hem orantılı sayaç hem de sıvı sintilasyon sayacı için standart prosedürlere uygun olarak hazırlanmıştır. Şekil 3.3'de örneklerin toplanmasından sayımların alınmasına kadar uygulanan süreç görülmektedir.



Şekil 3.3 Örnek toplanmasından sayım alınmasına kadar uygulanan basamaklar.

### 3.2.1. Orantılı Sayaç Tekniği için Örnek Hazırlama

Orantılı Sayaçta hem öz soğurma eğrilerinin çizilmesi için alfa ve beta standart setleri hem de aktivite derişimleri belirlenecek su örnekleri “EPA 900 İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Aktivitesi Tayini Standart Test Metodu”na uygun olarak hazırlanmıştır.

#### 3.2.1.1. Numune Öz soğurması için Standart Hazırlama

Bunun için farklı miktardaki musluk suları (Nükleer Bilimler Enstitüsü musluk suyu, Beşevler, Ankara) kullanılarak alfa örnek seti için 0-100 mg aralığında, beta örnek seti için de 0-300 mg aralığında kalıntı kütleleri elde edilmiştir. Örnekler önce ısıtıcı üzerinde buharlaştırılmış daha sonra 5.08 cm (2") çapındaki çelik sayım planşetlerine alınarak, infrared (kızılötesi) lamba altında kuruyuncaya kadar bekletilmiştir. Bu kalıntılara, aynı miktarda radyoaktivite içeren alfa ( $^{241}\text{Am}$ ) ve beta ( $^{90}\text{Sr}$ ) standart çözeltileri eklenmiştir (EPA 900).

#### 3.2.1.2. İçme Suyu Örneklerinin Hazırlanması

Musluk suları ve şişe sularından 100 ml su örneği behere alınarak ısıtıcılı magnetik karıştırıcıda yaklaşık 5 ml kalıncaya kadar buharlaştırılmıştır. Behere 10 ml 1N  $\text{HNO}_3$  eklenerek kalıntı çözülmüş ve çözelti, darası alınmış 2 inç (5.08cm) çapında sayım planşetine ( $\approx 20\text{cm}^2$ ) azar azar aktararak, infrared lamba altında kuruyana kadar buharlaştırılmıştır. Kalıntı kütlesi sabit tartıma gelinceye kadar kurutulmaya devam edilmiştir. Örnekler, nem kapmaması için, sayıma alınıncaya kadar desikatörde bekletilmiştir (EPA 900). Şekil 3.4’de orantılı sayaçta toplam alfa ve beta ölçümü için paslanmaz çelik planşet içinde kurutulmuş su numunesi görülmektedir.



Şekil 3.4 Orantılı sayaçta ölçülmek üzere paslanmaz çelik planşet içinde hazırlanmış su numunesi.

### 3.2.2. LSC Tekniği için Örnek Hazırlama

LSC’de hem alfa ve beta puls ayrımı için gerekli olan alfa ve beta standart örnekleri ve sönümlemenin verime etkisinin belirlenmesi için gerekli alfa, beta ve aktivitesiz boş matris (matriks blank) setleri, hem de aktivite derişimleri belirlenecek su örnekleri “ASTM D7283-06 Sıvı Sintilasyon Sistemi ile Sularda Alfa ve Beta Aktivitesi için Standart Test Metodu”na uygun olarak hazırlanmıştır.

#### 3.2.2.1. Alfa ve Beta PSA (Puls Şekil Analizi ) Standart Kalibrasyon Örneklerinin Hazırlanması

Alfa-beta puls ayrımı için yapılan PSA kalibrasyonunda kullanılmak üzere bir alfa ve bir beta standart kalibrasyon örneği hazırlanmıştır. Bunun için 5 ml 0,1M HNO<sub>3</sub> çözeltisi viallere alınarak içine alfa (yaklaşık 200 Bq <sup>241</sup>Am) ve beta (yaklaşık 200 Bq <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y) sertifikalı standart referans çözeltilerinden eklenmiştir. Daha sonra her iki vialde de 15ml sintilasyon kokteyli (Optiphase Hi Safe3, PerkinElmer) eklenmiş ve iyice karıştırılmıştır.

#### 3.2.2.2. Alfa, Beta ve Radyoaktif Olmayan (Boş) Matris Standart Setlerinin Hazırlanması

Sönümlemenin verime etkisini belirlemek amacıyla farklı kalıntı kütlelerine sahip alfa standart seti, beta standart seti ve boş matris (matrix blank) seti olmak üzere üç set örnek hazırlanmıştır. Sönümleme (quenching) ajanı olarak kullanılan örnek kalıntısı kütlesi analiz edilecek sudaki çözünmüş katıları temsil etmektedir.

**Alfa standart seti:** İlgilenilen alfa bölgesindeki (ROI<sub>α</sub>) alfa parçacığı dedeksiyon verimi ve ilgilenilen beta bölgesindeki (ROI<sub>β</sub>) alfa parçacığı dedeksiyon verimi için örnek kalıntısının kütlesi 0-200 mg aralığında olacak şekilde 7 adet alfa standardı hazırlanmıştır. Setin her bir örneğine yaklaşık 200 Bq aktiviteli <sup>241</sup>Am sertifikalı standart referans çözeltisi eklenmiştir.

**Beta standart seti:** İlgilenilen beta bölgesindeki ( $ROI_{\beta}$ ) beta parçacığı dedeksiyon verimi ve ilgilenilen alfa bölgesindeki ( $ROI_{\alpha}$ ) beta parçacığı dedeksiyon verimi için örnek kalıntısının kütlesi 0-200 mg aralığında olacak şekilde 7 adet beta standardı hazırlanmıştır. Setin her bir örneğine yaklaşık 200 Bq aktiviteli  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  sertifikalı standart referans çözeltisi eklenmiştir.

**Radyoaktif Olmayan (Boş) Matris seti:** Kalibrasyon setlerine uyumlu, örnek kalıntısının kütlesi 0-200 mg aralığında olacak şekilde 7 adet örnek hazırlanmıştır. Bu set, alfa ve beta setlerinin doğal fonunu temsilen kullanılmış, bu nedenle bu sete herhangi bir aktivite eklenmemiştir.

Her bir set için (alfa, beta, boş matris) farklı miktarlarda su kullanılarak ASTM D7283-06 standart metoduna uygun şekilde cam viallere hazırlanmıştır. Kalıntı kütleleri kaydedilmiştir. 0 (sıfır) kütle standartları için 5 ml deiyonize su kullanılmıştır.

### 3.2.2.3. İçme Suyu Örneklerinin Hazırlanması

100 ml su örneği cam behere alınarak, çeker ocak içinde ısıtıcı tabla üzerinde kaynatmadan yaklaşık 5 ml kalıncaya kadar buharlaştırılmıştır. Çözelti, darası alınmış cam vial pipet yardımıyla alınmış ve beher çeperleri az miktarda 0,1 M  $\text{HNO}_3$  çözeltisi ile yıkanarak vial eklenmiştir. Cam vial ısıtıcı tabla üzerine alınmış ve çözelti kuruyana kadar kaynatmadan buharlaştırılmıştır. Kuruyunca tartılarak net kalıntı kütlesi kaydedilmiştir. Bu kütle sönümlenme etkisini düzeltmek amacıyla sönümlenme gösterge parametresi (QIP, quench-indicating parameter) olarak kullanılmıştır. Cam vialde kurutulan kalıntının üzerine, 5ml 0,1 M  $\text{HNO}_3$  çözeltisi eklenerek buharlaştırmadan ısıtıcı plaka üzerinde hafifçe ısıtılıp kalıntının çözünmesi sağlanmıştır. Isıtma sırasında buharlaşmayı engellemek için vial kapağı gevşek kapatılmıştır. Kalıntı çözündükten sonra vial soğutularak 15ml sintilasyon kokteyli (Optiphase Hi Safe3) eklenmiştir. Örnekler kokteyllerle iyice karıştırılarak homojen ve faz ayrımı olmayan karışımlar elde edilmiştir. Şekil 3.5'de LSC'de toplam alfa ve beta ölçümü için cam vial alındıktan sonra sintilasyon kokteyli ile karıştırılmış ve sayıma hazır hale gelmiş bir su numunesi görülmektedir.



Şekil 3.5 LSC’de ölçülmek üzere cam vialde hazırlanmış su numunesi.

### 3.3. Toplam Alfa ve Beta Tayin Yöntemleri

Bu tezde toplam alfa ve beta analizi için orantılı sayaç ve sıvı sintilasyon sistemi kullanılmıştır.

#### 3.3.1 Orantılı Sayaç İle Toplam Alfa ve Beta Tayini

Bu çalışmada su örneklerinin toplam alfa ve beta tayini için, 4 dedektörlü ve P-10 gazlı bir orantılı sayaç olan Canberra LB4110 Düşük Seviye Alfa ve Beta Sayım Sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.6). Canberra LB4110 Düşük Seviye Alfa ve Beta Sayım Sistemi, pasif zırhlama (1 mm alüminyum 5 cm kurşun tuğla) ve aktif zırhlama ( plastik veto dedektörü) koruması altında 2,25" çapındaki gaz akışlı orantılı sayaçlardan 4 adedini bulundurmaktadır. Her bir dedektörün  $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  mylar penceresi bulunmaktadır.

Bu sayım sisteminde su örneklerinin sayımı için kullanılan EPA 900 standart yöntemi 3.9 MeV’den büyük enerjiye sahip alfa yayıcıların ve 0.1 MeV’in üstünde maksimum enerjiye sahip beta yayıcıların ölçümü için uygulanabilir. Bu yöntemin uygulanabileceği derişimin en düşük değeri (MDC) örnek boyutuna, sayım sisteminin özelliklerine, doğal fon sayım değerine ve sayım süresine bağlıdır. Ayrıca, örnek kalıntısı tarafından emilen nem de, sayımı ve öz-soğurmayı etkiler. Sayım planşetindeki kalıntının homojen olmayan dağılımı ise yöntemin doğruluğunu ve kesinliğini etkiler. Bu nedenlerden dolayı sayıma uygun örnek hazırlamak ve kalibrasyonların yapılması kritiktir.



Şekil 3.6 Canberra LB4110 Düşük Seviye Alfa ve Beta Sayım Sistemi

### 3.3.1.1.Orantılı Sayaç Kalibrasyonları

Orantılı sayaçta analize başlamadan önce plato, cross talk (istenmeyen karışma), doğal fon, verim kalibrasyonlarının yapılması ve özsoğurma eğrilerinin çizilmesi gereklidir. Gazın kalitesinin platoyu ve cihazın performansını etkilemesi nedeni ile bu kalibrasyonlar özellikle gaz değişimde tekrarlanmıştır. Kalibrasyonlardan elde edilen değerler (verim, doğal fon, özsoğurma faktörü) örneklerin sayım değerleri ile birlikte aktive derişimlerinin hesabında kullanılmıştır.

#### 3.3.1.1.1. Plato Kalibrasyonu

En uygun eş zamanlı alfa-beta ve sadece alfa sayımı gerilimlerinin belirlenmesi için öncelikle plato uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama ile hem alfa hem de beta (eş zamanlı) çalışma gerilimi belirlenmiştir. Plato uygulamasında 300 V'tan başlayarak 1650 V'a kadar 15'er volt artırılarak alfa ve beta kaynakları için sayım alınmıştır. Platonun elde edilmesinde iki adet alfa ( $^{210}\text{Po}$  ve  $^{241}\text{Am}$  noktasal kaynaklar) ve iki adet beta ( $^{90}\text{Sr}$  noktasal kaynaklar) kaynağı kullanılmış, her dedektörde alfa ve beta kaynakları ayrı ayrı sayılmıştır. Her gerilim basamağında 15 dk sayım alınmış veya 90000 sayım elde edildiğinde bir üst gerilim değerine geçilmiştir. Plato eğrisi oluşmaya başlayana kadar çok düşük sayım değerleri oluşur. Bu voltaj değerlerinde sayım süresini kısaltmak için 0,1 dk sürede 5 sayım oluşmuyorsa diğer basamağa geçilmiştir.

Kaynaklar sayıldıktan sonra, yüksek gerilime karşı alfa ve beta kaynaklarının sayım hızı eğrileri çizilmiştir. Gerilim değerleri eğrilerin düzleşmeye başladığı (plato) noktalarda seçilmiştir. Maksimum eğimin %3,5 olduğu plato bölgesinde dört dedektör için ortak bir çalışma gerilimi belirlenmiştir.

### **3.3.1.1.2. İstenmeyen Karışma (Crosstalk) Kalibrasyonu**

Sistemde alfa ve beta parçacıklarını ayırt etmek için iki farklı ayırıcı seviye kullanılır. Beta üst seviye (BUL) ve alfa alt seviye (ALL) ayırıcıları arasında kalan bölgeye düşen sayımları ihmal etmek için alfa ve beta kanalları arasında bir bölge ayarlanır. Alfa ve beta kanalları arasında kalan kısım ölü bölge olarak adlandırılır. Ölü bölge artırılarak, alfa ve beta kanalları arasındaki istenmeyen karışma (crosstalk) azaltılır. Bu ayarlar için <sup>90</sup>Sr beta nokta kaynağı kullanılarak her dedektörde beta üst seviye (BUL) ve alfa alt seviye (ALL) değerleri cihaz prosedürüne uygun olarak belirlenip, kaydedilmiştir. Böylece optimum alfa-beta puls ayrımı sağlanmıştır.

### **3.3.1.1.3. Doğal Fon Kalibrasyonu**

Aktivite hesabında net sayımın hesaplanması için sistemin doğal fonunun önceden belirlenmesi gerekir. Canberra LB41100 alfa ve beta sayım sistemi için nominal (anma) olarak toplam doğal fon (alfa+beta), standart taşıyıcı ve 1/8" derinlikli planşet kuyusunda 1,3 cpm den düşük olmalıdır (Canberra 2003). Deneysel olarak doğal fon değerinin Ankara ili irtifası ve mevcut laboratuvar koşullarında belirlenmesi için öncelikle sistemde bir ön temizleme işlemi yapılmıştır. Bu amaçla etil alkolle veya asetonla dedektör çekmecesini ve boş planşetler silinmiştir. Boş planşetler her dedektöre yerleştirilerek sayımlar alınmıştır. Uzun sayım sürelerinde ve artan tekrar sayılarında ortalama doğal fon değerindeki belirsizlik azalması ve daha düşük MDA (asgari ölçülebilen aktivite) değerleri elde edilmesi nedeni ile 65 dakikalık 55 tekrar şeklinde sayım alınmıştır. Elde edilen doğal fon sayım hızları kaydedilmiştir. Bu değerler net sayım hızı ve dolayısıyla aktivite derişimi hesaplarında kullanılmıştır.



#### 3.3.1.1.4. Verim Kalibrasyonu

Verim kalibrasyonu belirlenirken öncelikle kullanılan standart kaynakların, kaynak veri tabanına eklenmesi gerekmektedir. Sertifikalı standart kaynak, veri tabanına tanımlanırken ismi, izotop adı, yaydığı radyasyon tipi, yarı ömrü, aktivitesi, referans tarihi, şekli gibi bilgiler kaydedilmiştir. Kaynaklar sayım planşetiyle aynı çapta (2 inç) planşet kaynaklar olup bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Orantılı sayacın alfa ve beta verim değerlerini belirlemek için kullanılan standart kaynak bilgileri.

İmalatçısı ve Kaynak seri no	Tip	Radyoizotop	Yarı ömrü (gün)	Aktivitesi (dpm)	Referans tarihi
Eckert&Ziegler I2-044	Alfa	<sup>241</sup> Am	157861,05	213480±7535	01.07.2011
Eberline 5737-06	Beta	<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y	10409,6	5550±195	31.10. 2006

Yeterli sayım istatistiği (>20000) oluşacak şekilde sayım süresi ve tekrar sayısı sisteme girilerek her dedektör için ayrı ayrı hem alfa hem de beta standart kaynakları ile sayımlar alınmıştır. Alfa ve beta verimleri dört dedektör için de hesaplanmıştır. Bu değerler kaydedilerek, aktivite derişim hesabında kullanılmıştır.

#### 3.3.1.1.5. Öz-soğurma Etkisinin Belirlenmesi

Öz-soğurma eğrisi, örnek kütlelerinin verime etkisini belirlemek için kullanılır. Örnek kütlelerinin artması ile özellikle alfa parçacıkları için öz-soğurma etkisi artar ve aktivite derişimlerinde azalma meydana gelir. Öz-soğurma eğrisi farklı kütlelerde örneklerin ölçülmesiyle elde edilir. Hem alfa hem de beta özsoğurma eğrilerinin elde edilebilmesi için en az 5 farklı kütlede örnek seti hazırlanmıştır. Alfa ve beta için hazırlanan bütün örnekler dört dedektörde de ayrı ayrı sayılmış ve verim değerleri elde edilmiştir. Alfa ve beta parçacıkları için örnek ağırlıklarına (mg) karşı verim (cpm/dpm) eğrileri (öz-soğurma eğrileri) her dedektör için ayrı ayrı elde edilmiş ve aktive derişimi hesabında kullanılmıştır.

### 3.3.1.2.Örneklerin Sayılması ve Aktivite Derişimlerinin Belirlenmesi

EPA900 Standart yöntemine göre hazırlanmış olan su örnekleri dedektörlere yerleştirilerek 1200 dakika sayılmıştır. Her örnek için aynı ve/veya farklı dedektörlerde sayımlar alınmıştır. Sayımlardan alınan değerler ve kalibrasyonlardan elde edilen veriler kullanılarak aktivite derişimleri hesaplanmıştır. Her örnek için hesaplanan aktivite derişimlerinden ortalama aktivite derişimi belirsizliği ile birlikte hesaplanmıştır.

Alfa aktivite derişiminin,  $AC_\alpha$  (Bq/L), hesaplanması için Eşitlik 3.1 kullanılmıştır.

$$AC_\alpha = \frac{R_\alpha}{\varepsilon \times V} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte,

$R_\alpha$ : Net alfa sayım hızı (toplam alfa sayım hızı – alfa doğal fon sayım hızı)

$\varepsilon$ : Alfa verim faktörü (kütleyle bağlı özsoğurma düzeltmesi yapılmış, cpm/dpm)

$V$ : Örnek hacmi (L) dir.

Beta aktivite derişiminin,  $AC_\beta$  (Bq/L), hesaplanması için Eşitlik 3.2 kullanılmıştır.

$$AC_\beta = \frac{R_\beta}{\varepsilon \times V} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte,

$R_\beta$ : Net beta sayım hızı (toplam beta sayım hızı –beta doğal fon sayım hızı)

$\varepsilon$ : Beta verim faktörü (kütleyle bağlı özsoğurma düzeltmesi yapılmış, cpm/dpm)

$V$ : Örnek hacmi (L) dir.

Aktivite derişimlerinin (AC) belirsizliğinde sayım (N), verim ( $\varepsilon$ ), doğal fon sayım hızı (B), tartım (m) ve hacimlerin (V) belirsizlikleri kullanılarak birleşik belirsiz hesabı yapılmıştır. Belirsizlik hesabı Eşitlik 3.3’de verilmiştir. Bu hesap hem alfa hem de beta aktivite derişimleri için yapılmıştır.

$$U_c(AC) = AC \cdot \sqrt{\left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte,

$U_c$  : birleşik belirsizlik

$u$ : standart belirsizliktir.

### 3.3.1.3 Asgari ölçülebilen derişim (MDC) hesabı

Dedekte edilebilecek asgari aktivite derişimi miktarı olan MDC (Bq/L), Eşitlik 3.4 kullanılarak, alfa ( $MDC_\alpha$ ) ve beta ( $MDC_\beta$ ) aktive derişimleri için hesaplanmıştır.

$$MDC = \frac{2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{(B \cdot t_c)}}{\varepsilon \cdot t_b \cdot V} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte,

B: doğal fon sayım hızı (cps)

$t_c$ : örneğin sayım süresi (saniye)

$t_b$ : doğal fon sayım süresi (saniye)

$\varepsilon$  : dedektör verimi

V: örnek hacmi (L) kullanılmıştır.

### 3.3.2. Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi (LSC) ile Toplam Alfa ve Beta Tayini

Bu çalışmada eşzamanlı çalışan çift fotoçoğaltıcı tüplü ve veto dedektörlü Quantulus 1220 (Perkin Elmer) Ultra Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.7). Sistemde aktif zırlama amacıyla veto dedektör kullanılmaktadır. Veto dedektör olarak PMT'lerin etrafını saracak şekilde yerleştirilmiş sıvı sintilatör kullanılır. Pasif zırlama amacıyla bakır ve kurşun zırhlar bulunmaktadır. Bakır zırh veto dedektörün bulunduğu haznenin duvarını oluştururken kurşun zırh bütün bu zırlamayı içine alacak şekilde yerleştirilmiştir. Kurşun zırhın en kalın yeri 20 cm (sayım haznesinin üstü) ve ağırlığı 630 kg'dır.

Su örneklerinin toplam alfa ve beta aktivite tayini için "ASTM D7283-06 Sıvı Sintilasyon Sistemi ile Sularda Alfa ve Beta Aktivitesi için Standart Test Metodu"

kullanılmıştır. Bu test metodu 0,037 Bq/L üzeri aktivite derişimlerine sahip alfa yayınlayıcılar ve 0,15 Bq/L üzeri aktivite derişimlerine sahip beta yayınlayıcılar için uygulanır. Örneğin analiz edilebilmesi için sintilasyon kokteyli ile karıştırıldığında homojen berrak bir çözelti olması gerekir. Faz ayrımı olan, çözünmeyen katılar içeren ya da berrak olmayan örnekler LSC’de doğru ölçülemezler. Bu örneklerde oluşan sintilasyon foton sayısı azalacağı ya da hiç olmayacağı veya oluşan fotonların hepsi PMT’e ulaşamayacağı için radyoaktivite derişimi doğru belirlenemez. Bu sebeplerden dolayı LSC’de örnek hazırlama önemli bir yer tutar.



Şekil 3.7. Quantulus 1220 Ultra Düşük Seviye Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi

### **3.3.2.1. LSC Kalibrasyonları**

LSC’de toplam alfa ve beta tayininden önce alfa ve beta puls ayrımını optimize etmek amacıyla puls şekil analizi (PSA) ve kalıntı kütlesi nedeniyle oluşan sönümlenimin verime etkisini belirlemek amacıyla da verim kalibrasyonları yapılmıştır.

#### **3.3.2.1.1. PSA Kalibrasyonu**

Bu kalibrasyon için iki adet standart kalibrasyon çözeltisi hazırlanmıştır. Bunlardan biri alfa diğeri beta yayınlayıcı radyonüklit içermektedir. Bu standartlarla farklı PSA’larda sayımlar alınmıştır.

Alfanın beta olarak yanlış sınıflandırması (% $T_\alpha$ ) ve betanın alfa olarak yanlış sınıflandırması (% $T_\beta$ ) Eşitlik 3.5 ve 3.6 ile hesaplanarak PSA ya karşı grafiği çizilmiştir.  $T_\alpha(\%)$  ve  $T_\beta(\%)$  değerlerinin çakıştığı PSA değeri girişim (crossover) noktası olarak belirlenir.

$$T_\alpha(\%) = \frac{\text{beta penceresindeki alfa sayımı}}{\text{toplam alfa sayımı}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$T_\beta(\%) = \frac{\text{alfa penceresindeki beta sayımı}}{\text{toplam beta sayımı}} \times 100 \quad (3.6)$$

### 3.3.2.1.2. Verim ve Sönümlenme Etkisinin Belirlenmesi

LSC’de verim kalibrasyonları şunları belirlemek için yapılır;

İlgilenilen alfa bölgesindeki ( $ROI_\alpha$ ) alfa parçacığı dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\alpha}$ ,

İlgilenilen beta bölgesindeki ( $ROI_\beta$ ) alfa parçacığı dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\beta}$ ,

İlgilenilen beta bölgesindeki ( $ROI_\beta$ ) beta parçacığı dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\beta\beta}$ ,

İlgilenilen alfa bölgesindeki ( $ROI_\alpha$ ) beta parçacığı dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\beta\alpha}$ .

Optimize edilen ROI ve PSA için alfa ve beta dedeksiyon verimleri standart örnekler kullanarak belirlenmiştir. Sönümlenmenin verime etkisini belirlemek amacıyla farklı kalıntı kütlelerine sahip alfa standart seti, beta standart seti ve boş matris seti olmak üzere üç set örnek hazırlanmıştır. Sönümlenme ajanı olarak kullanılan örnek kalıntı kütlesi analiz edilecek sudaki çözünmüş katıların temsil etmektedir boş matris set doğal fonu temsilen alfa ve beta standart setlerine uygun kütlelerde hazırlanmıştır. Vialler LSC’de en az 10000 sayım olacak şekilde sayılarak verim hesaplanmış ve kalıntı kütlelerine karşı grafiği çizilmiştir. Çizilen eğrilerle uyumlu fit (uyarlama) denklemleriyle, ilgilenilen sayım bölgesinde (ROI) dört farklı verimin ( $\epsilon_{\beta\alpha}$ ,  $\epsilon_{\alpha\beta}$ ,  $\epsilon_{\beta\beta}$ ,  $\epsilon_{\alpha\alpha}$ ) numune kalıntı kütlesiyle değişimi elde edilmiştir.

Hazırlanmış bütün kaynakların kalıntı kütlesi Sönüm Gösterge Parametresi (Quench Indicating Parameter, QIP) olarak kullanılır. Hazırlanan alfa kalibrasyon viallerinin hepsi için alfa ROI’sinde alfa parçacık dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\alpha}$ , ve beta ROI’sinde alfa parçacık dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\beta}$ , Eşitlik 3.7 ve 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{\alpha\alpha} = \frac{R_{\alpha\alpha} - R_{\alpha b}}{C_{\alpha} \times V_{s\alpha}} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{R_{\alpha\beta} - R_{\beta b}}{C_{\alpha} \times V_{s\alpha}} \quad (3.8)$$

$\varepsilon_{\alpha\alpha}$  = Alfa parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon verimi

$\varepsilon_{\alpha\beta}$  = Alfa parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon verimi

$R_{\alpha\alpha}$  = Alfa standardının alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\alpha\beta}$  = Alfa standardının beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\alpha b}$  = Kalibrasyon standardı ile eşit kalıntı kütlelerine sahip matriks blankın alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\beta b}$  = Kalibrasyon standardı ile eşit kalıntı kütlelerine sahip matriks blankın beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$C_{\alpha}$  = Referans alfa standardının aktivite derişimi (Bq/mL)

$V_{s\alpha}$  = Viale eklenen referans alfa standardının hacmi (ml)

Hazırlanan beta kalibrasyon viallerinin hepsi için beta ROI'sinde beta parçacık dedeksiyon verimi,  $\varepsilon_{\beta\beta}$ , ve alfa ROI'sinde beta parçacık verimi,  $\varepsilon_{\beta\alpha}$ , Eşitlik 3.9 ve 3.10 kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon_{\beta\beta} = \frac{R_{\beta\beta} - R_{\beta b}}{C_{\beta} \times V_{s\beta}} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{\beta\alpha} = \frac{R_{\beta\alpha} - R_{\alpha b}}{C_{\beta} \times V_{s\beta}} \quad (3.10)$$

$\varepsilon_{\beta\beta}$  = Beta parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon verimi

$\varepsilon_{\beta\alpha}$  = Beta parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon verimi

$R_{\beta\beta}$  = Beta standardının beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\beta\alpha}$  = Beta standardının alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\alpha b}$  = Kalibrasyon standardı ile eşit kalıntı kütlelerine sahip matriks blankın alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\beta b}$ = Kalibrasyon standardı ile eşit kalıntı kütlelerine sahip matriks blankın beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$C_{\beta}$ = Referans beta standardının aktivite derişimi (Bq/mL)

$V_{S\beta}$ = Viale eklenen referans beta standardının hacmi (ml)

Eşitlik 3.7, 3.8, 3.19 ve 3.10'den hesaplanan dört seri verim noktası için kalıntı kütlelerine karşı dedeksiyon verimi eğrileri çizilmiştir ve fit edilmiştir. Verim-sönüm eğrilerinden yararlanılarak her örneğin kalıntı kütlelerine göre dört dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\alpha}$ ,  $\epsilon_{\alpha\beta}$ ,  $\epsilon_{\beta\beta}$  ve  $\epsilon_{\beta\alpha}$ , hesaplanmış ve aktivite derişim hesabında kullanılmıştır.

### 3.3.2.2. Örneklerin Sayılması ve Aktivite Derişimlerinin Belirlenmesi

Hazırlanan su örnekleri standart alfa, beta ve doğal fon örnekleriyle beraber 400 dakika sayılmıştır. Elde edilen spektrumda yazılım yardımıyla ilgilenilen alfa bölgesi ( $ROI_{\alpha}$ ) ve ilgilenilen beta bölgesi ( $ROI_{\beta}$ ) belirlenmiştir. Alfa penceresinde 400-900 kanallar arası  $ROI_{\alpha}$ , beta penceresinde 250-1023 kanallar arası  $ROI_{\beta}$  olarak belirlenmiştir. Toplam alfa ve beta sayım değerleri ile birlikte verim ve doğal fon değerleri alınarak aktivite derişimleri hesaplanmıştır.

#### 3.3.2.2.1 Taşma (Spillover) faktörünün belirlenmesi

Gerçek numuneler standartlarla benzer şekilde hazırlanmak zorundadır. Yani hacim, bileşim (asit derişimi vb.), kokteyl ve vial tipi gibi özellikleri uyumlu olmalıdır. Numuneler standartlardan sönümlenme derecesi bakımından farklı olduğunda, standartların sönümlenmesi numuneleri daha iyi yansıtabilecek şekilde modifiye edilmektedir. Alfa'nın betaya girişim faktörü ve belirsizliği Eşitlik 3.11 ve 3.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_{\alpha} = \frac{\epsilon_{\alpha\beta}}{\epsilon_{\alpha\alpha}} \quad (3.11)$$

$$u^2(X_{\alpha}) = X_{\alpha}^2 \left( \frac{u^2(\epsilon_{\alpha\beta})}{\epsilon_{\alpha\beta}^2} - \frac{u^2(\epsilon_{\alpha\alpha})}{\epsilon_{\alpha\alpha}^2} \right) \quad (3.12)$$

$X_{\alpha}$ = Alfa'nın betaya girişim faktörü

$\varepsilon_{\alpha\alpha}$ = Alfa parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon verimi (kalıntı kütlelerinin fonksiyonu olarak)

$\varepsilon_{\alpha\beta}$ = Alfa parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon verimi (kalıntı kütlelerinin fonksiyonu olarak)

$u(X_\alpha)$  = Alfa'nın girişim faktörünün standart belirsizliği

Betanın alfaya girişim faktörü ve belirsizliği de Eşitlik 3.13 ve 3.14 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_\beta = \frac{\varepsilon_{\beta\alpha}}{\varepsilon_{\beta\beta}} \quad (3.13)$$

$$u^2(X_\beta) = X_\beta^2 \left( \frac{u^2(\varepsilon_{\beta\alpha})}{\varepsilon_{\beta\alpha}^2} + \frac{u^2(\varepsilon_{\beta\beta})}{\varepsilon_{\beta\beta}^2} \right) \quad (3.14)$$

$X_\beta$ = Betanın alfaya girişim faktörü

$\varepsilon_{\beta\beta}$ = Beta parçacıklarının beta ROI'sindeki dedeksiyon verimi (kalıntı kütlelerinin fonksiyonu olarak)

$\varepsilon_{\beta\alpha}$ = Beta parçacıklarının alfa ROI'sindeki dedeksiyon verimi (kalıntı kütlelerinin fonksiyonu olarak)

$u(X_\beta)$  = Betanın girişim faktörünün standart belirsizliği

### 3.3.2.2.2 Net sayım hızının hesaplanması

Net sayım hızları ve alfa ROI'sindeki ve beta ROI'sindeki net sayım hızlarının standart belirsizlikleri Eşitlik 3.15-18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_\alpha = R_{\alpha\alpha} - R_{\alpha b} \quad (3.15)$$

$$u(R_\alpha) = \sqrt{\frac{R_{\alpha\alpha}}{t_s} + \frac{R_{\alpha b}}{t_b}} \quad (3.16)$$

$$R_\beta = R_{\beta\beta} - R_{\beta b} \quad (3.17)$$

$$u(R_\beta) = \sqrt{\frac{R_{\beta\beta}}{t_s} + \frac{R_{\beta b}}{t_b}} \quad (3.18)$$

$R_\alpha$  = Örneğin alfa ROI'sinde saniyedeki net sayım hızı



$R_\alpha$  = Örneğin alfa ROI'sinde saniyedeki net sayım hızı

$R_{\alpha\alpha}$  = Örneğin alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\alpha\beta}$  = Doğal fon örneğinin alfa ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_\beta$  = Örneğin beta ROI'sinde saniyedeki net sayım hızı

$R_{\beta\beta}$  = Örneğin beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$R_{\beta\alpha}$  = Doğal fon örneğinin beta ROI'sinde saniyedeki sayım hızı

$t_s$  = Örneğin sayım süresi (s)

$t_b$  = Doğal fon örneğinin sayım süresi (s)

### 3.3.2.2.3 Net sayım hızının taşma (spillover) düzeltmesi

Girişim düzeltmesi yapılmış net alfa ve beta sayım hızları ve birleşik standart belirsizlikler Eşitlik 3.19-22 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R'_\alpha = \frac{R_\alpha - R_\beta X_\beta}{1 - X_\alpha X_\beta} \quad (3.19)$$

$$u_c(R'_\alpha) = \sqrt{\frac{u^2(R_\alpha) + X_\beta^2 u^2(R_\beta) + R_\alpha^2 X_\beta^2 u^2(X_\alpha) + R_\beta^2 u^2(X_\beta)}{1 - X_\alpha X_\beta}} \quad (3.20)$$

$$R'_\beta = \frac{R_\beta - R_\alpha X_\alpha}{1 - X_\alpha X_\beta} \quad (3.21)$$

$$u_c(R'_\beta) = \sqrt{\frac{u^2(R_\beta) + X_\alpha^2 u^2(R_\alpha) + R_\beta^2 X_\alpha^2 u^2(X_\beta) + R_\alpha^2 u^2(X_\alpha)}{1 - X_\alpha X_\beta}} \quad (3.22)$$

$R'_\alpha$  = Girişim düzeltmesi yapılmış alfa sayım hızı

$R'_\beta$  = Girişim düzeltmesi yapılmış beta sayım hızı

### 3.3.2.2.4 Aktivite derişimlerinin hesaplanması

Örneğin toplam alfa ve beta aktivite derişimleri ve birleşik standart belirsizlikleri Eşitlik 3.24-27 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$AC_{\alpha} = \frac{\hat{R}_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha\alpha} \times V} \quad (3.24)$$

$$u_c(AC_{\alpha}) = \sqrt{\frac{u_c^2(\hat{R}_{\alpha})}{\varepsilon_{\alpha\alpha}^2 \times V^2} + AC_{\alpha}^2 \times \left( \frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{1+X_{\alpha}X_{\beta}}{1-X_{\alpha}X_{\beta}} \times \frac{u^2(\varepsilon_{\alpha\alpha})}{\varepsilon_{\alpha\alpha}^2} \right)} \quad (3.25)$$

$$AC_{\beta} = \frac{\hat{R}_{\beta}}{\varepsilon_{\beta\beta} \times V} \quad (3.26)$$

$$u_c(AC_{\beta}) = \sqrt{\frac{u_c^2(\hat{R}_{\beta})}{\varepsilon_{\beta\beta}^2 \times V^2} + AC_{\beta}^2 \times \left( \frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{1+X_{\alpha}X_{\beta}}{1-X_{\alpha}X_{\beta}} \times \frac{u^2(\varepsilon_{\beta\beta})}{\varepsilon_{\beta\beta}^2} \right)} \quad (3.27)$$

$AC_{\alpha}$  = Örneğin toplam alfa aktivite derişimi (Bq/L)

$AC_{\beta}$  = Örneğin toplam beta aktivite derişimi (Bq/L)

$V$  = Örnek hacmi (L)

### 3.3.2.2.5 Asgari ölçülebilen derişim (MDC) hesabı

Asgari ölçülebilen derişim MDC (Bq/L) örnekte belirli sayım şartlarında ölçülebilecek aktivitenin en küçük değerini temsil eder. MDC, dedektör geometrisi, aktivite, örnek ve doğal fon sayım süresi, örnek hacmi, dedeksiyon verimi ve girişim faktörleri gibi parametrelere bağlı olarak değişir. Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi mBq ve üstü seviyesinde aktiviteleri ölçebilen, hassasiyeti yüksek bir dedeksiyon sistemidir. Dolayısıyla, MDC değerleri de oldukça düşüktür. LSC'de alfa ve beta için en küçük dedekte edilebilecek aktivite derişimleri Eşitlik 3.28 ve 3.29 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MDC_{\alpha} = \frac{2.71 \frac{1+X_{\alpha}X_{\beta}^2}{t_s(1-X_{\alpha}X_{\beta})} + 3.29 \sqrt{\frac{AC_{\beta}V\varepsilon_{\beta\alpha}(1+X_{\beta})}{t_s} + (R_{\alpha b} + X_{\beta}^2 R_{\beta b}) \left(\frac{1}{t_a} + \frac{1}{t_b}\right)}}{\varepsilon_{\alpha\alpha}V(1-X_{\alpha}X_{\beta})} \quad (3.28)$$

$$MDC_{\beta} = \frac{2.71 \frac{1+X_{\beta}X_{\alpha}^2}{t_s(1-X_{\alpha}X_{\beta})} + 3.29 \sqrt{\frac{AC_{\alpha}V\varepsilon_{\alpha\beta}(1+X_{\alpha})}{t_s} + (R_{\beta b} + X_{\alpha}^2 R_{\alpha b}) \left(\frac{1}{t_a} + \frac{1}{t_b}\right)}}{\varepsilon_{\beta\beta}V(1-X_{\alpha}X_{\beta})} \quad (3.29)$$

## 4. BULGULAR

### 4.1 Orantılı Sayaç Tekniği ile Elde Edilen Bulgular

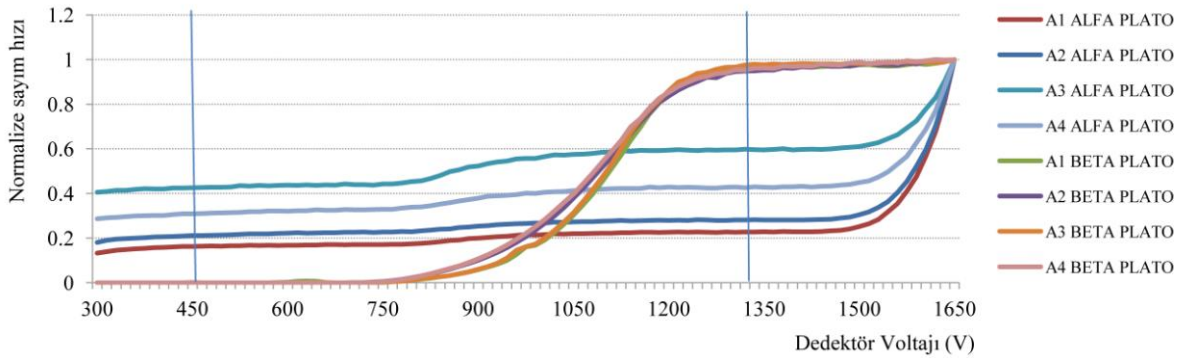
Orantılı sayaçta toplam alfa ve beta analizi için gerekli kalibrasyonlar yapıldıktan sonra EPA 900 standart metoduna göre hazırlanmış su örnekleri sayılarak aktivite derişimleri hesaplanmıştır.

#### 4.1.1 Orantılı Sayaç Kalibrasyonları

Orantılı sayaçta toplam alfa ve beta analizinden önce yapılması gereken plato, crosstalk, verim kalibrasyonları yapılmış, doğal fon sayımları alınmış ve özsoğurma eğrileri çizilmiştir.

##### 4.1.1.1 Plato Kalibrasyonu

Plato uygulamasında 300 V'tan başlayarak 1650 V'a kadar 15'er volt arttırılarak alfa ve beta kaynakları için sayım alınmıştır. A1, A2, A3 ve A4 dedektörleri için  $^{210}\text{Po}$  (noktasal),  $^{241}\text{Am}$  (noktasal) ve iki adet  $^{90}\text{Sr}$  (noktasal) kaynağı kullanılmıştır. Her dedektörde alfa ve beta kaynaklarıyla sayımlar alınmıştır. Uygulanan gerilime karşı sayım grafikleri çizilmiş, Şekil 4.1 ve maksimum eğimin %3,5 olduğu plato bölgesinde dört dedektör için ortak bir çalışma gerilimi belirlenmiştir.



Optimum alfa beta çalışma voltajı = 1335 V  
Optimum alfa çalışma voltajı = 465 V

Beta voltajındaki beta eğimi  
Beta voltajındaki alfa eğimi  
Alfa voltajındaki alfa eğimi

	A1	A2	A3	A4
Beta voltajındaki beta eğimi	%1,93	%1,13	%1,92	%1,61
Beta voltajındaki alfa eğimi	%1,10	-%0,10	-%0,11	-%0,01
Alfa voltajındaki alfa eğimi	%1,87	%3,35	%1,14	%2,41

Şekil 4.1 Orantılı sayaçta elde edilen plato eğrisi

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere sadece alfa sayımları için belirlenen çalışma voltajı 465V ve alfa ve beta sayımı için çalışma voltajı 1335 V’tur. Bu değerler, kaydedilmiş, diğer kalibrasyon ve örnek ölçümlerinde sistem bu ortak çalışma geriliminde çalıştırılmıştır. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi plato eğimleri öngörülen %3,5 değerinin altındadır.

#### 4.1.1.2 İstenmeyen Karışma (Crosstalk) Kalibrasyonu

<sup>90</sup>Sr beta kaynağı kullanılarak dört dedektörde alfa ve beta kanallarından birinin diğerine verdiği istenmeyen sayımların karışmasını (crosstalk) asgaride tutabilmek için bir kalibrasyon yapılmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Orantılı sayaçta crosstalk kalibrasyonu değerleri.

Dedektör No	% AUL (Alfa üst seviye)	%BLL (Beta alt seviye)	% ALL (Alfa alt seviye )	% BUL (Beta üst seviye)
A1	100,00	0,00	25,64	12,08
A2	100,00	0,00	26,22	12,21
A3	100,00	0,00	29,13	13,35
A4	100,00	0,00	29,79	13,94

Çizelge 4.1’deki değerler, sisteme kaydedilmiş, diğer kalibrasyon ve örnek ölçümlerinde sistem tarafından kullanılmıştır.

#### 4.1.1.3 Doğal Fon Kalibrasyonu

Sistemin doğal fonunu belirlemek amacıyla her dedektöre örnek hazırlamada kullanılan boş planşetlerden yerleştirilmiştir. 55 kere 65 dakikalık sayımlar alınmış ve dört dedektör için elde edilen doğal fon değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Orantılı sayaç doğal fon değerleri

Dedektör No	Alfa doğal fon sayım hızı, cpm	Beta doğal fon sayım hızı, cpm
A1	0,23±0,01	1,29 ±0,02
A2	0,12±0,01	2,53±0,03
A3	0,72±0,01	2,75±0,03
A4	0,18±0,01	1,52±0,02

Çizelge 4.2’deki değerler, kaydedilmiş, diğer kalibrasyon ve örnek ölçümlerinde kullanılmıştır. Bu sistem için öngörülen 1,3 cpm nominal doğal fon sayımı için alfa katkısının düşük olduğu ancak beta doğal fon sayım hızının yüksek olduğu

görülmektedir. Bunun nedeni Ankara irtifasındaki kozmik radyasyon seviyesi, kullanılan gazın safsızlık derecesi ve dedektörlerdeki yaşlanmalar olabilir.

#### 4.1.1.4 Verim Kalibrasyonu

Verim kalibrasyonu için sistemin veri tabanına daha önce tanımlanmış olan sertifikalı standart alfa ve beta kaynakları kullanılmıştır

Dedektörlerde ayrı ayrı hem alfa hem de beta kaynaklarıyla 20 defa en az 50000 sayım olacak şekilde sayımlar alınmış ve verimler hesaplanmıştır. Dört dedektöre ait alfa ve beta verimleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

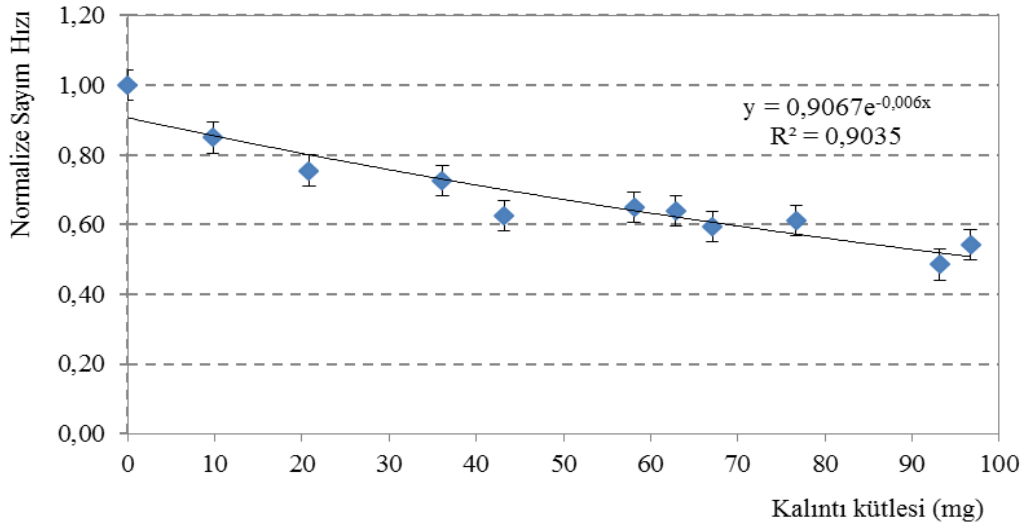
Çizelge 4.3 Planşet geometrisi için (5,02cm çaplı) orantılı sayacın alfa ve beta parçacıkları için verim değerleri

Dedektör No	Alfa verimi,%	Beta verimi,%
A1	28,54±1,04	39,21±1,44
A2	29,18±1,07	40,06±1,47
A3	29,20±1,07	39,58±1,45
A4	29,20±1,07	41,14±1,51

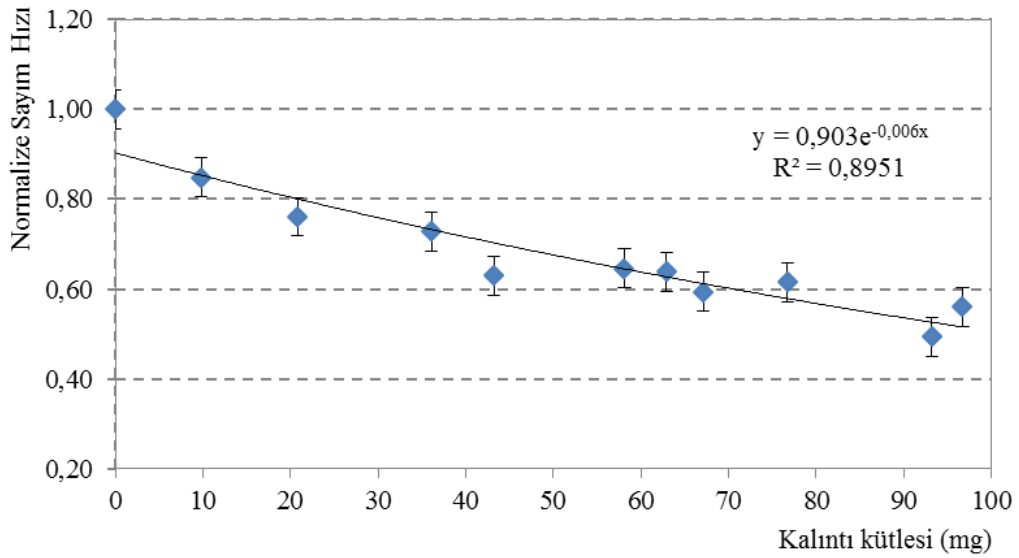
Çizelge 4.3’deki değerler, kaydedilmiş, diğer kalibrasyon ve örnek ölçümlerinde kullanılmıştır. Dedektör sertifikasında belirtildiği gibi alfa verimleri beta verimlerinden daha düşük elde edilmiştir. Verim değerleri, katı açığa da bağlı olduğundan planşet geometri için elde edilen Çizelge 4.3’deki değerlerin noktasal kaynaklar için öngörülen verim değerlerinden ( $\geq 40\%$ ) daha düşük olması normal görülmektedir.

#### 4.1.1.5 Özsoğurma Etkilerinin Belirlenmesi

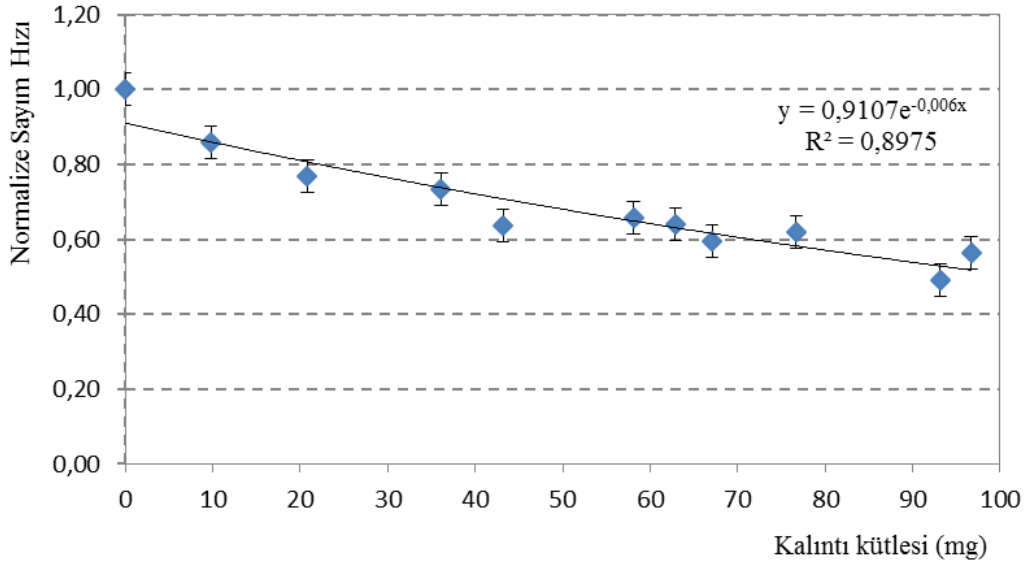
Alfa özsoğurma eğrileri için, daha önce hazırlanmış olan 0-100 mg arasındaki kütlelerde ve eşit aktiviteli 11 adet standart alfa örneği dört dedektörde de sayılmıştır. Normalize sayım hızları hesaplanarak örnek kütlelerine karşı grafiği çizilmiş ve alfa özsoğurma eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.2- 4.5)



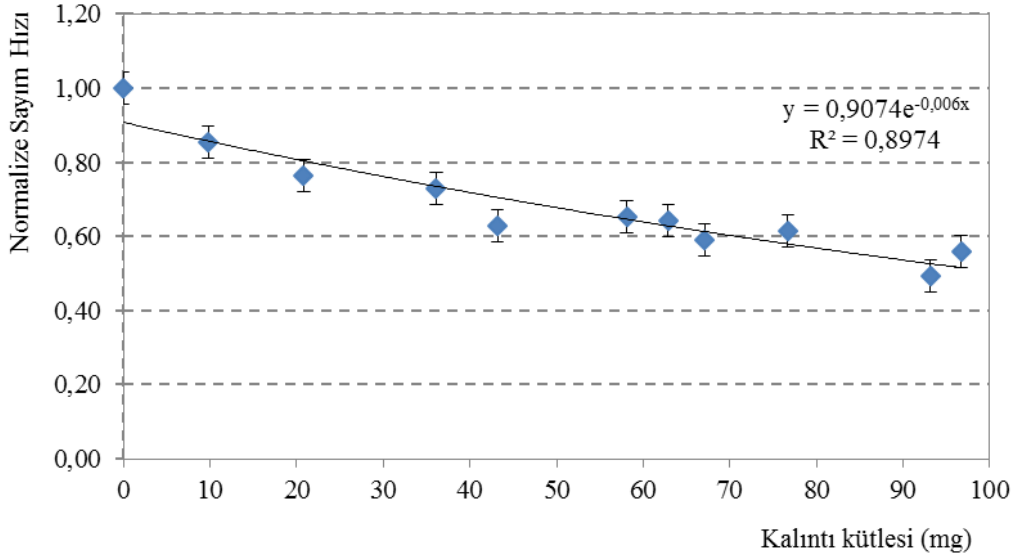
Şekil 4.2 A1 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi



Şekil 4.3 A2 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi



Şekil 4.4 A3 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi

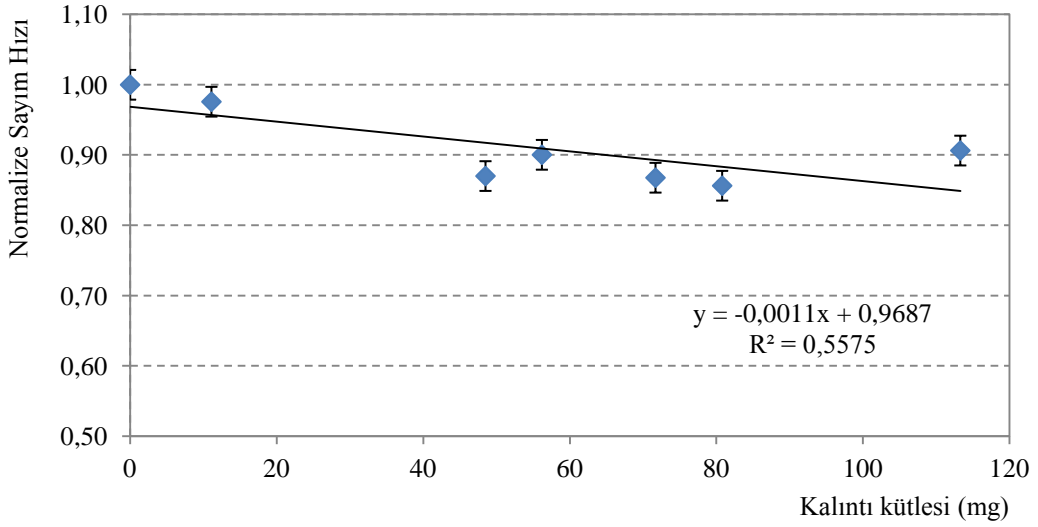


Şekil 4.5 A4 dedektörünün alfa parçacıkları için özsoğurma eğrisi

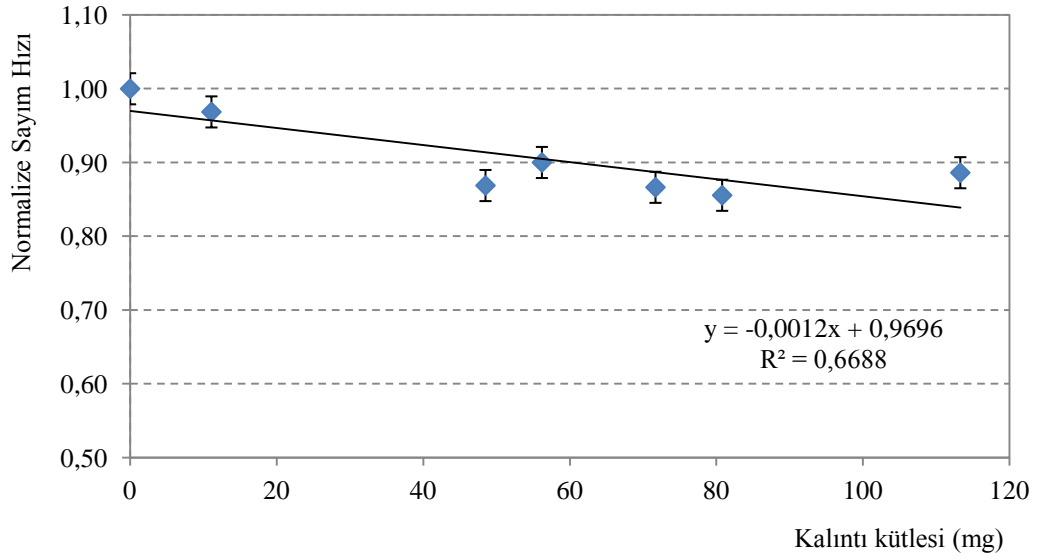
Beta özsoğurma eğrileri için, daha önce hazırlanmış olan 0-120 mg arasındaki kütlelerde ve eşit aktiviteli 8 adet standart beta örneği dört dedektörde de sayılmıştır.



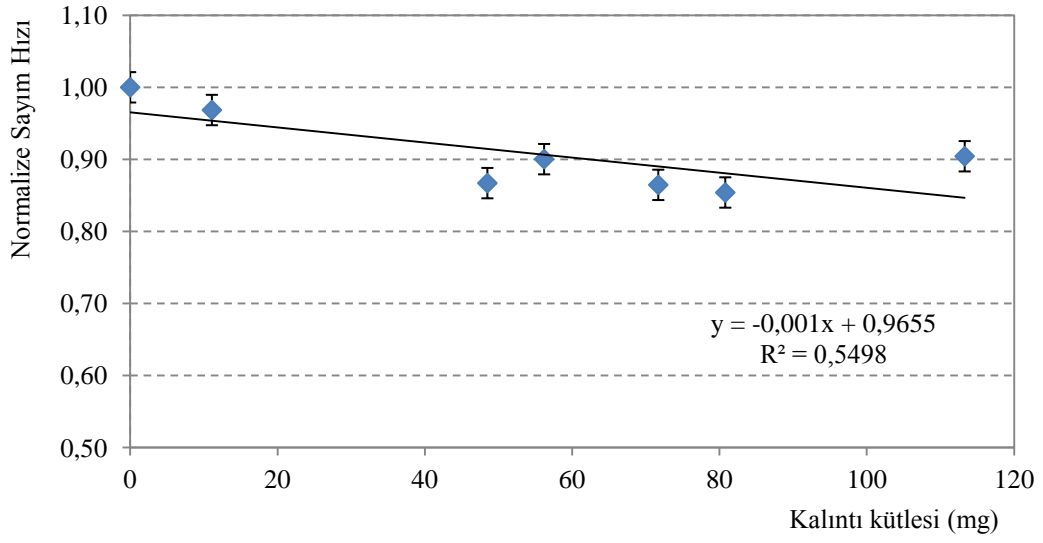
Normalize sayım hızları hesaplanarak örnek kütlelerine karşı grafiği çizilmiş ve beta özsoğurma eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.6- 4.9).



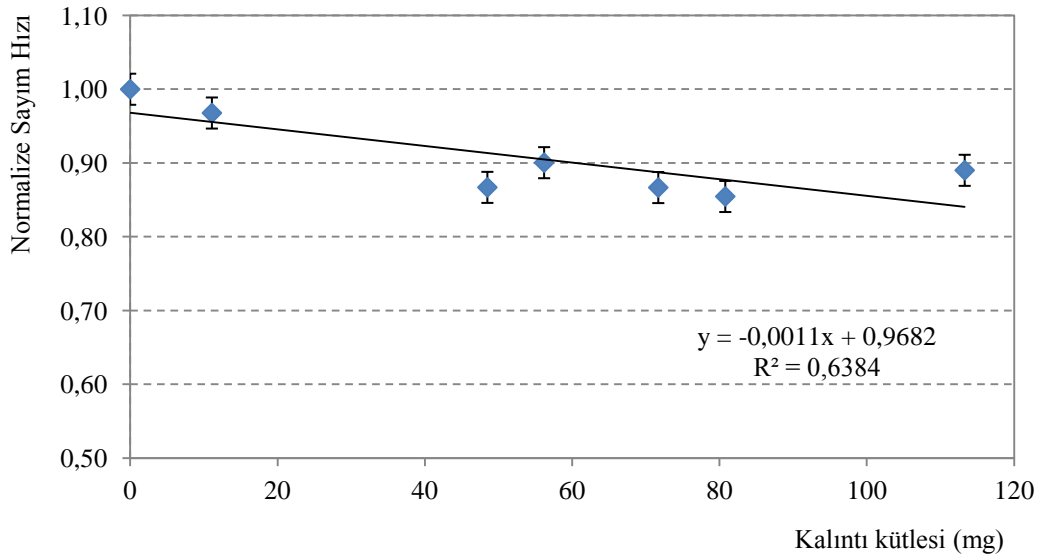
Şekil 4.6 A1 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi



Şekil 4.7 A2 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi



Şekil 4.8 A3 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi



Şekil 4.9 A4 dedektörünün beta parçacıkları için özsoğurma eğrisi

Örnek kütlesi arttıkça normalize sayımdaki azalmayı gösteren özsoğurma eğrileri uygun denkleme fit edilmiş, elde edilen eğri denklemleri her örnek kütlesi için özsoğurma katsayısı (f) hesaplanmıştır. Her örneğin kütlesine özgü olan alfa ve beta özsoğurma faktörleri, alfa ve beta aktivite derişimi hesaplarında kullanılmıştır.

#### 4.1.2 Orantılı Sayaçta Toplam Alfa ve Beta Aktivite Derişimleri

Musluk suyu ve şişe sularından EPA 900 standardına uygun olarak 2 inç'lik planşetlere örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, orantılı sayaçta hem aynı dedektörde hem de farklı dedektörlerde 2-5 defa 1200 dakika süreyle ölçülmüş, alfa ve beta aktivite derişimleri ve belirsizlikleri sırasıyla Eşitlik 3.1, 3.2 ve 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Her örnek için hesaplanan sonuçların ortalaması alınarak ulaşılan toplam alfa ve toplam beta aktivite derişimleri Çizelge 4.4 ve 4.5'de verilmiştir. Ayrıca alfa ve beta için asgari ölçülebilen aktivite aktivite derişimleri (MDC) Eşitlik 3.5'e göre hesaplanmıştır.  $MDC_{\alpha} = 0,066 \text{ Bq/L}$  ve  $MDC_{\beta} = 0,095 \text{ Bq/L}$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 Musluk suyu örneklerinin orantılı sayaç ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri

Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)	Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)
T-1	<MDC <sub>α</sub>	0,873±0,058	T-28	<MDC <sub>α</sub>	0,118±0,006
T-2	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-29	<MDC <sub>α</sub>	0,114±0,006
T-3	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-30	<MDC <sub>α</sub>	0,364±0,019
T-4	<MDC <sub>α</sub>	0,218±0,012	T-31	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-5	<MDC <sub>α</sub>	0,151±0,008	T-32	<MDC <sub>α</sub>	0,394±0,022
T-6	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-33	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-7	<MDC <sub>α</sub>	0,419±0,021	T-34	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-8	<MDC <sub>α</sub>	0,247±0,013	T-35	<MDC <sub>α</sub>	0,653±0,035
T-9	<MDC <sub>α</sub>	0,214±0,012	T-36	<MDC <sub>α</sub>	0,290±0,017
T-10	<MDC <sub>α</sub>	0,460±0,024	T-37	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-11	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-38	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-12	<MDC <sub>α</sub>	0,157±0,008	T-39	<MDC <sub>α</sub>	0,150±0,008
T-13	<MDC <sub>α</sub>	0,133±0,007	T-40	<MDC <sub>α</sub>	0,273±0,016
T-14	<MDC <sub>α</sub>	0,105±0,005	T-41	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-15	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-42	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-16	<MDC <sub>α</sub>	0,140±0,007	T-43	<MDC <sub>α</sub>	0,270±0,015
T-17	<MDC <sub>α</sub>	0,144±0,008	T-44	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-18	<MDC <sub>α</sub>	0,130±0,007	T-45	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-19	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-46	<MDC <sub>α</sub>	0,318±0,018
T-20	<MDC <sub>α</sub>	0,153±0,008	T-47	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-21	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-48	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-22	<MDC <sub>α</sub>	0,350±0,018	T-49	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-23	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-50	<MDC <sub>α</sub>	0,294±0,017
T-24	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-51	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-25	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-52	<MDC <sub>α</sub>	0,269±0,015
T-26	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-53	<MDC <sub>α</sub>	0,199±0,011
T-27	<MDC <sub>α</sub>	0,223±0,013			

$$MDC_{\alpha} = 0,066 \text{ Bq/L} \quad MDC_{\beta} = 0,095 \text{ Bq/L}$$

Çizelge 4.5 Şişe suyu örneklerinin orantılı sayaç ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri

Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)	Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)
B-1	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-20	<MDC <sub>α</sub>	0,251±0,014
B-2	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-21	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-3	<MDC <sub>α</sub>	0,509±0,027	B-22	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-4	<MDC <sub>α</sub>	0,244±0,014	B-24	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-5	<MDC <sub>α</sub>	0,223±0,013	B-25	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-6	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-26	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-7	<MDC <sub>α</sub>	0,204±0,012	B-27	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-8	<MDC <sub>α</sub>	0,372±0,021	B-28	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-9	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-29	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-10	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-30	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-11	<MDC <sub>α</sub>	0,163±0,009	B-31	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-12	<MDC <sub>α</sub>	0,396±0,023	B-32	<MDC <sub>α</sub>	0,119±0,007
B-13	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-34	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-14	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-35	<MDC <sub>α</sub>	0,137±0,008
B-15	<MDC <sub>α</sub>	0,550±0,029	B-36	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-16	<MDC <sub>α</sub>	0,233±0,013	B-37	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-17	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-38	<MDC <sub>α</sub>	0,131±0,011
B-18	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-39	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-19	<MDC <sub>α</sub>	0,355±0,019	B-40	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>

$$MDC_{\alpha} = 0,066 \text{ Bq/L} \quad MDC_{\beta} = 0,095 \text{ Bq/L}$$

## 4.2 Sıvı Sintilasyon Sayacı ile Elde Edilen Bulgular

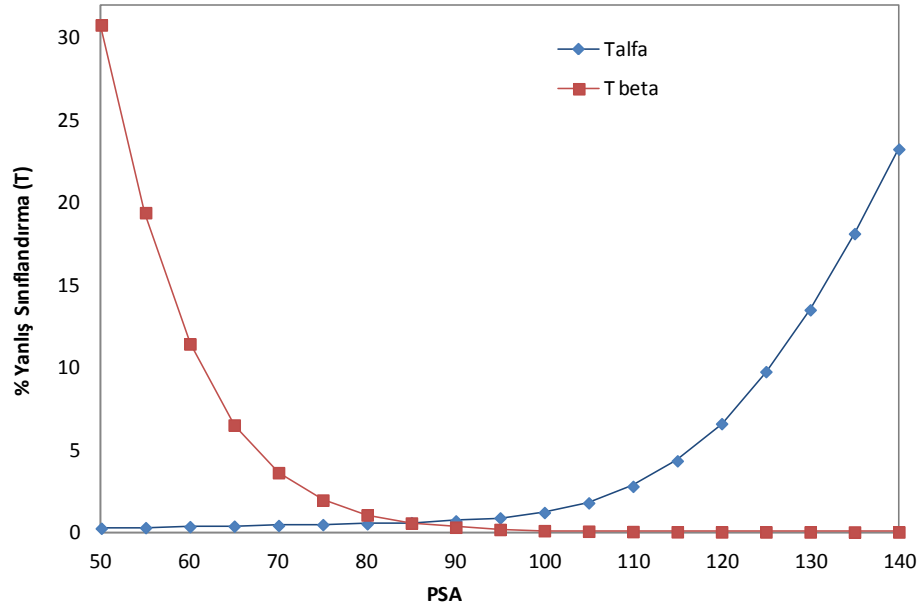
Sıvı sintilasyon sayacında toplam alfa ve beta analizi için gerekli kalibrasyonlar yapıldıktan sonra ASTM D7283-06 standart metoduna göre hazırlanmış su örnekleri sayılarak aktivite derişimleri hesaplanmıştır.

### 4.2.1 LSC Kalibrasyonları

Sıvı sintilasyon sayacında toplam alfa ve beta analizinden önce yapılması gereken PSA, verim ve sönümlleme etkisi kalibrasyonları yapılmıştır.

#### 4.2.1.1 PSA (Puls Şekil Analizi) Kalibrasyonu

LSC’de optimum alfa ve beta puls ayırımı yapabilmek için PSA (Puls Şekil Analizi) tekniği kullanılmıştır. PSA kalibrasyonu için ASTM D7283-06 standardına uygun olarak hazırlanmış olan, her biri yaklaşık 200 Bq aktiviteli saf alfa ( $^{241}\text{Am}$ ) ve saf beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) yayınlı radyonüklit içeren iki adet standart örnek kullanılmıştır. PSA 50’den başlayarak 5’er birim arttırılmış ve 140 değerine kadar standart örnekler sayılmıştır. Her 5 birimlik artış için elde edilen spektrumlar değerlendirilmiştir. Alfa spektrumları LSC’nin 12 nolu penceresinde 400-900 kanallar arasında, beta spektrumları da 11 nolu penceresinde 5-1023 kanallar arasında değerlendirilmiştir. Alfa’nın beta olarak yanlış sınıflandırması ( $\%T_{\alpha}$ ) ve beta’nın alfa olarak yanlış sınıflandırması ( $\%T_{\beta}$ ) Eşitlik 3.5 ve 3.6 ile hesaplanmış ve PSA değerlerine karşı grafiği çizilmiştir (Şekil 4.10.).

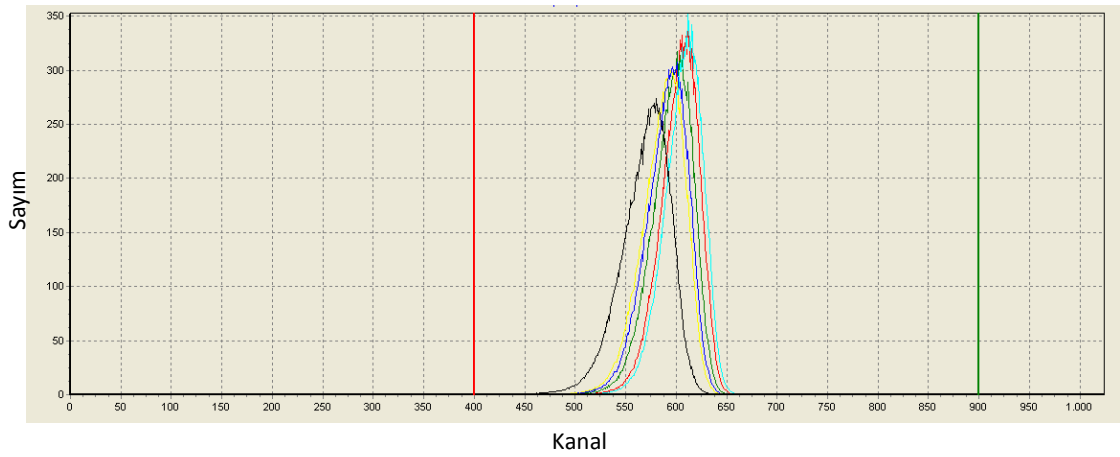


Şekil 4.10 Sıvı Sintilasyon Sayım Sisteminin PSA kalibrasyonu eğrisi

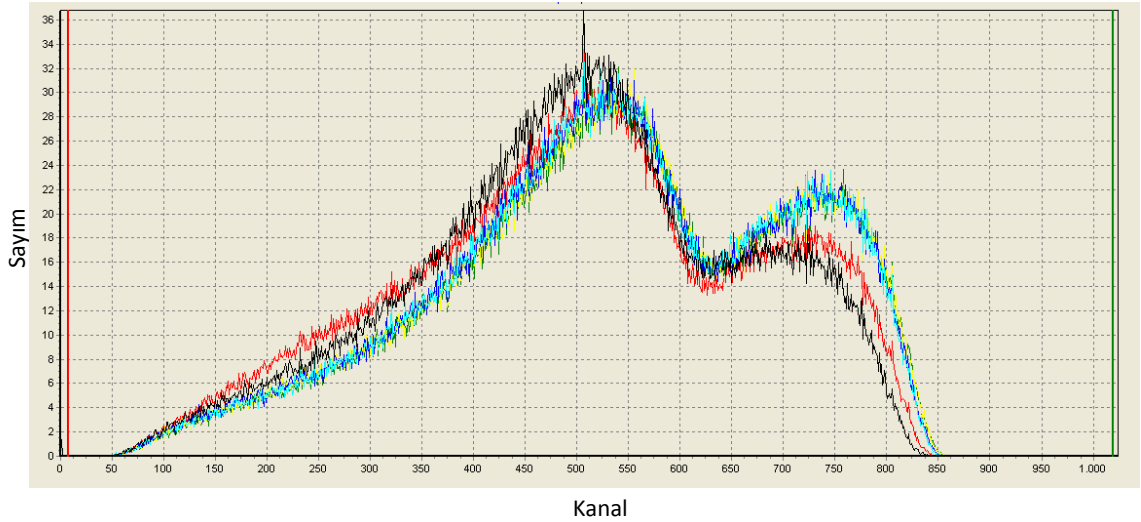
Şekil 4.10’da  $T_{\alpha}(\%)$  ve  $T_{\beta}(\%)$  değerlerinin kesiştiği 85 PSA değeri optimum çakışma (Crossover) noktası değeri olarak belirlenmiş ve toplam alfa ve beta sayımlarında kullanılmıştır.

#### 4.2.1.2 Verim ve Sönümlenme Etkisinin Belirlenmesi

ASTM D7283-06 standardına göre alfa, beta ve boş matris setler farklı miktarlarda musluk suyu kullanılarak, 20 ml'lik cam viallerde hazırlanmıştır. Alfa standart seti, beta standart seti ve aktivitesiz su (boş) matris seti, PSA=85'de 45'er dakika sayıldıktan sonra spektrum analizi yapılmıştır. Alfa standart ve beta standart setlerinin Sıvı Sintilasyon Sayım Sisteminden alınan spektrumları Şekil 4.10 ve 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen alfa yayınlayıcı  $^{241}\text{Am}$  radyonüklitlerinin spektrumlarında sönümlenmenin etkisi

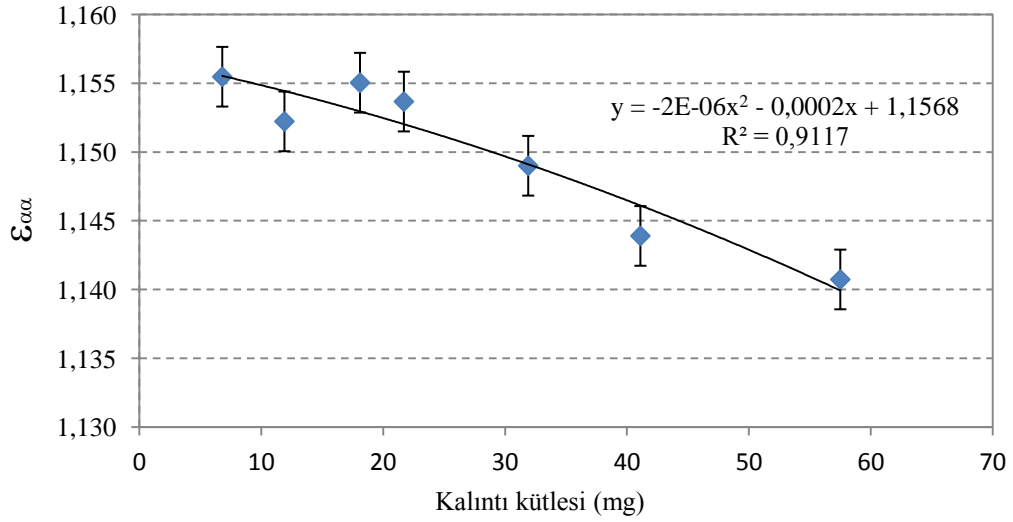


Şekil 4.12 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen beta yayınlayıcı  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  radyonüklitlerinin spektrumlarında sönümlenmenin etkisi

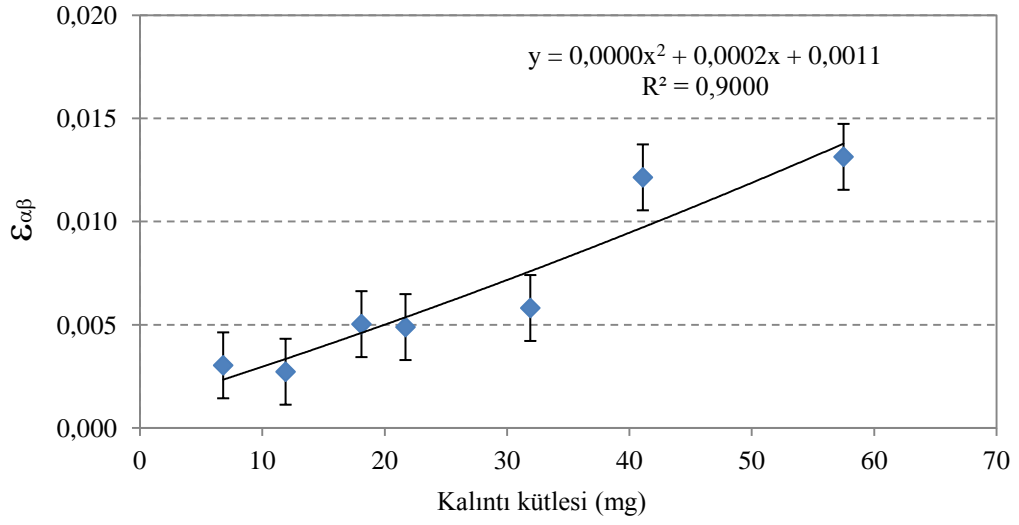
Şekil 4.11 ve 4.12’de kalıntı kütlesinin değişimi ile sönümlenmenin etkisi gözlenmiştir. Kalıntı kütlesi arttıkça enerji ve sayım değerlerinden kayıplar olmuş ve spektrum sola kaymıştır. Bu da verim kaybına sebep olmuştur.

Farklı kalıntı kütlelerindeki alfa ve beta standart setlerinin (Şekil 4.11 ve 4.12) ve boş matris setin spektrumlarından sayım hızı değerleri alınmış, Eşitlik 3.7-10 kullanılarak dedeksiyon verimi,  $\epsilon_{\alpha\alpha}$ ,  $\epsilon_{\alpha\beta}$ ,  $\epsilon_{\beta\beta}$  ve  $\epsilon_{\beta\alpha}$  hesaplanmıştır.

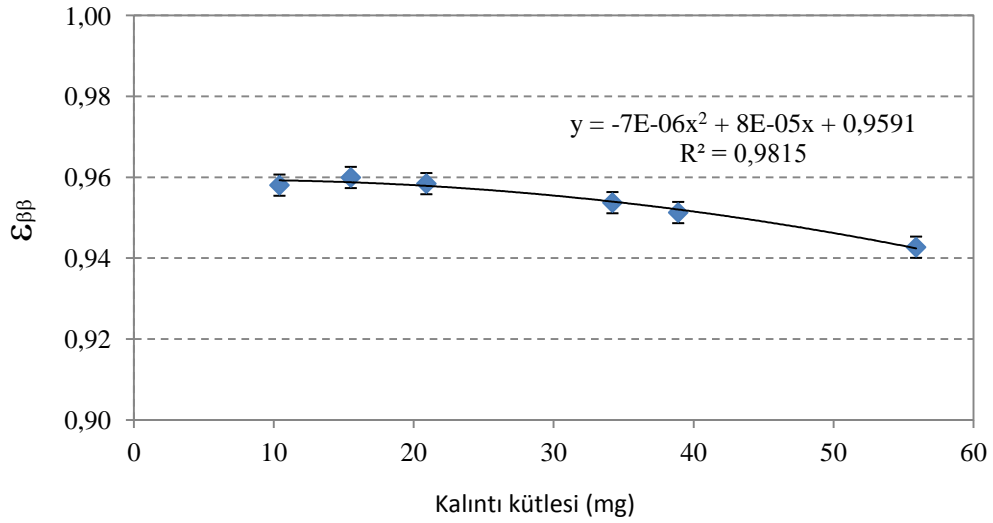
Alfa ve beta verim sonuçlarının kalıntı kütlesine karşı eğrisi çizilerek, fit edilmiştir (Şekil 4.13-15).



Şekil 4.13 Alfa parçacıklarının alfa ROI’indeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütlesine bağlı değişimi

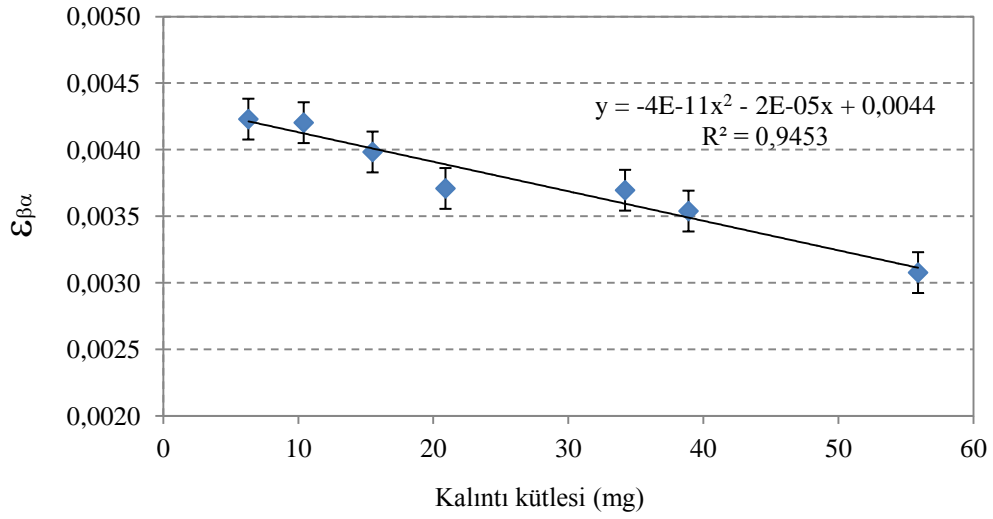


Şekil 4.14 Alfa parçacıklarının beta ROI’indeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütlesine bağlı değişimi



Şekil 4.15 Beta parçacıklarının beta ROI’indeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütlesine bağlı değişimi





Şekil 4.16 Beta parçacıklarının alfa ROI'indeki dedeksiyon veriminin kalıntı kütlesine bağlı değişimi

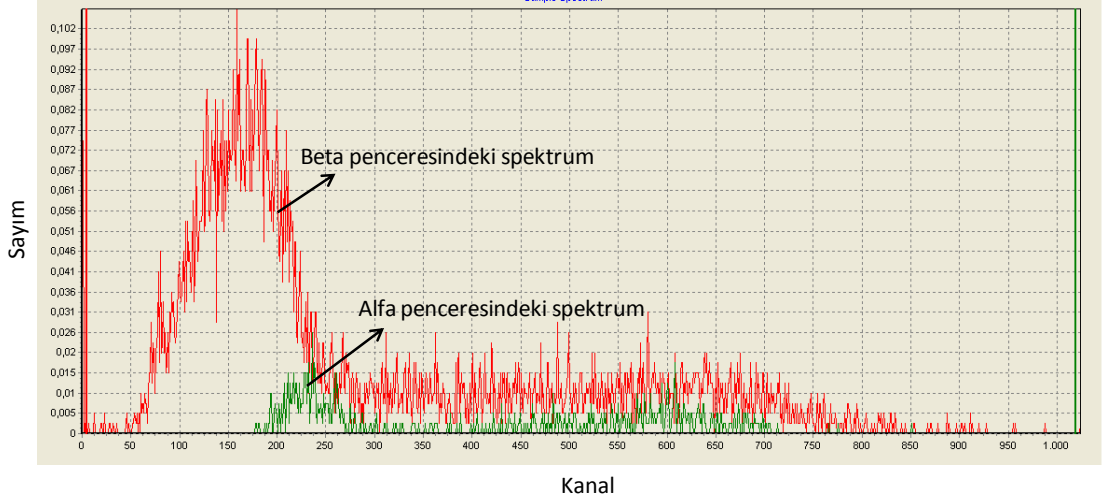
Şekil 4.13-16'da her verim eğrisi için elde edilen denklemler ve regresyon katsayısı ( $R^2$ ) değerleri grafikler üzerinde verilmiştir. Her örnek kütlesine karşılık gelen verim değerleri bu denklemler yardımı ile hesaplanmış ve aktivite derişimi hesabında kullanılmıştır.

Numune sönümlemesi nedeniyle taşma (spill) etkisinin düzeltilmesi için Eşitlik 3.11-14 kullanılmıştır. Her örnek için kalıntı kütlesine bağlı olarak % girişim değerleri hesaplanmış ve aktivite derişimi hesabında kullanılmıştır.

#### 4.2.2 LSC'de Toplam Alfa ve Beta Aktivite Derişimleri

Quantulus 1220 LSC'de ölçülmek üzere, ASTM D7283-06 göre hazırlanan su örnekleri standart alfa ve beta örnekleri ve doğal fon örneği ile birlikte 2-5 defa 400'er dakika sayılmıştır.

Sıvı sintilasyon sayım sisteminde sayılmak üzere hazırlanan 35 numaralı musluk suyu örneğine ait spektrum Şekil 4.17'de verilmiştir. Diğer su örnekleri için de benzer spektrumlar elde edilmiştir.



Şekil 4.17 Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi kullanılarak elde edilen 35 numaralı musluk suyuna ait alfa ve beta pencerelerindeki spektrumlar

Sıvı sintilasyon sayım sisteminde sayılan her örnekteki alfa spektrumları LSC'nin 12 nolu penceresinde 400-900 kanallar arasında, beta spektrumları da LSC'nin 11 nolu penceresinde 250-1023 kanallar arasında değerlendirilmiştir (Şekil 4.16). Elde edilen spektrumlar değerlendirildikten sonra sırasıyla Eşitlik 3.15-3.27 kullanılarak toplam alfa ve beta için aktivite derişimleri belirsizlikleriyle beraber hesaplanmıştır. Her örnek için hesaplanan sonuçların ortalaması alınarak ulaşılan toplam alfa ve toplam beta aktivite derişimleri Çizelge 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Ayrıca sistemin asgari ölçebileceği alfa ve beta aktivite derişimleri ( $MDC_{\alpha}$ ,  $MDC_{\beta}$ ) de Eşitlik 3.28 ve 3.29 kullanılarak hesaplanmıştır.  $MDC_{\alpha} = 0,018$  Bq/L ve  $MDC_{\beta} = 0,086$  Bq/L olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.6 Musluk suyu örneklerinin LSC ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri

Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)	Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)
T-1	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-28	<MDC <sub>α</sub>	0,096±0,066
T-2	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-29	<MDC <sub>α</sub>	0,107±0,109
T-3	<MDC <sub>α</sub>	0,091±0,068	T-30	<MDC <sub>α</sub>	0,114±0,095
T-4	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-31	<MDC <sub>α</sub>	0,133±0,021
T-5	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-32	<MDC <sub>α</sub>	0,100±0,021
T-6	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-33	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-7	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-34	<MDC <sub>α</sub>	0,111±0,021
T-8	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-35	0,084±0,007	0,131±0,021
T-9	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-36	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-10	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-37	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-11	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-38	<MDC <sub>α</sub>	0,125±0,021
T-12	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-39	<MDC <sub>α</sub>	0,106±0,021
T-13	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-40	<MDC <sub>α</sub>	0,091±0,021
T-14	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-41	<MDC <sub>α</sub>	0,095±0,021
T-15	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-42	<MDC <sub>α</sub>	0,093±0,021
T-16	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-43	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-17	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-44	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-18	<MDC <sub>α</sub>	0,108±0,106	T-45	<MDC <sub>α</sub>	0,096±0,021
T-19	<MDC <sub>α</sub>	0,162±0,089	T-46	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-20	<MDC <sub>α</sub>	0,131±0,089	T-47	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-21	<MDC <sub>α</sub>	0,128±0,164	T-48	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-22	<MDC <sub>α</sub>	0,132±0,037	T-49	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-23	<MDC <sub>α</sub>	0,173±0,022	T-50	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-24	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-51	0,036±0,005	<MDC <sub>β</sub>
T-25	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-52	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
T-26	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	T-53	0,057±0,006	0,089±0,021
T-27	<MDC <sub>α</sub>	0,120±0,055			

MDC<sub>α</sub>=0,018Bq/L

MDC<sub>β</sub>=0,086Bq/L

Çizelge 4.7 Şişe suyu örneklerinin LSC ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri

Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)	Örnek No	Toplam Alfa Aktivite Derişimi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivite Derişimi (Bq/L)
B-1	0,021±0,032	<MDC <sub>β</sub>	B-20	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-2	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-21	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-3	0,025±0,003	0,112±0,026	B-22	0,081±0,007	0,106±0,021
B-4	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-24	0,064±0,008	0,184±0,022
B-5	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-25	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-6	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-26	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-7	0,042±0,462	<MDC <sub>β</sub>	B-27	0,031±0,012	<MDC <sub>β</sub>
B-8	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-28	0,024±0,020	<MDC <sub>β</sub>
B-9	<MDC <sub>α</sub>	0,121±0,026	B-29	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-10	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-30	0,075±0,007	0,136±0,027
B-11	0,035±0,006	<MDC <sub>β</sub>	B-31	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-12	<MDC <sub>α</sub>	0,246±0,023	B-33	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-13	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-34	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-14	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-35	0,027±0,023	<MDC <sub>β</sub>
B-15	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-36	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-16	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-37	0,025±0,042	<MDC <sub>β</sub>
B-17	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-38	0,053±0,009	<MDC <sub>β</sub>
B-18	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-39	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
B-19	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>	B-40	<MDC <sub>α</sub>	<MDC <sub>β</sub>
				<b>MDC<sub>α</sub>=0,018 Bq/L</b>	<b>MDC<sub>β</sub>=0,086 Bq/L</b>

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

İçme suları ve gıdalarla birlikte vücudumuza aldığımız doğal radyonüklitler sebebiyle her zaman bir iç ışınlanma riski vardır. Rutin çevresel radyoaktivite izlemeleri için içme suyu örneklerinde radyoaktivite ölçümlerinin yapılması da bu nedenle önem arz eder. Avrupa Birliği tarafından tarama seviyesi olarak toplam alfa aktivitesi için 0,1 Bq/L ve toplam beta aktivitesi için 1 Bq/L olarak sınır değerler belirlenmiştir. Bu değerler, Ulusal mevzuatımız 25730 Sayılı **İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte** de aynı şekilde uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, içme sularındaki alfa ve beta radyoaktivite içeriği nedeniyle oluşabilecek iç ışınlanma radyasyon dozunun değerlendirilmesine temel alınacak, toplam alfa ve toplam beta aktivitelerinin ölçülmesi için iki farklı tekniğin uygulanması amaçlanmıştır. Toplam alfa ve beta radyoaktivite ölçümünde geleneksel olarak kullanılmakta olan P-10 (% 90Ar + %10 CH<sub>4</sub>) gaz akışlı Orantılı Sayaç (PC) tekniği ve son teknolojik gelişmelerle birlikte son yıllarda yaygınlaşan Sıvı Sintilasyon Sayım (LSC) tekniği kullanılmıştır. Orantılı sayaç tekniğinde “EPA 900 İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Aktivitesi Tayini Standart Test Metodu” ile, LSC tekniğinde ise “ASTM D7283-06 Sıvı Sintilasyon Sistemi ile Sularda Alfa ve Beta Aktivitesi için Standart Test Metodu” ile numuneler hazırlanmıştır. Bu prosedürlere uygun olarak hazırlanan özdeş numunelerin ölçümleri her iki teknik ile de yapılarak, aktivite derişimleri (Bq/L) belirlenmiştir.

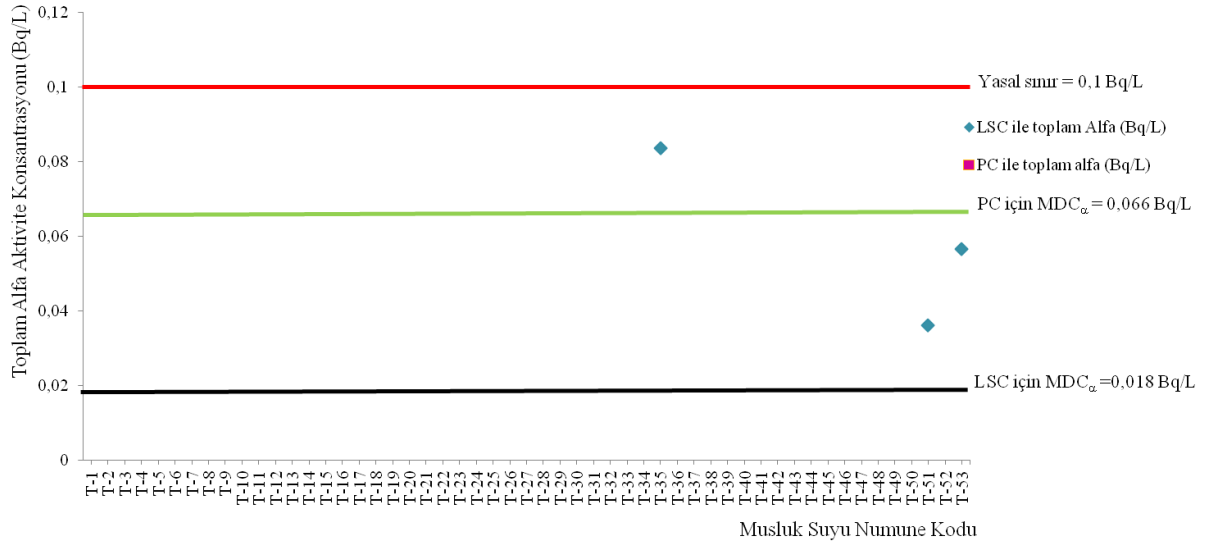
Gaz akışlı orantılı sayaç ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri ve asgari ölçülebilen derişim (MDC) değerleri, Ankara ilinden toplanan musluk suyu örnekleri için Çizelge 4.4’de, şişe suyu örnekleri için de Çizelge 4.5’de verilmiştir. Gaz akışlı orantılı sayaç tekniği ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişim değerleri, Ulusal mevzuatımızın müsaade ettiği sınır değerlerinin altındadır. Gaz orantılı sayaç ile elde edilebilen toplam alfa radyoaktivitesi için  $MDC_{\alpha}=0,066$  Bq/L’dir ve bu 0,1 Bq/L’lik sınır değerinin 1,5 kat altında ölçülmüştür. Toplam beta radyoaktivitesi için  $MDC_{\beta}= 0,095$  Bq/L’dir ve bu 1 Bq/L’lik sınır değerinin 10,5 kat altındadır. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi, her iki örnek grubunda (musluk suyu ve şişe suyu) da toplam alfa aktivite derişimleri  $MDC_{\alpha}$ ’nin altındadır. Toplam beta aktivite derişimlerinin en yüksek

değeri ise musluk suyu örneklerinde  $0,873\pm 0,058$  Bq/L (T-1), şişe suyu örneklerinde  $0,509\pm 0,027$  Bq/L (B-3) bulunmuştur. Ancak yine de sınır değerlerin altındadır.

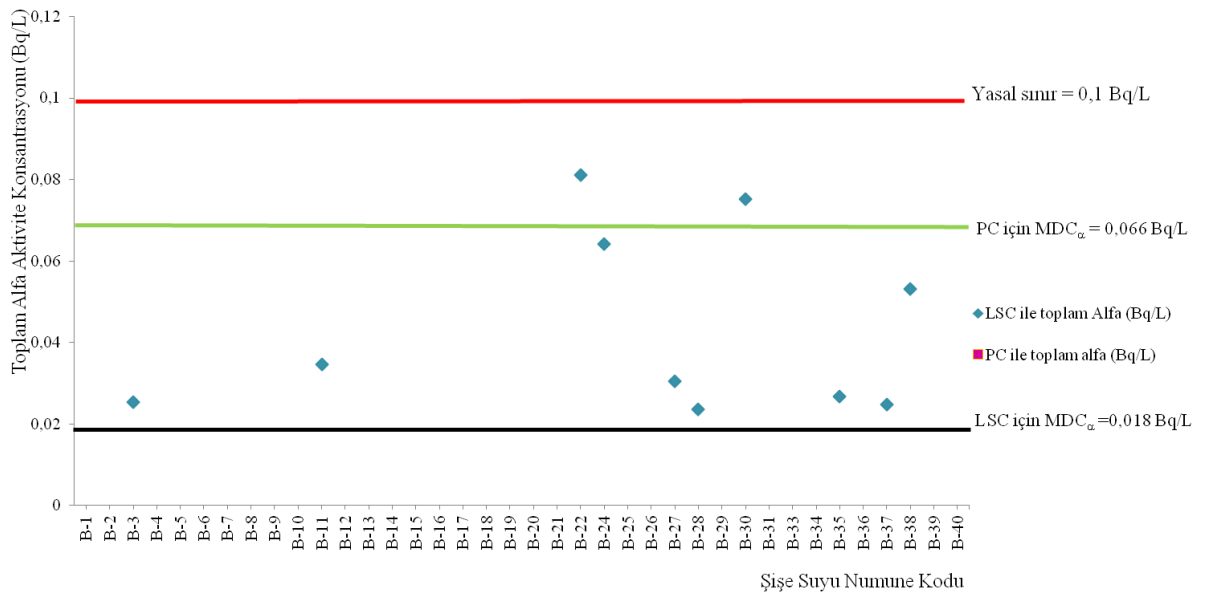
LSC ile belirlenen toplam alfa ve beta aktivite derişimleri ve asgari ölçülebilen derişim (MDC) değerleri, Ankara ilinden toplanan musluk suyu örnekleri için Çizelge 4.6'da, şişe suyu örnekleri için de Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu çizelgeler incelendiğinde, Ulusal mevzuatımızın müsaade ettiği değerlerin üzerinde bir aktivite derişimine rastlanmamıştır. LSC ile elde edilebilen  $MDC_{\alpha}=0,018$  Bq/L, ve  $MDC_{\beta}=0,086$  Bq/L olarak bulunmuştur. LSC sisteminde toplam alfa radyoaktivitesi için verilen  $0,1$  Bq/L sınır değerinin  $5,5$  kat daha altında bir MDC değeri elde edilmiştir. Toplam beta radyoaktivitesi için verilen  $1$  Bq/L sınır değerinin  $11,6$  kat daha altında bir MDC değeri elde edilmiştir. Alfa radyoaktivitesi ölçümü açısından LSC tekniğinin, orantılı gaz sayaç tekniğinden yaklaşık  $4$  kat daha düşük aktivite düzeylerinin ölçülmesine imkân veren bir hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi, her iki örnek grubunda da toplam alfa aktivite derişimlerinden sadece birkaç tanesi MDC'nin üstünde ölçülmüştür. Ankara ili musluk suyu örneklerinde, en yüksek alfa aktivite derişimi  $0,084\pm 0,007$  Bq/L (T-35), şişe suyu örneklerinde ise  $0,081\pm 0,007$  Bq/L (B-22) bulunmuştur. Musluk suyu örneklerinde, toplam beta aktivite derişimlerinin en yüksek değeri ise  $0,173\pm 0,022$  Bq/L (T-23), şişe suyu örneklerinde  $0,246\pm 0,023$  Bq/L (B-12) bulunmuştur. Bu sonuçlar tüm incelenen su örneklerinde herhangi bir anormallik bulunmadığını göstermiştir.

Gaz akışlı orantılı sayaç (PC) ile düşük seviye sıvı sintilasyon (LSC) tekniklerinin karşılaştırılması bağlamında, musluk suyu ve şişe suyu numunelerinde ölçülen toplam alfa aktivite değerleri sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 T kodlu Ankara ili musluk suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam alfa aktivite derişimleri.

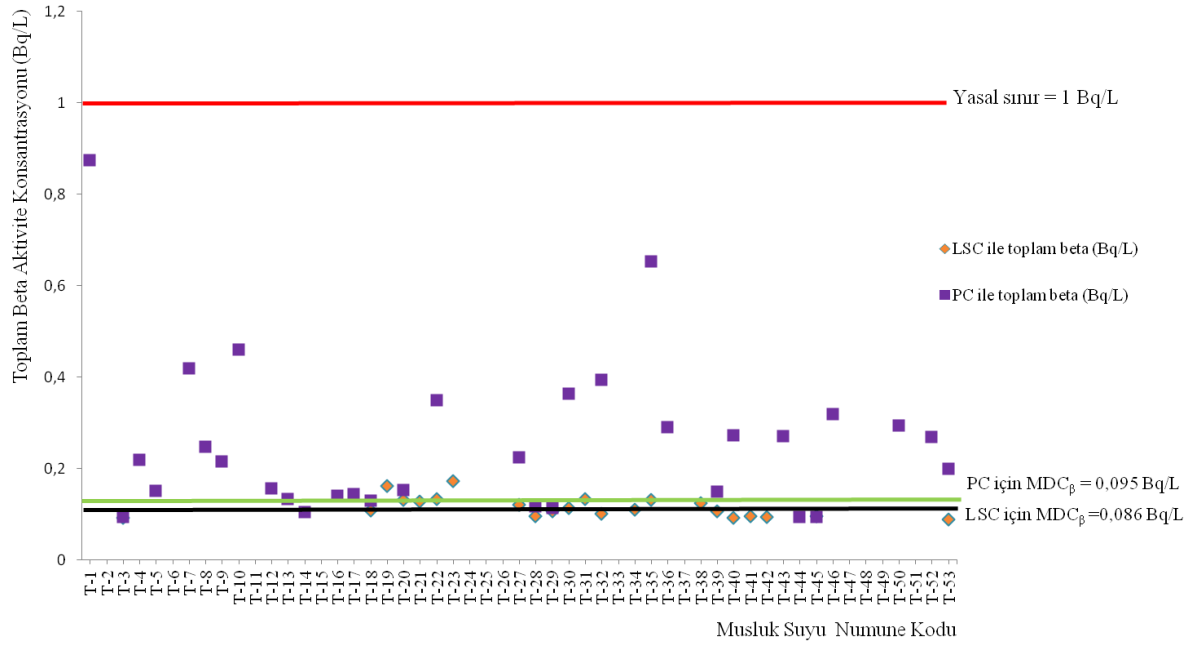


Şekil 5.2 B Kodlu ticari şişe suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam alfa aktivite derişimleri.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görüldüğü gibi hem gaz akışlı orantılı sayaç hem de sıvı sintilasyon sayacı teknikleri ile elde edilen toplam alfa aktivite derişimleri musluk suyu ve şişe suyu örnekleri için ulusal mevzuatımızda yer alan 0,1 Bq/L sınır değerinin altındadır. LSC tekniği ile elde edilen  $MDC_{\alpha} = 0,018$  Bq/L değeri, orantılı sayaç tekniği

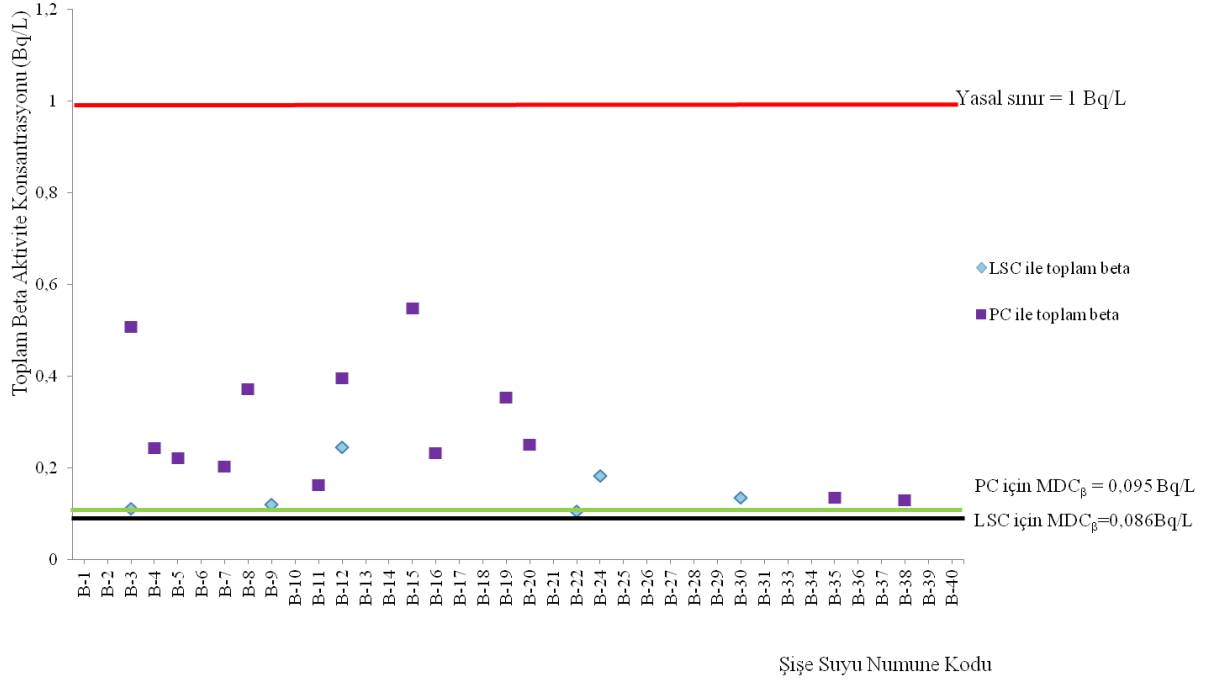
ile elde edilen  $MDC_{\alpha} = 0,066$  Bq/L değerden yaklaşık 3 kat daha düşüktür. Bu sonuç LSC tekniğinin sulara toplam alfa aktivite tayininde daha hassas olduğunu göstermektedir.  $MDC_{\alpha}$  değeri, LSC tekniği ile yapılan ölçümlerde, vial kullanılarak yüksek alfa verimi (yaklaşık  $4\pi$  geometri ve enerjinin tamamen soğurulması) ve düşük alfa doğal fon sayım hızı (sadece vial yapısından kaynaklanabilir) nedeni ile orantılı sayaçta elde edilen  $MDC_{\alpha}$  değerinden daha düşük bulunmuştur.

Gaz akışlı orantılı sayaç (PC) ile düşük seviye sıvı sintilasyon (LSC) tekniklerinin karşılaştırılması bağlamında, musluk suyu ve şişe suyu numunelerinde ölçülen toplam beta aktivite değerleri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 T kodlu Ankara ili musluk suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam beta aktivite derişimleri.





Şekil 5.4 B Kodlu ticari şişe suyu örneklerinin LSC ve PC ile belirlenen toplam beta aktivite derişimleri.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görüldüğü gibi hem gaz akışlı orantılı sayaç hem de sıvı sintilasyon sayacı teknikleri ile elde edilen toplam beta aktivite derişimleri musluk suyu ve şişe suyu örnekleri için Ulusal mevzuatımızda yer alan 1 Bq/L sınır değerinin altında bulunmuştur. LSC tekniği ile elde edilen  $MDC_{\beta}=0,086$  Bq/L, orantılı sayaç tekniği ile elde edilen  $MDC_{\beta}=0,095$  Bq/L değerine yakın bulunmuştur.

$MDC_{\beta}$  üzerinde ölçülen beta aktivite derişimleri incelendiğinde, Ankara ili şehir şebekesinden alınan musluk sularından LSC’de elde edilen değerler 0,089 Bq/L ile 0,173 Bq/L aralığında, daha uyumlu bir dağılım göstermektedir. Ancak, aynı numunelerin orantılı sayaç ile yapılan ölçümlerinde 0,105 Bq/L ile 0,873 Bq/L aralığında hem daha yüksek hem de daha rastgele bir dağılım gösterdikleri tespit edilmiştir. Bunun nedeni orantılı sayaçta ölçüm esnasında (1200 dk süreyle) hem kozmik radyasyon nedeniyle beta doğal fonunun nispeten değişmiş olması hem de sistemin yapısından kaynaklanan değişiklikler olabilir. Örneğin P-10 gazının kalitesinden kaynaklı gaz çoğalma faktöründeki ufak derişimler ve beklenmeyen sahte pulsler meydana gelmesidir (Knoll 2000). Ayrıca alfa aktivite ölçümünde olduğu gibi,

toplam beta aktivite derişimlerinin tayininde de LSC tekniğinin tekrarlanabilirliğinin daha iyi olduğu gözlenmiştir.

MDC değeri, verim, sayım süresi, doğal fon sayım süresi, doğal fon sayım hızı değerlerine bağlıdır (Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.28-29). Düşük seviye LSC ve gaz akışlı orantılı sayaç (PC) tekniğinde elde edilen alfa verimi, doğal fon sayım hızları ve MDC değerlerinin karşılaştırması Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 LSC ve PC tekniklerinin uygulanması için kullanılan mevcut sayım sistemlerine ait bazı parametreler.

Parametre	Düşük seviye LSC tekniği	Gaz akışlı PC tekniği	Karşılaştırma Kriteri, % fark
Alfa doğal fon sayım hızı (cpm)	0,16	0,2	-20
Beta doğal fon sayım hızı (cpm)	4,50*	2,1	+114
Alfa verimi(%)	100	29	+245
Beta verimi(%)	85	40	+113
MDC <sub>α</sub> (Bq/L)	0,018	0,066	-73
MDC <sub>β</sub> (Bq/L)	0,086	0,095	-9,5

\*Cam vial ile kozmik ışınların etkileşmesi sonucu, Cherenkov radyasyonu, ikincil elektronlar ve numune içinde bremsstrahlung (elektromanyetik) radyasyonu üretilmesi, vial duvarında veya kapağındaki doğal radyoaktivite, PMT’den ve zırhlamasından (pasif) ileri gelen ya da sıvı sintilasyon kokteylinden kaynaklanan beta doğal fon hızı (Cook 1996).

Elde edilen deneysel bulgulara göre LSC tekniğinin üstünlükleri ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Numune hazırlama prosedürü daha basit ve kolaydır. Örnek vial içerisinde sıvı fazda hazırlandığı için homojen yüzey gerektirmez. Ancak sintilasyon kokteyli ile karıştırıldığında homojen ve berrak bir çözelti elde edilmesi gereklidir.
- Numunede toplam çözünen katılar sebebiyle bir özsoğurma olmaz. Ancak, buna karşılık kalıntı kütesine bağlı ışık foton sayısını etkileyen sönümlenme etkisi olabilir.
- Numune, iki PMT veya üç PMT kullanılarak sayım yapılabildiğinden hemen hemen 4π sayım geometrisi mevcuttur. Bunun sonucunda hem alfa hem de beta için yüksek dedeksiyon verimi elde edilir.

- Hem alfa hem beta aktivitesi için daha düşük MDC değerlerine ulaşılır.
- Çok sayıda (örneğin Quantulus 1220 cihazı için aynı magazinde, 60 adet numune yerleştirilebilir) numuneyi, otomatik asansör yardımıyla arka arkaya sayma ve sayımı tekrarlama imkanı vardır. Uygulamada, ciddi zaman tasarrufu sağlar.
- LSC tekniğinin en önemli dezavantajı pahalı bir sistem olması ve sarf malzemelerinin (vial, kokteyl, vb) yurtdışından ithal edilmesidir.
- Her geometrideki ( 7ml, 20ml vial) numune için kalibrasyon kaynağı gereklidir ve bu kaynaklar yurtdışından temin edilmektedir.

Orantılı sayaç (PC) tekniğinin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Numune hazırlama prosedürü kolay ve basit olmasına rağmen, planşette homojen bir yüzey elde edilebilmesi gerektiği için numune hazırlama zahmetli ve uzun sürelidir.
- Numune kalıntı kütesine bağlı olarak özellikle alfalarda öz soğurma artar.
- Numuneler, higroskopik olabilmeleri nedeni ile nem kapmasının engellenmesi için desikatörde bekletilmez.
- Numune yaklaşık  $2\pi$  sayım geometrisi ile sayılır. Hem alfa hem de beta için dedeksiyon verimi düşüktür (Çizelge 5.1).
- Numune kalıntı miktarının az tutulması zorunluluğu ve verimin düşük olması çok uzun sayım süresi uygulamaları hariç, düşük dedeksiyon sınırları elde edilmesini zorlaştırır.
- Gazın kalitesi ölçüm sonuçlarını etkiler. Her gaz değişiminde cihaz kalibrasyonlarının tekrarlanması gereklidir.

- Sınırlı sayıda (örneğin, Canberra LB4100 cihazı için aynı kasada, 4 adet numune yerleştirilebilir) numuneyi, her defasında elle değiştirilip, bilgileri girildikten sonra arka arkaya saymak mümkündür. Numuneler, dedektörlerde yeri değiştirilerek de tekrarlama imkanı vardır. Uygulamada, ciddi zaman kaybına neden olur.
- Sarf malzeme (en fazla P-10 gazı ve tek kullanımlık planşet vb.) ve cihaz maliyeti LSC'ye kıyasla daha düşüktür.

Bu tez çalışması, toplam alfa ve beta tayininde LSC tekniği ile orantılı sayaç tekniğini toplam 91 adet içme suyu örneğinde karşılaştırmıştır. LSC tekniğinde numune hazırlama sürecinin daha hızlı ve basit olması, örnekte özsoğurma olmaması, yaklaşık  $4\pi$  sayım geometrisinde ölçüm imkanıyla yüksek sintilasyon veriminin elde edilebilir olması nedeniyle, nispeten daha kısa sayım süresinde yüksek sayım istatistiği vermesi sonucu kesinliği ve doğruluğu daha yüksek olması, tekrarlanabilir sonuçların daha güvenilir, asgari ölçülebilir aktivite değeri daha düşük olduğu için özellikle alfa sayımında yüksek hassasiyetli olması, gaz akışlı orantılı sayaç (PC) tekniğine göre üstünlükleri olarak değerlendirilmiştir. Ankara ili içme sularının ve şişe sularının ölçülen toplam alfa ve beta aktiviteleri açısından limitlerin altında olması nedeniyle radyolojik doz değerlendirmesi bakımından bir risk içermediği söylenebilir. Ancak bunun her zaman devam ettiğinin söylenebilmesi için periyodik olarak Ankara ili şebeke suyu ve ticari şişe sularının izlenmesi gerektiği yasal bir zorunluluktur. Bu tez çalışması, bu yasal izleme sürecinde daha kesin ve doğru sonuç vermesi nedeniyle güvenilir şekilde LSC tekniğinin uygulanabileceğini göstermektedir.

Ülkemizde toplam alfa ve beta radyoaktivite analizinde, halihazırda orantılı sayaç tekniği kullanılmasına rağmen, LSC tekniği kullanılarak yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışması ile LSC tekniğinin farklı su örneklerinde (maden suyu, yer altı suları, deniz, göl ve nehir suyu vb) toplam alfa ve beta aktivite derişimlerinin tayini için de kullanılması yönünde numune hazırlama yöntemleri geliştirilerek kullanılabilceğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, LSC, sularda radon,  $^{226}\text{Ra}/^{220}\text{Rn}$ , trityum ( $^3\text{H}$ ) ölçümleri de yapılabilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesine açıktır. Daha ileri aşamalarda trityum analizi için standart NIST/CIEMAT verim kalibrasyonu yönteminin uygulanması ayrı bir çalışma olarak yapılması önerilebilir

## KAYNAKLAR

- Abdellah, W.M. 2013. Optimization method to determine gross alpha-beta in water samples using liquid scintillation counter. *Journal of Water Resource and Protection* 5(2013); 900-905.
- ASTM D7283-06, American Society for Testing and Materials. Sıvı Sintilasyon Sistemi ile Sularda Alfa ve Beta Aktivitesi için Standart Test Metodu
- Bonotto,D.M. Bueno,T.O. Tessari,B.W., Silva,A. 2009. The natural radioativity in water by gross alpha and beta measurements. *Radiation Measurements* 44 (2009); 92-101.
- Bor,D.2009. Radyasyon Dedeksiyon ve Ölçüm Yöntemleri Ders Notları. AÜNBE,176.Ankara.
- Bozkurt, A. Yorulmaz, N. Kam, E. Karahan,G. Osmanlioglu,A.E. 2007. Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of southeastern Turkey. *r Radiation Measurements* 42 (2007); 1387-1391
- Canberra, Model LB41100 Low Background System User's Manuel, 2003
- Cook, G. T. Passo, C. J. Carter, B. 2012. 3rd edition. *Handbook of Radioactivity Analysis*. Elsevier, Ch9,USA.
- Damla, N. Çevik, U. Karahan, G. Kobya, A.İ. 2006. Gross  $\alpha$  and  $\beta$  activities in tap waters in Eastern Black Sea of Turkey. *Chemosphere*, 62(2006); 957-960.
- Degerlier, M. Karahan, G. 2010. Natural radioactivity in various surface waters in Adana, Turkey. *Desalination* 261(2010); 126-130.
- Doğan, N.2015. Kayseri bölgesi su kaynaklarının radyoaktivite içeriğinin incelenmesi. *DSİ Teknik Bülteni* 118(Ocak2015); 16-25.
- DWİQ, Guardians of Drinking Water Quality. Guidance On The Water Supply (Water Quality) Regulations 2000 (England) And The Water Supply (Water Quality) Regulations 2001 (Wales). *Drinking Water Inspectorate*, May 2005, 77.
- EC,1998.Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi 98/83.1999
- EPA, 2014.UnitedStatesEnvironmentalProtectionAgency [water.epa.gov/Basics of Gas Proportional Counting](http://water.epa.gov/Basics%20of%20Gas%20Proportional%20Counting). Erişim tarihi:2014.
- EPA, 2000. UnitedStatesEnvironmentalProtectionAgency Tecnicl Fact Sheet: Final Rule for (non radon) Radionuclides in Drinking Water 815-F-00-013, November2000.
- EPA,UnitedStatesEnvironmentalProtectionAgency.<http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/radionuclides/basicinformation.cfm>, Erişim tarihi:5 Mayıs 2014.

- EPA 900, İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Aktivitesi Tayini Standart Test Metodu.
- Forte, M. Rusconi, R. Cazzaniga, M.T. Sgorbati, G. 2007. The measurement of radioactivity in Italian drinking waters. *Microchemical Journal* 85 (2007); 98-102.
- Forte, M. Rusconi, R. Di Caprio, E. Bellinzona, S. Sgorbati, G. 2003. Natural radionuclides measurements in drinking water by liquid scintillation counting methods and results. *Environmental Radiochemical Analysis II.V2* (2003); 128-142.
- Görür, F.K. Keser, R. Dizman, S. Okumuşoğlu, N.T. 2011. Annual effective dose and concentration levels of gross  $\alpha$  and  $\beta$  in various waters from Samsun, Turkey. *Desalination* 279(2011); 135-139.
- Happel, S. Letessier, P. Ensinger, W. Eikenberg, J.H. Thakkar, A.H. Horwitz, E.P. *Applied Radiation and Isotopes* 61 (2004); 339-344.
- IAEA 1998. International Atomic Energy Agency. The Annual Report For 1998
- ICRP 103. 2007. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP* 37(2-4),322
- Kam, E. Bozkurt, A. 2007. Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey. *Applied Radiation and Isotopes* 65 (2007) ; 440-444.
- Karahan, G.Öztürk, N. Bayülken, A. 2000. Natural radioactivity in various surface waters in İstanbul, Turkey. *Wat.Res* 34/18(2000);4367-4370.
- Kehagia, K. Koukoulou, V. Bratakos, S. Seferlis, S. Tzoumerkas, F. Potiriadis, C. 2007. Radioactivity monitoring in drinking water of Attika, Greece. *Desalination*, 213(2007); 98-103.
- Kleinschmidt, R.I. 2004. Gross alpha and beta activity analysis in water-a routine laboratory method using liquid scintillation analysis. *Applied Radiation and Isotopes* 61 (2004); 333-338.
- Knoll, G. F. 2000.3rd Edition. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons Inc, Newyork.
- Lin, C-F. Wang, J-J. Huang, J-C. Yeh, C-H. Yuan, M-C. Chang, B-J. 2012. Evaluating practicability of an LSC method for routine monitoring gross alpha and beta activities in water samples in Taiwan. *Applied Radiation and Isotopes* 70 (2012); 1981-1984.
- Martin, A. Harbison, S. Arnold, H. 2006. *An Introduction to Radiation Protection*, fifth edition, London.

- Montana, M. Fons, J. Corbacho, J.A. Camacho, A. Zapata-Garcia, D. Guillen, J. Serrano, I. Tent, J. Baeza, A. Llaurodo, M. Valles, I. 2013. A comparative experimental study of gross alpha methods in natural waters. *Journal of Environmental Radioactivity* 118(2013); 1-8.
- NIST National Institute of Standards and Technology. [www.nist.gov/](http://www.nist.gov/), Erişim tarihi: 01.08.2015.
- NIST National Institute of Standards and Technology ASTAR <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>, Erişim tarihi: 01.08.2015.
- NIST National Institute of Standards and Technology ESTAR <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>, Erişim tarihi: 01.08.2015.
- NNDC National Nuclear Data Center. <http://www.nndc.bnl.gov/> Erişim tarihi: 01.08.2015.
- Palomo, M. Villa, M. Casacuberta, N. Penalver, A. Borrull, F. Aguilar, C. 2011. Evaluation of different parameters affecting the liquid scintillation spectrometry measurement of gross alpha and beta index in water samples. *Applied Radiation and Isotopes* 69(2011); 1274-1281.
- Sanchez, A. M. Saenz Garcia, G. Jurado Vargas, M. 2009. Study of self-absorption for the determination of gross alpha and beta activities in water and soil samples. *Applied Radiation and Isotopes* 67 (2009); 817-820.
- Sanchez, A. R. B. Martin Sanchez, A. De la Torre Perez, J. 2013. Gross alpha and beta indices in water samples revisited. *Applied Radiation and Isotopes* 81 (2013); 136-139.
- Sanchez, A.B. R. Martin Sanchez, A. De la Torre Perez, J. 2013. On the use of different scintillation cocktails for determining gross alpha and beta activities in water samples. *Applied Radiation and Isotopes* 81 (2013); 175-178.
- Rusconi, R. Forte, M. Caresana, M. Bellinzona, S. Cazzaniga, M.T. Sgorbati, G. 2006. The evaluation of uncertainty in low-level LSC measurements of water samples. *Applied Radiation and Isotopes* 64 (2006); 1124-1129.
- Sanchez-Cabeza, J.A. Pujol, L. Merino, J. Leon, L. Molero, J. Vidal-Quadras, A. Schell, W.R. Mitchell, P.I. 1992. Optimization and calibration of a low-background liquid scintillation counter for the simultaneous determination of alpha and beta emitters in aqueous samples. *Liquid Scintillation Spectrometry* 1992; 43-50.
- Semkow, T.M. Bari, A. Parekh, P.P. Haines, D.K. Gao, H. Bolden, A.N. Dahms, K.S. Scarpitta, S.C. Thern, R.E. Velazquez, S. 2004. Experimental investigation of

- mass efficiency curve for alpha radioactivity counting using a gas-proportional detector. *Applied Radiation and Isotopes* 60 (2004); 879-886.
- Semkow, T.M. Parekh, P.P. 2001. Principles of gross alpha and beta radioactivity detection in water. *Health Physics Society* 81 (2001); 567-574.
- TAEK Türkiye Atom Enerjisi Kurumu 2000. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği
- Timon, A.F. Vargas, M.J. Sanchez, A.B.R. Perez, J.T. Sanchez, A.M. 2013. Influence of source composition and particle energy on the determination of gross alpha activity. *Applied Radiation and Isotopes* 82(2013); 376-381.
- Todorovic, N. Nikolov, J. Tenjovic, B. Bikit, I. Veskovic, M. 2012. Establishment of a method for measurement of gross alpha/beta activities in water from Vojvodina region. *Radiation Measurements* 47 (2012); 1053-1059.
- Tsoufadinis, N. Landsberger, S. 2010. *Measurement and Detection of Radiation*. 4th edition. CRC Press, Taylor and Frances Group, USA.
- UNSCEAR 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, USA
- Warwick, P.E. Croudace, I.W. 2002. Measurement of gross alpha and beta activities in acid leachates using alpha-beta discriminating liquid scintillation counting. *Advances in Liquid Scintillation Spectrometry*; 75-82.
- WHO 2004, Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd edition, World Health Organization, Geneva.
- Yalcin, S. Gurler, O. 2007. The radioactivity measurements in soil, coal and water in South Marmara region of Turkey. *Radiation Measurements* 42(2007); 281-285.
- Yarar, Y. Kam, E. 2005. Environmental Radioactivity Concentrations of Tekirdağ. *International Congress Series* , 1276(2005); 387-389.
- Yücel, H. 2013. Radyasyondan Korunma Ders Notu, AÜNBE, Ankara.
- Zapata-Garcia, D. Llaurado, M. Rauret, G. 2012. The implications of particle energy and acidic media on gross alpha and beta determination using liquid scintillation. *Applied Radiation and Isotopes* 70 (2012); 705-711.
- Zikovskiy, L. 2006. Alpha radioactivity in drinking water in Quebec, Canada. *Journal of Environmental Radioactivity* 88(2006); 306-309.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Rufiyet GÜVEN

Doğum Yeri: Karabük

Doğum Tarihi: 1979

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

### *Eğitim Durumu*

Lise : Safranbolu Lisesi 1996

Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü 2000

Yüksek Lisans: Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Ortaöğretim Kimya Öğretmenliği, 2004

### *Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl*

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü 2006-devam ediyor

### *Yayınları*

#### *Makaleler*

G.Ö. Çakal, R. Güven, H. Yücel, An Application of LSC Method for the Measurement of Gross Alpha and Beta Activities in Spiked Water and Drinking Water Samples, Nukleonika, 2015

E. Uyar, A.Ö. Yüksel, R. Güven, H. Yücel, I Correction Factors In Direct Gamma Spectrometric Measurement Of Some Radionuclides In Lake And Stream Sediment Samples, International Journal of Sediment Research, 2015 (*revizyon aşamasında*)

Yücel H, Çakal G Ö, Yüksel A Ö, Kurt R, Uyar E, Güven S, Hancı H, "Nükleer Adli Bilim ve İnceleme Konuları," Adli Bilimler Dergisi 12(1)37-48 Mart 2013.

### *Bildiriler*

G. Ö. Çakal, R. Güven, H. Yücel, “An Application of LSC Method for the Measurement of Gross Alpha and Beta Activities in Spiked Water and Drinking Water Samples”, NUTECH-2014, International Conference on Development and Applications of Nuclear Technologies, Varşova, Polonya, 2014

Yücel H., Yüksel A. Ö., Uyar E., Kurt R., “Correction Factors in Direct Gamma Spectrometric Measurement of Some Radionuclides in Lake and Stream Sediment Samples”, Applied Radiation Isotopes, ICRM 2013, Antwerp Belgium, June 16-21, 2013

Özenci S, Kurt R, Kaya Ş, Göksu H.Y. “Baş ve Boyun Bölgesine Radyoterapi Alan Hastaların Çekim Endikasyonu Olan Dişlerinden Almış Olduğu Radyasyon Dozunun EPR Yöntemi İle Değerlendirilmesi, XIII. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, Çeşme-İzmir, 2011

### *Projeler*

BAP 12A4045002 Nükleer Bilimler Enstitüsü Laboratuvarlarında Sıvı Sintilasyon Ölçüm Sistemi ile Düşük Seviye Radyoaktivite Ölçüm Kapasitesinin Geliştirilmesi

BAP 11A404500 Nükleer Bilimler Enstitüsü Laboratuvarlarındaki Düşük Seviye Radyoaktivite Ölçüm Kapasitesinin Geliştirilmesi