

Sıvı Sintilasyon Cihazı ile  
İçme Sularında  
Tritiyum Seviyelerinin Belirlenmesi  
Gülcan Top

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Temmuz 2008

The Determination of Tritium Level  
In Drinking Water  
By Using Liquid Scintillation Counter (LSC)  
Gülcan Top  
M.S THESIS  
Department of Physics  
July 2008

Sıvı Sintilasyon Cihazı ile İçme Sularında  
Tritiyum Seviyelerinin Belirlenmesi

Gülcan Top

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Fizik Anabilim Dalı  
Nükleer Fizik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman  
Doç. Dr. EMEL ALĞIN

Temmuz 2008

# SIVI SİNTİLASYON CİHAZI İLE İÇME SULARINDA TRİTYUM SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

**Gülcan TOP**

## **ÖZET**

Bu çalışmanın amacı, Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi (LSC) ile içme sularında trityum radyoaktivitesinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü'nün (TSE) ve Dünya Sağlık Organizasyonu (WHO)'nun trityum için kabul ettiği müsaade edilebilir limit değerleri ile kıyasının yapılmasıdır.

İçme sularında trityum analizi için, saha Eskişehir ve civarı olarak seçilmiş, toplam 6 içme suyu örneğinin trityum seviyesi belirlenmiştir. Analizlerimiz örneklerin elektrolizle zenginleştirme yöntemiyle Devlet Su İşleri Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (DSİ TAKK) Dairesi Başkanlığı İzotop Laboratuvarı Şube Müdürlüğü Trityum Laboratuvarı'nda, Quantulus-1220 Sintilasyon Sayma Sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Trityum değerleri  $0,73\pm 0,70$  ile  $8,10\pm 1,80$  TU arasında değişmektedir. Sonuçlar içme suları için müsaade edilen üst limit değerleri olan 839 TU'nun (100 Bq/L) çok altında olduğundan içme suyu olarak kullanılmalarında herhangi bir sakınca yoktur.

Anahtar Kelimeler: Sıvı sintilasyon sayım sistemi, radyoaktivite, içme suyu, trityum, Eskişehir, Sarıcakaya.

## **THE DETERMINATION OF TRITIUM LEVEL IN DRINKING WATER BY USING LIQUID SCINTILLATION COUNTER (LSC)**

**Gülcan TOP**

### **SUMMARY**

The purpose of this study is to determine the tritium radioactivity level in drinking water by using Liquid Scintillation Counter (LSC) and to compare the results with accepted limit levels of tritium by World Health Organisation (WHO) and Turkish Standarts Institute (TSE).

For the tritium analysis in drinking water, the city Eskişehir and its surroundings are chosen as pilot areas and tritium levels of six water samples are determined. Analysis is performed via enriching method by electrolysis at DSİ TAKK Isotope Laboratory and tritium levels are determined by using Quantulus-1220 Ultra Low Level Scintillation Counter System.

Tritium levels of the samples change between  $0,73\pm 0,70$  and  $8,10\pm 1,80$  TU. These results are much lower than the upper level, 839TU (100 mBq/L). Thus there is no hazard to use them as drinking water.

Keywords: Liquid Scintillation Counter System, radioactivity, drinking water, tritium, Eskişehir, Sarıcakaya.

## TEŞEKKÜR

İleri görüşlülüğü sayesinde belirlediği sağlam çalışma konularıyla, eğitim hayatım için çok önemli ve tereddütsüz adımlar atmamı sağlayan, çalışkanlığıyla örnek olan, mükemmeliyetçiliğinden taviz vermeyen, en zor şartlarda bile mazerete yer verilmemesi gerektiğini kendisinden öğrendiğim, danışmanım Doç. Dr. Emel ALĞIN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın bilgi altyapısını sağlamama olanak tanıyan Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi (ÇNAEM) Müdür Yrd. Dr. Deniz DALCI'ya, manevi desteği ve ayrıca çalışmalarına katkıları nedeniyle çok sevgili hocam Radyofarmasotik Bölüm Başkanı Dr. A. Fadıl AKGÜN'e, zamanını ve bilgisini benimle paylaşan Funda BARLAS ŞİMŞEK'e, yol göstericiliği ve yardımsever davranışları için Radyoaktivite Ölçüm ve Analiz Birimi Koordinatörü Dr. Nilgün ÇELEBİ'ye, sıcak, samimi tavırları, yardımları ve dostluğu nedeniyle Halim TAŞKIN'a, anne sıcaklığında yakınlık ve çaba gösteren Dr. Seval BAYÜLKEN'e, ayrıca bilgilerini, olanaklarını benimle paylaşarak ufkumu genişleten Dr. Ayhan YÜKSEL'e, Dr. Nurdan GÜNGÖR'e, Dr. Neşet ÖZTÜRK'e, Mehmet KOÇAK'a ve her birinden apayrı güzellikte ve değerinde bilgiler öğrendiğim, manevi desteklerini aldığım isimlerini burada tek tek sayamadığım ancak asla unutmayacağım ÇNAEM personeline şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın laboratuvar analizlerinin yapılmasına olanak tanıyan DSİ TAKK. Dairesi Başkanlığı İzotop Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'ne, yardım ve desteklerinden dolayı Yük. Müh. Alime TEMEL DİLAVER'e, Sabahat ÖZCAN EYÜBOĞLU'na ve İclal KALEYCI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her zaman yanımda olan ve beni teşvik etmek için bu süreç içinde yanımda olduğunu daha çok hissettiren anneme, eğitimim için ellerinden gelen desteği sağlayan babama, ablama, ağabeyme, manevi destekleri için Safiye ve Hayri ARDA'ya çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET .....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>viii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>.1</b>
<b>2. RADYASYON.....</b>	<b>.2</b>
2.1 Radyasyon Çeşitleri .....	4
2.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon .....	6
2.1.1.1 Alfa parçacıkları .....	6
2.1.1.2 Beta parçacıkları .....	6
2.1.1.3 Gama parçacıkları.....	8
2.1.1.4 X-ışınları .....	9
2.1.2 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon.....	10
2.2 Radyasyon Dozu ve Birimleri.....	11
2.2.1 Radyasyon dozu .....	11
2.2.2 Radyasyon birimleri .....	11
2.3 Radyasyon Kaynakları .....	13
2.3.1 Doğal radyasyon kaynakları.....	13
2.3.2 Yapay radyasyon kaynakları.....	16
2.4 Sularda Radyoaktivite.....	
2.5 Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri .....	

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

<b>3. TRİTYUM</b> .....	<b>21</b>
3.1 Çevresel Trityum.....	22
3.2 Trityumun Ölçümü.....	27
3.3 Trityumun İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri .....	28
<b>4. SİNTİLASYON DEDEKTÖRLERİ</b> .....	<b>29</b>
4.1 Sintilatörler.....	31
4.1.1 İnorganik Sintilatörler .....	33
4.1.2 Gazlı sintilatörler .....	35
4.1.3 Organik sintilatörler .....	35
4.1.3.1 Organik kristal sintilatörler.....	35
4.1.3.2 Organik sıvı sintilatörler .....	36
4.1.3.3 Plastik sintilatörler .....	36
4.2 Sönüm (Quenching ) .....	37
4.3 Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT) .....	40
<b>5. SIVI SİNTİLASYON DEDEKTÖRÜ (LSC)</b> .....	<b>44</b>
5.1 Sayım Kabları (Vialler).....	47
5.2 Sayım Sistemi .....	48
5.3 Puls Şekil Analizi (PSA) Yöntemi ile Alfa ve Betaların Ayırımı.....	50
<b>6. GEREÇ VE YÖNTEM</b> .....	<b>52</b>
6.1 İçme Suları İçin Radyoaktivite Limitleri .....	52
6.2 Örnekleme .....	
6.3 Birinci Damıtma.....	



## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

6.4 Elektroliz .....	57
6.5 İkinci Damıtma ve Nötralizasyon .....	61
6.6 Sayım .....	63
6.7 Araştırma Sahası .....	63
6.7.1 Eskişehir .....	63
6.7.2 Sarıcakaya .....	64
<b>7. DENEYSEL BULGULAR ve HESAPLAMALAR .....</b>	<b>65</b>
7.1 Numune ve Standartlara Ait Tartım Sonuçları .....	65
7.2 Numune ve Standartlara Ait Sayımlar .....	66
7.3 Spike ve Laboratuvar Standartına Ait Veriler.....	67
7.4 Tritiyum Konsantrasyonunun Hesabı .....	67
7.5 İçme Suyu Numunelerinde Belirlenen Tritiyum Radyoaktivite Seviyeleri .....	73
<b>8. SONUÇ ve TARTIŞMA .....</b>	<b>74</b>
<b>9. KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>78</b>

### **EKLER**

EK-A Kurşun Klorür (PbCl<sub>2</sub>) Miktarının Hesaplanması

EK-B Sazova Şebeke Suyu Numunesi İçin Tritiyum Konsantrasyonunun Hesabı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Elektromanyetik spektrum.....	5
2.2 Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri.....	15
3.1 Hidrojenin izotopları.....	21
3.2 Tritiyumun radyoaktif bozunması.....	21
3.3 Tritiyumun beta bozunumu.....	22
3.4 Tritiyumun oluşumu.....	23
3.5 Tritiyum konsantrasyonunun yıllara göre değişimi.....	25
4.1 Sintilasyon dedektörlerinde temel işlemler.....	29
4.2 Elektronik yapı.....	30
4.3 (Sol) Bazı fotoçoğaltıcı tüplerle birleşik NaI sintilatörleri. (Sağ) Yedi çoğaltıcılı büyük NaI dedektörü.....	33
4.4 Plastik sintilatörler.....	37
4.5 Sönümsüz ve kimyasal sönümlü spektrumların karşılaştırılması.....	39
4.6 Kimyasal ve renk dönüm ajanları için puls yükseklik dağılımlarının karşılaştırılması.....	39
4.7 Fotoçoğaltıcı tüpün şematik gösterimi.....	41
5.1 Radyoaktif olmayan asimetrik kurşun kaplama.....	46
5.2 (Sol) Cam vialler (Sağ) Bakır-teflon vialler.....	47
5.3 60 adet örneğin 20'şerli guruplar halinde tepsilere dizilimi.....	48
5.4 LSC çalışma düzeneği.....	49
5.5 Bazı alfa/beta enerjilerinin üst üste gelmesi.....	51
6.1 Damıtma sistemi.....	56
6.2 Elektroliz sistemi.....	57
6.3 Hücre, metal elektrod.....	59
6.4 Çalışma sahası: Sarıcakaya İlçesi, Mayıslar Köyü, Bozaniç Dağı.....	64

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1 Çiftlenim etkisi .....	4
2.2 Radyasyon çeşitleri .....	4
2.3 Radyasyon terimleri ve özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki.....	12
2.4 Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörleri.....	13
2.5 Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri.....	15
6.1 Su radyoaktivite analizinde kullanılan radyolojik parametreler ve limitler .....	52
7.1 Elektroliz için yapılan tartımlar .....	65
7.2 Numuneler ve standartlara ait sayma değerleri.....	66
7.3 Laboratuvar standartı ve spike'ın TU değerleri.....	67
7.4 Araştırma sahasından alınan su örneklerinin trityum seviyeleri.....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ÇNAEM</b>	Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
<b>DSİ TAKK</b>	Devlet Su İşleri Teknik Araştırma Kalite Kontrol
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency (Dünya Atom Enerji Kurumu)
<b>PMT</b>	Photo Multiplier Tube (fotoçoğaltıcı tüp)
<b>RBE</b>	Relative Biological Effect (belirli bir etkiyi oluşturan 250 KV'lik X-ışınları dozunun aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyonun dozuna oranı)
<b>SI</b>	International System of Unit (uluslar arası birim sistemi)
<b>TAEK</b>	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
<b>TSE</b>	Türk Standartlar Enstitüsü
<b>WHO</b>	World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\alpha$	Alfa parçacığı
$\beta$	Beta parçacığı
$\gamma$	Gama ışını
E	Enerji
c	Işık hızı
f	Frekans
h	Plank sabiti
$\mu$	Sönüm katsayısı
Bq	Becquerel
Cs	Sezyum
Fe	Demir
Gy	Gray (soğurulmuş doz birimi)
Hg	Civa
K	Potasyum
kg	Kilogram
mm	Milimetre
Na	Sodyum
nm	Nanometre
Pb	Kurşun
R	Röntgen
Rad	Radiation dose (radyasyon dozu)

rem Radiation equivalent man (1 Röntgenlik X veya  $\gamma$  ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarı)

Sv Sievert (eşdeğer doz birimi)  
U Uranyum

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Su, yeryüzünün ve insan vücudunun dörtte üçünü oluşturur, yaşamın temelidir ve canlıların tüm bedensel işlevleriyle doğrudan ilgilidir. Bu nedenle özellikle içme sularının temiz olması, günlük tüketilen miktar da göz önüne alındığı zaman oldukça önemlidir. Suyun temiz olması, insan sağlığı açısından içerisinde bulunan radyoaktif kirleticilerin de belirli sınır değerlerinin altında olmasını gerektirir.

Sulardaki radyoaktivitenin büyük kısmı su içerisindeki radyum ve radon konsantrasyonu nedeniyle oluşur. Radon topraktan suya karışır ve sindirim yolu ile vücuda alınarak iç ışınlamaya neden olur. Vücuda alınan radyonüklitlerden bir kısmı bir süre sonra vücuttan atılırken bir kısmı da kemiklere yerleşerek vücuda ışınlamaya devam eder.

Su içerisinde bulunan radyonüklitlerden biri de trityumdur. Hidrojenin üç izotopundan biri olan trityum çekirdeğindeki nötron fazlalığı nedeniyle radyoaktif özellik gösterir, beta parçacığı yayınlamaya bozunur. Trityum atmosferin üst tabakalarındaki azot atomlarıyla kozmik nötronların etkileşmesinden doğal olarak ya da 1952–1962 yılları arasında yapılan termonükleer denemeler ve reaktör kazaları sonucu yağışlara girerek suyun hidrolojik çevrimine katılır.

Trityum ölçümü için kullanılan yöntemlerden biri olan Sıvı Sintilasyon Sayım Tekniği, dedeksiyon limitinin teknolojideki gelişmeler sonucunda aşağı çekilmesiyle düşük aktiviteli çevre örneklerinde trityum analizi için yüksek sayım verimi sağlar. Numune hazırlama yönteminin kolay olması nedeniyle rutin analizlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

## BÖLÜM 2

### RADYASYON

Radyasyon, enerjinin parçacık ya da elektromanyetik dalga olarak yayılmasıdır. Doğadaki elementlerin atomlarının bir kısmı kararlı, bir kısmı ise kararsız çekirdeklere sahiptir. Kararlılık derecesinin ölçülebilmesi için nükleon başına bağ enerjisi olan bağ oranı kullanılmalıdır.  $A=30$  ile  $A=100$  arasında bağ oranı hemen hemen sabit olup yaklaşık olarak nükleon başına 8,7 MeV değerine sahiptir; küçük ve büyük  $A$ 'lar için bağ oranı azalır. Büyük  $A$ 'lar için bağ oranının azalması protonların arasındaki uzun menzilli Coulomb itmesinden dolayıdır; çekirdekler büyüdükçe bunun önemi artar ve sonunda çekirdek kuvvetlerine galip gelerek çekirdeklerin büyüklüğünü sınırlarlar. Hafif çekirdeklerde her bir nükleon çok daha az sayıda başka nükleonlar tarafından çekildiğinden aralarındaki uzaklık büyür ve böylece kararlılık azalır [1,2].

Nükleer bilgi için en kolay yol nötron sayısını çekirdekler için proton sayısına oranlamaktır. Böylece kararlı çekirdekleri gösteren bir eğri çizilebilir. Bu eğri kararlı çekirdekleri tanımladığı için kararlılık eğrisi olarak adlandırıldığı gibi Segre tarafından çizildiği için Segre grafiği olarak da adlandırılır. Kararlılık eğrisinin üstünde ya da aşağısında yer alan bir çekirdeğin bağlanma enerjisi kütle numarası olan  $A$ 'ya karşılık gelen minimum bağlanma enerjisinden daha fazladır. Bu tür çekirdekler kararsız çekirdeklerdir. Enerji fazlalığı, örneğin bir nötronun protona çevrilmesi ile giderilebilir. Bu tür bir durumun gerçekleşmesini sağlayan kuvvet zayıf kuvvet olarak adlandırılır [3,4].

Çekirdek modelleri bizim basit modellerimizden çok daha karmaşıktır. Bir tür yapıyı göz önüne alıp diğerlerini yok sayamayız. Kabuk modeli ile çekirdeklerdeki nükleonların oluşturduğu "kor" ihmal ettiğimiz kolektif etkilere katkıda bulunabilir [5].

Bir atomdaki elektronların durumuna benzer şekilde bir çekirdekteki nükleonların belirli enerji ve açısal momentum hallerinde buldukları, böylece bazı çekirdeklerin

olağanüstü kararlılıklarının bir nötron veya bir proton kabuğunun dolmasından ileri geldiği düşünülebilir. İki nedenden dolayı çekirdekte durum daha karmaşıktır [2].

- a) Çekirdekdeki merkezi potansiyel gerçekte bir ortalama potansiyeldir ve fazladan bir nükleonun ilavesi bu potansiyeli değişikliğe uğratar ve bu değişiklik fazladan bir elektronun ilavesi ile bir atomdaki merkezi potansiyelin uğradığı değişiklikten daha fazladır.
- b) Protonların Coulomb itmesinden dolayı, en hafiflerin dışında bütün çekirdeklere nötronlarla protonların sayıları yaklaşık olarak bile aynı değildir. Bu sebepten kapalı bir kabuk sayısı kadar nötrona sahip olan bir çekirdek çok kere kapalı bir kabuk sayısı kadar protona sahip olamaz, bunun terside mümkün değildir. Böylece, kapalı kabukların kararlılık özelliği atomlardaki kadar belirli değildir [2].

Aşağıdaki sayılarda nötronların ve protonların özel bir kararlılık gösteren çekirdeklere bulunduğu anlaşılmıştır:

2,8, 20, 28, 50, 82, 126

Bu sayılara “sihirli sayılar” denir. Böylece  ${}^4_2\text{He}_2$ ,  ${}^{16}_8\text{O}_8$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}_{28}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$  en kararlı çekirdeklerdir [2].

Nükleer kararlılık nötron ve proton sayısının tek ve çift oluşuna bakılarak da incelemiş olabilir. Kararlı çekirdekler listesi Tablo2.1’de gösterildiği şekliyle A ve Z’nin çift veya tek olmasına göre gruplara ayrıldığı vakit, çift Z’ye sahip çekirdeklerin tek Z’ye sahip çekirdeklerden çok daha fazla oldukları ve çift A’ya sahip olanların da tek A’ya sahip olanlardan çok daha fazla sayıda oldukları görülür. Ayrıca çift A’ya sahip çekirdeklerin hemen hemen hepsi çift Z’ye sahiptirler ve bunun sadece dört istisnası vardır. Çift A’ya sahip oldukları halde tek Z’ye sahip olan kararlı sadece 4 çekirdek vardır, bunlar;  ${}^2_1\text{H}_{1,3}$ ,  ${}^6_3\text{Li}_{3,5}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}_{5,7}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}_7$ ’dir [2,6].



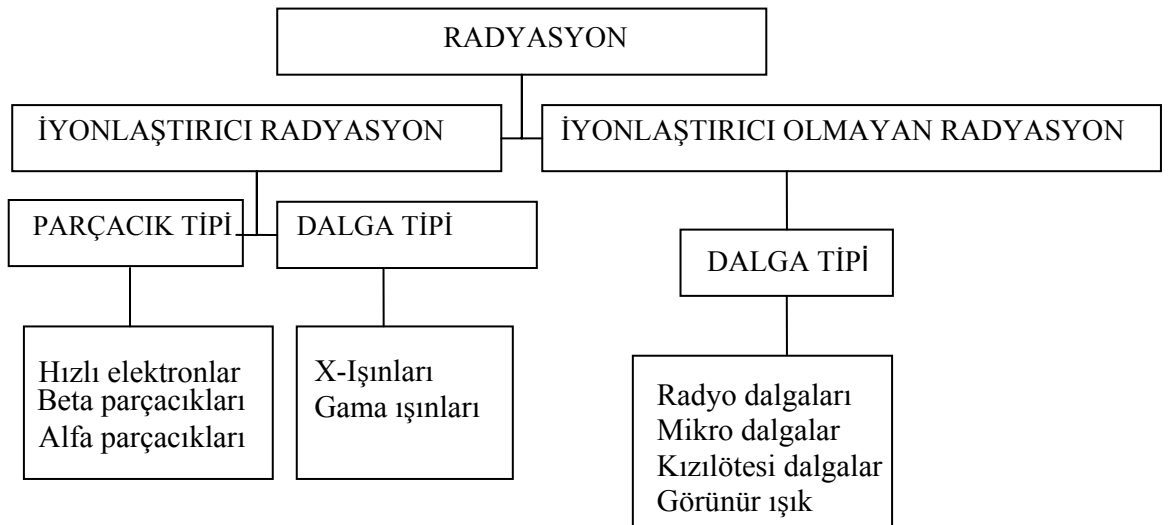
**Tablo 2.1** Çiftlenim etkisi [2]

A	Z	N	Kararlı izotopların sayısı
Çift	Çift	Çift	149
Tek	Çift	Tek	51
Tek	Tek	Çift	47
Çift	Tek	Tek	4

Radyonüklit adı verilen kararsız çekirdekler bol miktarda nükleonları nedeniyle kararsızdırlar ve bünyelerindeki fazla enerjiyi “*radyasyon*” (elektromanyetik veya parçacık) yayarak düzenlemeye çalışırlar. Çekirdeklerin gerek bu şekilde doğal yolla, gerekse dışarıdan yapılan bir uyarımla bombardımanı sonucunda yapay olarak parçalanmasına “*radyoaktivite*” veya “*radyoaktif parçalanma*” denir. Radyoaktivite kontrol edilemeyen bir olaydır [1].

## 2.1 Radyasyon Çeşitleri

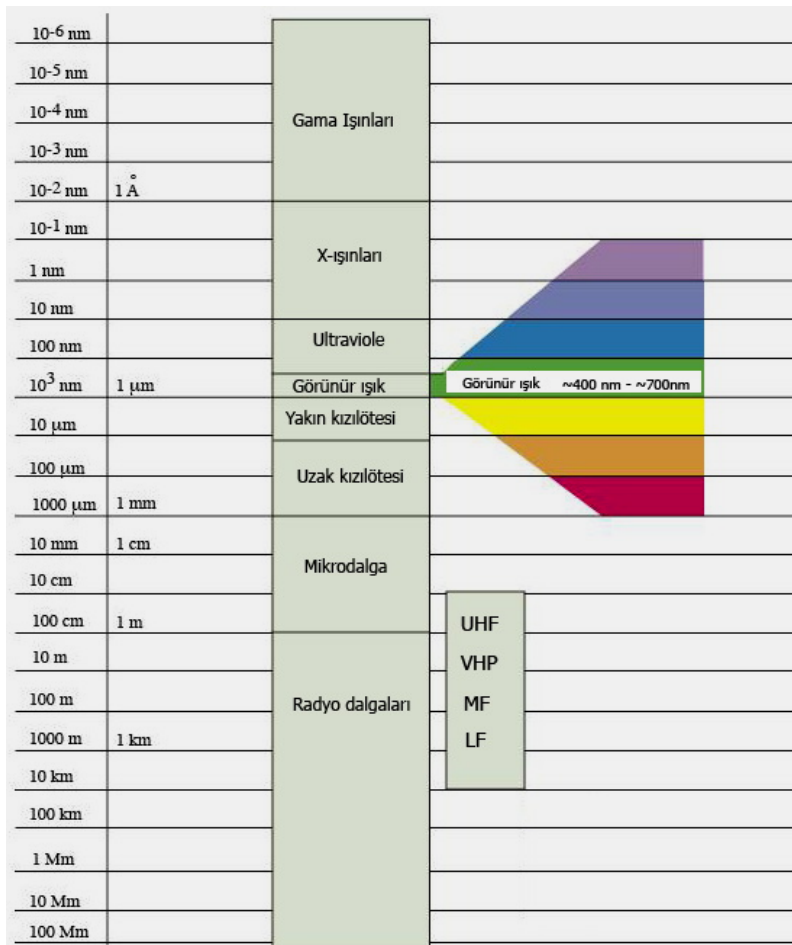
Radyasyonu madde ile etkileşimlerine göre Tablo 2.2’deki gibi iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, “iyonlaştırıcı” ve “iyonlaştırıcı olmayan” radyasyonlardır. Tabiatına göre ise “parçacık” ve “dalga” tipi radyasyonlar olmak üzere yine iki sınıfa ayırmak mümkündür [1].

**Tablo 2.2** Radyasyon çeşitleri [7]

Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden atom altı parçacıkları ifade eder. Yüksek enerjiye sahiptirler. Radyoaktif bir elementten yüksek hızlarda yayımlanırlar. Parçacık radyasyonu alfa, beta parçacıklarını, nötronları ve protonları kapsar.  $\alpha$  ve  $\beta$  ışınlarının iç ışımalarda etkileri oldukça fazladır [1,8,9].

Dalga tipi radyasyon; belli bir enerjiye sahip ancak kütesiz radyasyon çeşididir. Bunlar, titreşim yaparak ilerleyen elektromanyetik dalgalarıdır. Elektromanyetik spektrum Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Vakumda ve havada ışık hızıyla ilerlerler, insan derisinde ise hızları daha düşüktür. Kozmik ışınlar, X-ışınları ve gama radyasyonları bu aileye mensup olup dış ışınlamalarda çok önemli yer tutarlar. Dalga boyları çok küçük fakat enerjileri yüksektir [1,10].

**Şekil 2.1** Elektromanyetik spektrum [11]

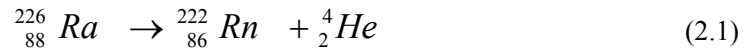


## 2.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, çarptığı maddede yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturabilen radyasyon demektir. İyonlaştırıcı radyasyonlar, önlem alınmadığı takdirde tüm canlılar için zararlı olabilecek radyasyon çeşitleridir [1].

### 2.1.1.1 Alfa parçacıkları

Alfa parçacığı iki proton ve iki nötrondan oluşmuş bir helyum ( ${}^4_2He$ ) çekirdeğidir ve “ $\alpha$ ” ile sembolize edilir. Çekirdeğin, alfa çıkararak parçalanması olayı atom numarası büyük izotoplarda görülür ve genellikle doğal radyoaktif atomlarda rastlanır. Tipik bir  $\alpha$  bozunum reaksiyonu Denklem 2.1’deki gibidir [1].



Alfa parçacıkları büyük elektrik yüklerine sahip olduklarından herhangi bir madde içerisinden geçerken yolları üzerinde yoğun bir iyonlaşma meydana getirirler ve enerjilerini çabucak kaybettikleri için erişim uzaklıkları küçüktür. Havada enerjilerine göre 2,8 ila 8,6 cm uzaklığa kadar gidebilirler. Alfa parçaları bir kâğıt veya 0,5 mm kalınlığında bir alüminyum varakla durdurulabilir. Cilt, laboratuvar önlüğü ve giysiler alfa ışınları için birer zırh maddesidir. Bu nedenle dış radyasyon tehlikesi yaratmazlar. Yüksek enerjili parçacıklar olduğundan solunum yolu ile vücuda girdiklerinde büyük hasarlar meydana getirebilirler. Alfa parçacığının enerjisi 4–8 MeV arasında değişir.

### 2.1.1.2 Beta parçacıkları

Bu ışınlar parçacık karakteri gösterirler. Yük ve kütleleri elektron yük ve kütlesine eşittir. Çekirdekdeki enerji fazlalığı çekirdek civarında,  $E=mc^2$  eşitliğiyle

açıklanabilen, bir kütle oluşturur. Bu kütle çekirdekdeki fazla yükü alır ve dışarıya bir beta ışını olarak çıkar. Bunlar pozitif veya negatif yüklü elektronlardır. Bu parçacıkların salınması çekirdekdeki nötronların ve protonların kararlılığına göre gerçekleşir. Tipik bir beta bozunumu Denklem 2.2'deki gibidir.



Çekirdekten nötron fazlalığından dolayı salınan parçacıklar negatif yüklüdür ve bu tür bozunuma “*beta-negatif bozunumu*” adı verilir. Negatif yüklü bu parçacıklar  $\beta^{-}$  şeklinde temsil edilir ve “*negatron*” olarak isimlendirilir.



Çekirdekten negatif betalarla beraber, yüksüz ve ağırlığı ihmal edilebilir nötrino yayınlanır. Nötrinolar yüksüz olduklarından maddeyle etkileşmezler.

Eğer çekirdekdeki proton fazlalığından ileri gelen bir beta yayınlanması mevcutsa parçacık pozitif yüklüdür ve bu olaya “*beta-pozitif bozunumu*” denir. Pozitif yüklü bu parçacıklar  $\beta^{+}$  şeklinde temsil edilir ve “*pozitron*” olarak isimlendirilir.



Alfa enerjileri genellikle tekdir, nadiren 2–3 farklı enerjiyle de ortaya çıkabilirler. Oysa beta parçacıkları sürekli bir spektrumda enerji dağılımına sahiptirler.

Beta ışınları alfa ışınlarından daha giricidir, oluşturdukları iyonlaşma ise alfa parçacıklarına göre daha azdır. Hızları alfa ışınlarından daha fazladır ve 1 MeV enerjili beta ışınları havada 3 m yol alabilir. Cilt ve giysiler beta ışınlarını zırhlamada yetersiz kalır. Beta parçacıklarının enerjileri 0,5 ile 5 MeV arasında değişir. 4 MeV enerjili betaların ancak %9'u pamuklu kumaş tarafından tutulabilir. Alüminyum, beta ışınları için ideal bir zırh maddesidir. Kauçuk, plastik, cam, perspeks gibi maddeler de beta ışınlarının zırhlamasında kullanılan maddelerdir.

### **2.1.1.3 Gama ışınları**

Çekirdek bir alfa veya bir beta parçacığı çıkarttıktan sonra genellikle kararlı bir durumda olmaz. Fazla gelen çekirdek enerjisi bir elektromanyetik radyasyon halinde yayınlanır. Gama ışınlarının kaynağı atomun çekirdeğidir. Bu ışınlar atom çekirdeğinin enerji seviyelerindeki farklılıklardan meydana gelir. Gama ışınları maddeden geçerken elektronları serbest bırakırlar ve bu elektronlar elektrik yükü taşıdıklarından iyonizasyon oluştururlar. Gama ışınları alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. 1 MeV enerjili gama ışınlarının şiddeti 3 mm kalınlığında bir kurşun tabakası ile ancak yarısına inebilir. X-ışınları ile benzer özellik gösterirler.

X ve gama ışınlarının zırhlanması aynıdır. Kurşun, demir ve beton, X ve gama ışınlarının zırhlanmasında en çok kullanılan zırh malzemesidir. Madde içerisinden geçerken üstel bir fonksiyon şeklinde bir şiddet azalmasına uğrarlar. Yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler.

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2.5)$$

burada;

$\mu$  = sönüm katsayısı (karakteristik),

$x$  = kalınlık,

$I_0$  = dedektörün önünde hiç bir şey yokken elde edilen sayım,

$I$  = plakalar konulmuşken elde edilen sayımdır.

Gama ışınlarının madde ile etkileşerek enerjilerini kaybetmeleri üç temel olayla gerçekleştiğinden, gama radyasyonunun soğurulmasında her bir olayın kendine ait soğurma katsayısı vardır.

$$\mu_{\text{Toplam}} = \mu_{\text{Fotoelektrik}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{Çift oluşum}} \quad (2.6)$$

Bu üç olayın foton enerjilerinin aralıkları şöyledir:  $\sim 0,01$  MeV'den  $\sim 0,5$  MeV'e kadar fotoelektrik olay,  $\sim 0,1$  MeV'den  $\sim 10$  MeV'e kadar Compton saçılması baskındır. Elektron-pozitron çift oluşumu ise  $1,02$  MeV'den başlayarak artan gama enerjisiyle başlar.

#### **2.1.1.4 X-ışınları**

X-ışınları ilk olarak 1895'te William Roentgen tarafından keşfedilmiştir. Dalga boyu  $0,05 \text{ \AA}$  ile  $100 \text{ \AA}$  aralığındadır. Enerjisi yüksek olduğu için gericilik özelliğine sahiptir. İnsan vücudundan, ince katı maddelerden ve diğer birçok opak maddelerden kolayca geçebilen elektromanyetik dalgalardır. Farklı bileşimdeki, yoğunluktaki ve kalınlıktaki maddelerden geçerken farklı soğrulurlar. Biyolojik reaksiyonlar meydana getirdikleri için yaşayan bir hücreyi öldürebilir ve genetik değişime uğratabilirler.

X-ışınları, dalga-tanecik özelliği gösterirler. Fotoelektrik absorpsiyon, Compton saçılması, gaz iyonizasyonu ve sintilasyon, tanecik özelliğine; hız, refleksiyon, polarizasyon ve Rayleigh saçılması ise dalga özelliğine örneklerdir.

X-ışınlarının diğer özellikleri; gazları iyonlaştırmaları, sıvıların ve katıların elektriksel özelliklerini etkileyebilmeleri, fotoğraf filmini karartmaları, fotoelektron ve saçılan elektronlar ortaya çıkarmaları, her yönde doğrusal olarak ışık hızıyla yayılmaları, elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmemeleri olarak sıralanabilir. X-ışınları sürekli ve kesikli bir spektrum şeklinde yayınlanırlar ve görünür spektrum bölgesinde değildirler. Bu ışınlar, Fe, U ve Pb gibi yüksek atom numaralı ağır elementlerce çok iyi soğurulurlar.

X-ışınları ikiye ayrılır;

- Birincil X-ışınları,
- İkincil X-ışınları.

*Birincil X-ışınları*; atomun iç yörüngelerinde (veya enerji seviyelerinde) elektron boşlukları oluşması sonucunda, üst yörüngelerden alt yörüngelere elektron geçişi sırasında enerjinin foton yayımlanması ile uzaklaştırılması sonucu oluşur.

Yörüngede elektron boşlukları oluşturmanın temel yedi yolu vardır:

- a) Elektronlar ile bombardıman,
- b) Protonlar, döteronlar, alfa-parçacıkları veya parçacık hızlandırıcılarından gelen parçacıklarla bombardıman,
- c) Tüplerden birincil X-ışınları ile,
- d) Radyoizotoplardan yayılan alfa, beta, gama ve diğer X-ışınları ile,
- e) Hedef elementten yayınlanan ikincil X-ışınları ile,
- f) Kendiliğinden uyarılma ile,
- g) Doğal radyoaktif bozunma.

*İkincil X-ışınları*; hedefe gönderilen hızlandırılmış elektron demeti hedefe yaklaşırken hedef atomlarını uyarırlar. Bu uyarılma sonucunda Coulomb etkileşimleri artar, gönderilen elektronlar tarafından tıpkı bir aracın otoyolda giderken aniden frene basması gibi bir etki verir ve X-ışınları oluşur. Bu tip ışınlar “frenleme radyasyonu” ya da “Bremsstrahlung” denir [5].

### 2.1.2 İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar madde ile etkileştiğinde maddeyi iyonize etmeyen radyasyonlardır. Maddenin sıcaklığını artıran kızıl ötesi ışınlar ve yüksek dozları kansere sebep olan mor ötesi ışınlar örnek olarak verilebilir.

## **2.2 Radyasyon Dozu ve Birimleri**

### **2.2.1 Radyasyon dozu**

Doz, herhangi bir maddenin belli bir zaman içerisinde kullanılan veya tüketilen miktarı demektir. Radyasyon dozu ise hedef kütle tarafından, belli bir sürede, soğurulan veya alınan radyasyon miktarıdır. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde, belli bir sürede belli bir miktarın (kabul edilebilir sınırların) üzerinde radyasyon enerjisi soğuran yani radyasyon dozu alan canlılarda bazı zararlı etkilerin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu etkinin büyüklüğü ise ancak, radyasyon çeşidi, soğuruş hızı ve soğurulan radyasyonun miktarı bilindiği zaman mümkündür. Bütün bu faktörler bilindiğinde radyasyonun insan sağlığı veya diğer canlı ve cansız varlıklar üzerinde bırakacağı etki kolayca belirlenebilir.

### **2.2.2 Radyasyon birimleri**

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) radyasyon çalışmalarında kullanılan kavramlar olan aktivite, ışınlama dozu, soğurulma dozu ve doz eşdeğeri için özel birimler tanımlamıştır. Bunlar sırasıyla; Curie (Ci), Röntgen (R), rad ve rem'dir. Bu özel birimler, 1986 yılından itibaren terk edilmeye başlanmış ve yerine tüm dünyada kullanılan birimlerin aynı olması düşüncesi ile MKS sistemini esas alan "Uluslararası Birimler Sistemi (SI)" kullanılmaktadır. Aynı kavramlar için SI birimleri sırasıyla Becquerel (Bq), Coulomb/kg, Gray (Gy) ve Sievert (Sv) olarak seçilmiştir. Tablo 2.3'de radyasyon terimleri ve doz hesaplamalarında kullanılan özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki topluca verilmiştir. Bu çalışmada Röntgen, Sivert, Gray ve Becquerel birimleri kullanılmıştır.



**Tablo 2.3** Radyasyon terimleri ve özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki [1]

TERİM	BİRİMİ		DÖNÜŞÜM
	ESKİ	YENİ	
AKTİVİTE	Curie (Ci); $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma/1saniye	Becquerel (Bq); 1 parçalanma/1 saniye	$1\text{Ci}=3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$ $1\text{Ci}=37\text{GBq}$
İŞINLANMA DOZU	Röntgen (R); normal hava şartlarında ( $0^\circ\text{C}$ ve 760 mm Hg basıncı) havanın 1kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb'luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya $\gamma$ radyasyonu miktarıdır.	Coulomb/kilogram (C/kg); normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında 1 Coulomb'luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya $\gamma$ radyasyonu miktarıdır.	$1\text{C/kg}=3876\text{R}$ $1\text{R}=2,58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$
SOĞURULMUŞ DOZ	Radiation dose (rad); ışınlanan maddenin 1 kg'ında $10^{-2}$ Joule'lük enerji soğurulması meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır.	Gray (Gy); ışınlanan maddenin 1 kg'ında 1 Joule'lük enerji soğurulması meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır.	$1\text{Gy} = 1\text{J kg}^{-1}$ $1\text{Gy}=100\text{rad}$ $1\text{rad}=0,01\text{Gy}$
DOZ EŞDEĞERİ	Röntgen equivalent man (rem); 1 Röntgenlik X veya $\gamma$ ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. $\text{rem}=(\text{rad}) \times (W_R)$	Sievert (Sv); 1 Gy'lık X ve $\gamma$ ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır. $\text{Sv}=(\text{Gy}) \times (W_R)$	$1\text{Sv}=100\text{rem}$ $1\text{rem}=0,01\text{Sv}$

Radyasyonun bir sistemde oluşturacağı değişiklikler soğurulan enerjiye bağlıdır. Ancak biyolojik bir ortamda gözlenen değişimlerinde başka faktörlerin de önemi vardır. Öyle ki farklı tip radyasyonlardan soğurulan enerjiler eşit olsa da bunlardan kaynaklanan biyolojik etkiler farklı olabilir. Yani biyolojik etki sadece soğurulan doza bağlı değildir. Bu gerçekler yeni birimin tanımlanmasını gerekli kılmıştır. Bu da rad cinsinden soğurulan dozu, biyolojik etkiyi hesaba katarak bir takım faktörlerle çarparak elde edilir. Bu yeni birime röntgenin insan eşdeğeri olarak “rem” adı verilir. 1

röntgenlik X ve gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarı olarak tanımlanmıştır.

$$\text{rem} = \text{rad} \times \text{faktörler (W}_R\text{)}$$

Aslında radyasyonun hücre yapısında yaptığı değişiklik, radyasyonun geçtiği birim yol boyunca kaybettiği enerjiye bağlıdır. Buna Lineer Enerji Transferi (LET) denir. LET değeri, sadece iyonlaştırıcı radyasyonun tipine bağlı olmayıp aynı zamanda enerjisine de bağlıdır. LET değerinin etkisi, verilen doz eşdeğeri formülünde RBE denilen bir faktör kullanılarak hesaplanır. RBE, belirli bir etkiyi oluşturan 250 kV'lık X-ışınları dozunun aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyonun dozuna oranıdır [12].

**Tablo 2.4** Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörleri [12]

IŞIMA	RBE
$\gamma$ ve X	1
e, $\beta$	1
P	10
$\alpha$	20
Hızlı nötronlar (> 10 keV)	10
Yavaş nötronlar (< 10 keV)	3

## 2.3 Radyasyon Kaynakları

### 2.3.1 Doğal radyasyon kaynakları

İnsanoğlu varoluşundan bu yana sürekli olarak radyasyonla iç içe yaşamak zorunda kalmıştır. Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan çok uzun ömürlü

(milyarlarca yıl) radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmuşlardır. Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin büyüklüğünü belirleyen bir çok neden vardır (Şekil 2.6). Yaşanılan yer, bu yerin toprak yapısı, barınılan binalarda kullanılan malzemeler, mevsimler, kutuplara olan uzaklık ve hava şartları bu nedenlerden bazılarıdır. Yağmur, kar, alçak basınç, yüksek basınç ve rüzgâr yönü gibi etkenler de doğal radyasyon seviyesinin büyüklüğünü belirler.

Doğal radyoaktiviteden; çekirdek yapısının açıklanmasında, yaş tayininde, sediment oluşum oranlarının tespiti gibi farklı alanlarda faydalanılır. Çevresel doğal radyoaktivitenin bilinmesi, nükleer kaza esnasında çevrenin hangi oranlarda kontamine olduğunun tespiti açısından oldukça önemlidir. Doğada bilinen radyonüklit sayısı 340 civarındadır. Dört doğal radyoaktif seri (toryum, uranyum, aktinyum, neptünyum) vardır.

Doğal radyasyon kaynakları genel olarak iki ana grupta toplanırlar;

- Kara kökenli,
- Uzay kökenli.

a) Kara kökenli radyasyon kaynakları;

- Uranyum serisi ( ${}_{92}\text{U}^{238} \rightarrow {}_{82}\text{Pb}^{206}$ ),
- Toryum serisi ( ${}_{90}\text{Th}^{232} \rightarrow {}_{82}\text{Pb}^{208}$ ),
- Aktinyum serisi ( ${}_{92}\text{U}^{235} \rightarrow {}_{82}\text{Pb}^{207}$ ),
- Tek izotoplu radyonüklitler (K-40, Rb-87, Sm-147 v.s.),
- Neptünyum serisi (Pu-241); bu serinin halen bilinen tek izotopu Bi-209 dur.

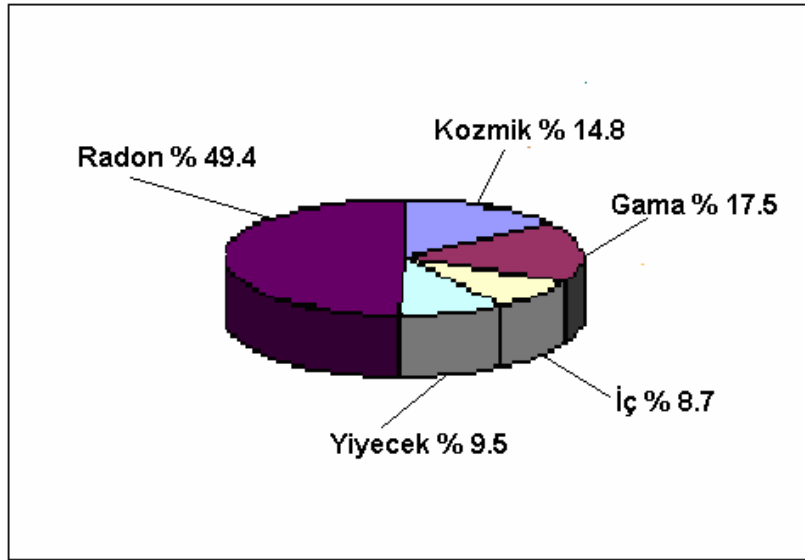
Vücuda sindirim yoluyla alınan radyoizotopların başında  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ 'nun bozunma ürünleri ve çok az oranlarda  ${}^{14}\text{C}$  ve  ${}^3\text{H}$  gelir. İnsan, vücudunda bulunan radyoaktif elementlerden, özellikle Potasyum-40 radyoaktif elementinden dolayı belli bir radyasyon dozuna maruz kalır. Potasyum, doğada, diğer radyoizotoplardan daha

fazla oranla bulunmaktadır ve vücutta yaşamsal öneme sahip bir elementtir. 70 kg ağırlığındaki yetişkin bir insanda 140 miligram potasyum bulunur.

b) Uzay kökenli radyasyon kaynakları;

- Kozmik ışınlar,
- Yüklü parçacıklar.

Kozmik radyasyonlar, değişik yüklerde ve farklı enerjilerde yayımlanan parçacık veya elektromanyetik ışınlardan ibarettir, kökenleri de farklıdır. Yoğunlukları atmosferin üst tabakalarından deniz seviyesine doğru inildikçe azalmaktadır. Uzaydan gelen birincil ışınların bir kısmı atmosferin alt tabakalarına, bir kısmı ise yüksek dağların tepelerine kadar ulaşmaktadırlar. Mezonlar deniz seviyelerine kadar inerler. Bu ışınlara maruz kalma yüksekliğe göre değişmektedir.



**Şekil 2.2** Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri [13]

### 2.3.2 Yapay radyasyon kaynakları

Doğal radyasyonların yanı sıra, hızla ilerleyen teknolojinin getirdiği insan yapımı (yapay) radyasyon kaynaklarından da ışınlanmakta olduğumuzu biliyoruz. Yapay radyasyon kaynaklarından en önemlileri;

- Nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintiler,
- 1986 Çernobil kazasından türeyen serpintiler,
- Nükleer reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler,
- Tıpta uygulanan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları,
- Bilim ve teknoloji uygulamalarında kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarıdır.

### 2.4 Sularda Radyoaktivite

Sulardaki radyoaktivite, ya doğaldır veya insanların bu suların bulunduğu yöredeki etkinliklerinden ileri gelmektedir. Bu doğal radyoaktivite, ortam sayması olarak o yörenin karakteristiğidir.

Genellikle yüzeysel suları için doğal radyoaktivite alfa aktivitelerinde, 1 pCi/lt'den ve beta aktifliklerinde ise 20–50 pCi/lt'den küçüktür. Bu alfa ve beta aktifliklerine, gama aktiflikleri de eşlik edebilir.

Su içinde, katyon (pozitif yüklü iyon) ve anyon (negatif yüklü iyon) olarak erimiş tuzlar bulunmaktadır. En yaygın erimiş katyonlar, sodyum ( $\text{Na}^+$ ), kalsiyum ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnezyum ( $\text{Mg}^{+2}$ ) ve potasyum ( $\text{K}^+$ )'dur. Klorür ( $\text{Cl}^-$ ), bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) ve sülfat ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) ise yaygın olarak bilinen anyonlardır [1].

Yeraltı sularında birçok radyoaktif kirletici element bulunmaktadır. Ancak, bu radyoaktif elementler radyasyon sağlığı bakımından önemli sayılabilecek

konsantrasyonlarda değillerdir. Yeraltı suları, diğer ismi ile derin dolaşımli sular, alt tabakalarda fazlaca bulunan volkanik ve granit kayalarıyla etkileşirler. Genellikle volkanik kütleler içinden geçen suların radyoaktivite konsantrasyonları, tortul kütleler içinden geçen sulara nispeten daha yüksektir. Bu nedenlerle yeraltı suları yüzey sularına göre daha fazla radyoaktiftir [14].

Sularda en fazla uranyum ailesi elemanlarından radyum ve radon bulunmaktadır. Radyum suda kolay erir ve yeraltı sularına kadar ilerleyemeden toprak tarafından çok hızlı bir şekilde soğurulur. Bu nedenle yeraltı sularında radyum konsantrasyonu,  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu ile karşılaştırıldığında çok daha azdır [15]. Radyum vücuda alındığında kemiklerde birikerek omuriliği sürekli ışınlamaktadır [16]. Radon, toprak ve kayalardan yayılma ile suya karışmaktadır. Bu nedenle suda ölçülen radon, sadece suyun içerisinde bulunan radyumdan kaynaklanmamakta, aynı zamanda suyun geçtiği yerlerdeki toprak ve kayalarda bulunan radyumdan da ileri gelmektedir [17]. Sudan gelen radonun miktarı sudaki miktarına bağlıdır. Yapılan çalışmalar  $370 \text{ BqL}^{-1}$  radon konsantrasyonuna sahip bir suyun ev için radon konsantrasyonuna katkısının  $37 \text{ mBqL}^{-1}$  olduğunu ortaya koymuştur [18]. Suyun sıcaklığı arttıkça ortama verilen radon miktarı da artar [19,20]. Evdeki alışkanlıklar duş, çamaşır ve bulaşık makinesi gibi suyun püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktar radon salınmasına neden olur [17].

Sularda uranyum ailesi elemanlarından başka, toryum ailesi elemanlarından toryumun kendisi  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{228}\text{Ra}$  da bulunur. Diğer bozunma ürünlerinin yarıömürleri düşük olduğundan insan sağlığına etkileri önemsizdir. Yine toprakta doğal olarak bulunan Potasyum-40 ve Rubidyum-87 de yayınladıkları beta ışınlarıyla, suların toplam beta radyoaktivite konsantrasyonuna katkıda bulunur [17].

1945–1980 yılları arasında atmosferde yapılan nükleer bomba denemeleri ve reaktör kazaları sonucu havaya salınan radyoaktif maddeler, havada gaz, organik bileşimler ve inorganik aerosollar (örn. toz parçacıkları) halinde bulunur. Bu maddeler kuru serpinti ve yağışlarla, radyoaktif yağışlar halinde yavaş yavaş yeryüzüne inerek çevre ve sonuçta su kirliliğine neden olmaktadır. Toprak üzerinde yapılan çalışmalarda, yağışlarla orantılı olarak farklı bölgelerde farklı miktarlarda Cs-137 ve

Sr-90 radyoizotopları ölçülmektedir. Çernobil reaktör kazası sonucunda toprakta biriken Cs-137 miktarı nükleer bomba denemeleri sonucu biriken miktarın 5 katı, Sr-90 miktarı ise %10'u düzeyinde kalmıştır. Çernobil kazası sonrası havada ve alınan yağmur örneklerinde yapılan radyoizotopik çalışmalar, havada I-131, Cs-137, Te-132/I-132, Ba-140, La-140, Ru-103, Sr-90 gibi radyoizotopların varlığını ortaya koymuştur. Sularda ve toprakta yapılan çalışmalarda, sulardaki radyonüklit konsantrasyonlarının toprak yüzeylerindeki kadar çok daha az olduğu, suların içilmesi ve sularda yaşayan balık vs. canlıların yenmesiyle alınacak dozların solunum yoluyla alınacak dozlardan çok daha az olduğu bulunmuştur [21]. Nükleer denemelerin 1980'li yılların başından itibaren yasaklanmasıyla radyoaktif yağışların etkinliği de oldukça azalmıştır [17].

Nükleer enerjinin başta elektrik üretimi olmak üzere tıp, endüstri, tarım ve araştırmalarda çok geniş bir kullanım alanı vardır. Bu gibi tesislerden çıkan radyoaktif atıklar, gerekli önlemler alınmadığı takdirde çevre kirliliğine ve sonuçta içme suyu kaynaklarının radyoaktif kirlenmesine neden olacaktır [17]. Bu amaçla uluslararası kuruluşlar (IAEA, WHO, ICRP gibi) içme sularında kalıcı radyoaktivite olarak tanımlanan toplam alfa, beta ve özellikle  $^{226}\text{Ra}$  radyoaktivite konsantrasyonları için limit değerler saptamışlardır [9].

İçme sularının radyoaktivite değerlerinin tespiti son derece önemlidir. Bu nedenle son yıllarda içme sularındaki radyoaktivitenin bilinmesi zorunlu olmuştur. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün, 1984 yılında yayınladığı tavsiye limitlerine ve Türk Standartlar Enstitüsü (TSE)'nün 1984 yılında TS266 ve İSKİ'nin 1984 yılında yayınlanan içme suyu standartına göre, içme suyu için tavsiye edilen radyoaktivite sınırları, toplam alfa için  $0,1 \text{ Bq L}^{-1}$  ve toplam beta için  $1,0 \text{ Bq L}^{-1}$  olarak kabul edilmiştir. Bu limit değerler Sağlık Bakanlığı tarafından 18 Ekim 1997 tarihinde yayınlanan Doğal Kaynak, Maden ve İçme Suları ile Tıbbi Suların İstihali Hakkındaki Yönetmelikte değiştirilerek, doğal kaynak ve içme suları için toplam alfa radyoaktivitesi  $0,037 \text{ BqL}^{-1}$  ve toplam beta radyoaktivitesi ise  $0,37 \text{ BqL}^{-1}$  limitlerine indirilmiştir. Maden suları için ise bu sınırlar toplam alfa için  $0,1 \text{ BqL}^{-1}$  ve toplam beta için  $1,0 \text{ BqL}^{-1}$  olarak kabul edilmiştir [22].

## 2.5 Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Radyasyonun insan sağlığı üzerinde yaratabileceği zararlı etkilerine; radyasyon yanıkları, radyasyon hastalıkları, doğal ömür süresinin kısılması, kanser ve kalıtsal bozukluklar örnek olarak verilebilir [23].

İnsanlar ve diğer tüm canlılar bu radyasyonlara, dış ışınlamalarla maruz kaldığı gibi solunum ve sindirim yoluyla vücutlarına alarak iç ışınlamalarla da maruz kalmaktadırlar. Bu radyasyonlara dışardan maruz kalınmışsa buna dış ışınlama, içeriden maruz kalınmışsa, buna da iç ışınlama denir. Gama ve betalar dış ışınlamalarla, alfalar ise iç ışınlamalarla daha çok zarar verirler [1].

İyonlaştırıcı radyasyonun bir canlıda biyolojik bir hasar yaratabilmesi için radyasyon enerjisinin hücre tarafından soğurulması gerekir. Bu soğurma sonucu hedef moleküllerde iyonlaşma ve uyarılmalar meydana gelir. Bu iyonlaşmalar, hücrenin genetik bilgilerini taşıyan DNA zincirlerinde kırılmalara ve hücre içerisinde kimyasal toksinlerin üremesine neden olurlar. Kırılmaların hemen ardından bir onarım faaliyeti başlar. Hasar çok büyük değilse DNA’da meydana gelen kırılmalar onarılabilir. Ancak bu onarım esnasında da hatalar oluşabilir ve yanlış şifre bilgiler içeren kromozomlar meydana gelebilir. DNA düzgün onarılmadığı takdirde, hücre ya bozuk bir metabolizma ile sağ kalacak ya da ölecektir [24–26].

Hasarlı hücre kaybı belli bir sayının üzerine çıktığında organ veya dokularda, dolayısıyla ışınlanan kişilerde gözlenebilir hasarlar meydana gelecektir. Etki eşiğini aşan akut doz almış kişilerde ortaya çıkan bu tür hasarlara “deterministik” etkiler denir [24,25].

Radyasyonun verdiği hasar sonucu hücre ölmüyor ancak değişikliğe uğruyorsa bu hücredeki hasar genellikle onarılır. Onarım mükemmel olarak gerçekleşmediği takdirde değişim yavru hücrelere aktarılacak ve er geç ışınlanan kişinin organ veya dokularında kanser oluşumuna yol açacaktır. Eğer değişim genetiği etkilerse kişinin kendisinde veya çocuklarında meydana gelen bu tür etkilere “stokastik (tesadüfi)” etkiler olarak adı



verilir. Vücutun bazı bölgeleri diğerlerine nazaran daha meyilli olsa da, radyasyon hemen hemen her doku ve organda kansere yol açabilir [24,26].

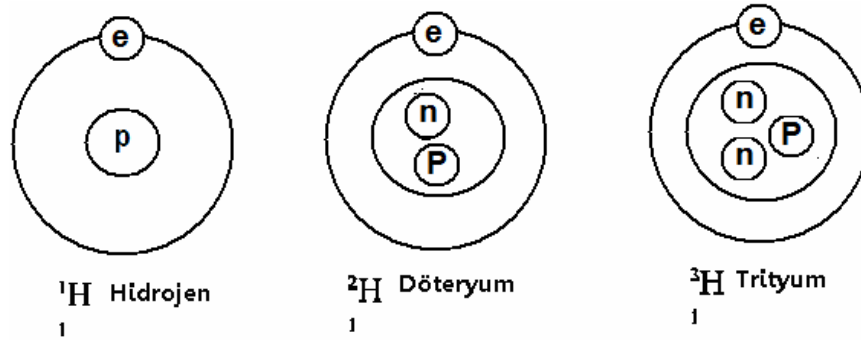
Birleşmiş Milletler'in radyasyonun etkileriyle ilgili çalışmalar yapan bir kuruluşu olan United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili mevcut verilere dayanarak radyasyon kaynaklı kanser için bazı risk tahminleri türetmiştir. Bu tahminlere göre, 1 Sv'lik akut doza maruz kalmış her yaştan ve her cinsiyetten insanların oluşturduğu bir grup için, kanserden dolayı ölüm riskinin erkeklerde %9, kadınlarda %13 olduğu öne sürülmektedir. Çocuk grupları arasında, 0–5 yaşındakiler 10–14 yaşındakilere göre beş kat daha duyarlıdır [26].

Doğal radyasyon düzeyini arttıran en önemli sebeplerden biri, yer kabuğunda yaygın bir şekilde bulunan radyoaktif radyum elementinin ( $^{226}\text{Ra}$ ) bozunması sırasında salınan “radon gazı”dır. Bu gaz teneffüs edildiği takdirde akciğerlere geçici olarak yerleşip tüm dokuların radyasyona maruz kalmasına neden olabilmektedir. Radon konsantrasyonu coğrafik yerleşime, zamana, yerden yüksekliğe ve meteorolojik şartlara bağımlı olarak değişiklikler göstermektedir. Doğal gaz, evlerde ısıtma ve yemek pişirmede kullanıldığında da radon gazı ortaya çıkarak, ev içi radon seviyesini artırır. Eğer yanma ürünleri havalandırma ile dışarı atılırsa, radon kaynağı ihmal edilir [25].

## BÖLÜM 3

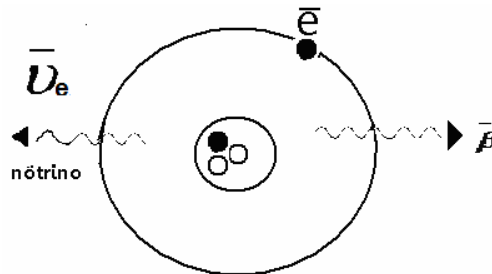
### TRİTYUM

Bir elementin atom numarası aynı fakat kütle numarası farklı atomlarına “izotop” denir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi hidrojenin üç izotopu vardır.



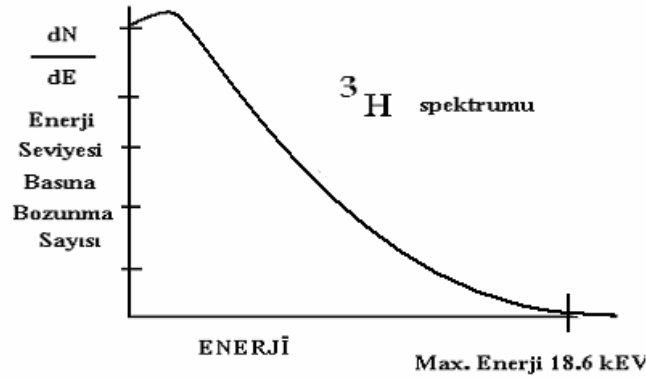
Şekil 3.1 Hidrojenin izotopları [27]

Üçüncü izotop olan trityum, çekirdeğindeki nötron fazlalığı nedeniyle radyoaktif özellik gösterir, bir beta parçacığı ile bir antinötrino ( $\bar{\nu}_e$ ) yayınlarken bozunur (Şekil 3.2) ve aşağıdaki bozunma reaksiyonuna göre kararlı  ${}^3\text{He}$  atomuna dönüşür [27].



Şekil 3.2 Trityumun radyoaktif bozunması [27]

Tritiyumun yarı ömrü 12,32 yıldır [28]. Tritiyum çekirdeğinden yayınlanan enerjinin maksimum değeri 18,6 keV olup, beta parçacığı ile nötrino arasında rastgele bölüşülür. Bu nedenle beta parçacıklarının enerjisi 0–18,6 keV arasında herhangi bir değere sahip olabilir (Şekil 3.3). Dolayısıyla beta spektrumu süreklilik gösterir [27–29].



Şekil 3.3 Tritiyumun beta bozunumu [27]

Tritiyum nükleer bombaların patlamasını başlatan nükleer reaksiyonun başlangıcında kullanılır ve bazı ışıldayan cihazların, boyaların, bina giriş çıkış kapılarının kontrolünü sağlayan cihazların yapısında ve çeşitli bilimsel araştırmalarda kullanılır. Tritiyum ticari amaçla reaktörlerde üretilir [29].

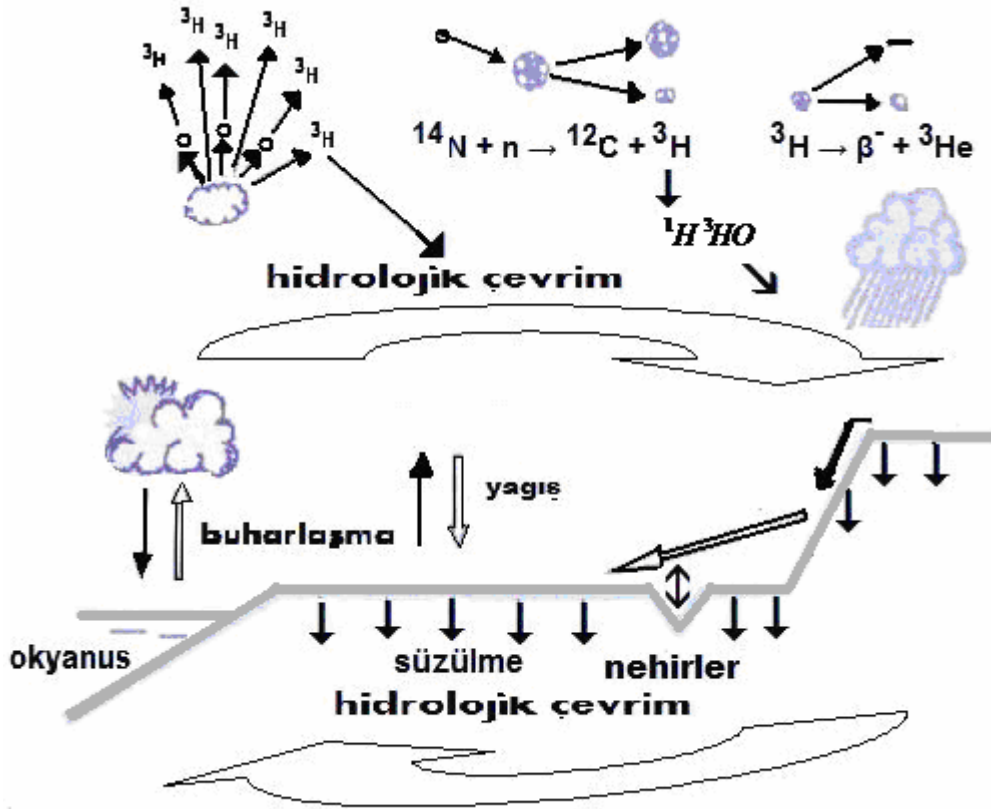
### 3.1 Çevresel Tritiyum

Tritiyum yağışlara iki kaynaktan girerek hidrolojik çevrimde yerini alır ve “çevresel tritiyum” olarak adlandırılır;

1. Atmosferin üst tabakalarındaki azot atomlarıyla kozmik nötronların etkileşmesinden doğal olarak oluşur:



Trityum hidrolojik çevrime Şekil 3.4’de gösterildiği gibi  $^1\text{H}^3\text{HO}$  şekline yükseltildikten sonra girer [30].



Şekil 3.4 Trityumun oluşumu [28]

Trityumun atmosferdeki kalış süresinin çok küçük olmasından dolayı doğal olarak oluşum hızı da çok küçüktür. Trityumun atmosferdeki bu doğal oluşum hızının  $0,25 \text{ atom/cm}^2\text{s}$  olduğu tahmin edilmektedir [27]. Bu yolla trityum konsantrasyonu, coğrafi konuma bağlı olarak 5–20 TU (trityum birimi) civarındadır. Trityum yağışlara karışarak yeraltına geçtikten sonra uzun yıllar yeraltında bekler ve başka bir yeni suyla karışmazsa konsantrasyonu zamanla azalır [27,28].

Sulardaki doğal trityum konsantrasyonu Bq/L ya da trityum birimi (TU) olarak verilir. Trityum konsantrasyonunun Bq-TU ilişkisi  $1 \text{ TU} = 1 \text{ Trityum atomu}/1 \times 10^{18}$

hidrojen atomu=3,19 pCi/L=0,118 Bq/L olarak verilmektedir. Yani,  $1 \times 10^{18}$  hidrojen atomuna karşı bir trityum atomunun bulunması “1 trityum birimi (TU)” olarak tanımlanır [17,18]. 1 TU = 0,11816 Bq/kg’dır [27].

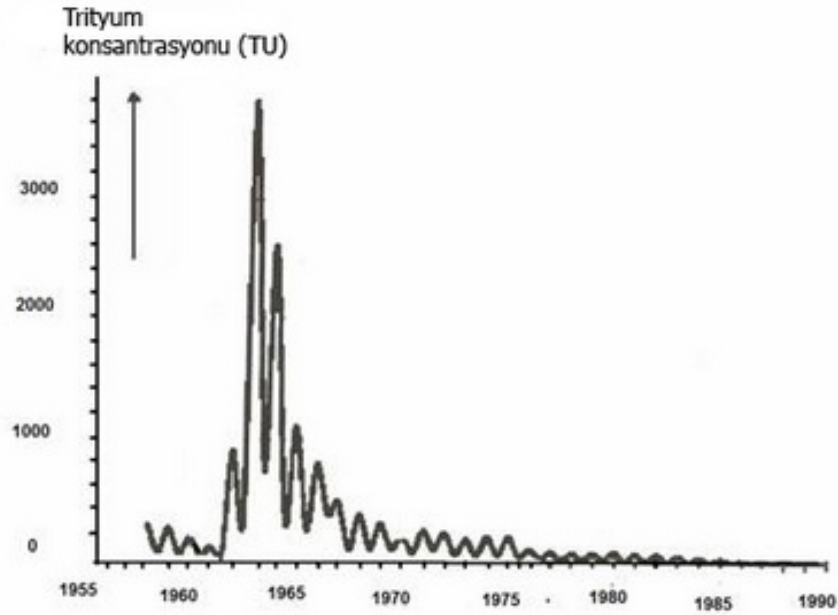
Yağışlara girerek suyun hidrolojik çevrimine katılan trityum, hidrolojide çeşitli sorunların çözümünde doğal izleyici olarak kullanılmaktadır.

## 2. Nükleer çalışmalar sonucunda yapay olarak oluşur.

1952–1962 yılları arasında yapılan termonükleer denemelerle atmosfere yüksek miktarda trityum enjekte edilmiştir. Kuzey yarım kürenin atmosfer tabakasının enjekte edilen yüksek miktardaki trityumun aşamalı olarak troposfer tabakasına geçmesiyle 1953 yılından sonraki yağışların trityum konsantrasyonunda artış gözlenmiştir [27,28].

Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) ve Dünya Meteoroloji Organizasyonu işbirliğiyle yağışlardaki izotop kompozisyonunu belirlemek amacıyla kurulan meteoroloji istasyonlarından en fazla kaydı bulunan Kanada’nın Ottawa Meteoroloji istasyonundan toplanan yağış numunelerinde yapılan trityum analiz sonuçlarından bu artışı görmek mümkündür. Ottawa yağış istasyonundan alınan yağış numunelerinin ağırlıklı ortalama trityum konsantrasyonlarının yıllara göre değişimi Şekil 3.5’de görülmektedir [27,28].

1953 yılında trityum konsantrasyonu 26 TU iken, 1954 yılında 287 TU’ya çıkmış ve bu artış 1963 yılında 2900 TU’ya kadar ulaşmıştır. Kuzey yarım kürede 1963 yılındaki yağışlarda trityum konsantrasyonunun maksimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir. 1963 yılında imzalanan bir antlaşmayla bu denemeler durdurulduktan sonra trityum konsantrasyonunda üstel olarak bir azalma gözlemlenmiştir. 1967–1980 yılları arasında; Çin Halk Cumhuriyeti ve Fransa’nın yapmış olduğu sınırlı denemelerle atmosfere çok miktarda trityum enjekte edilmiştir. 1968 yılından 1971 yılına kadar yağışlardaki trityum konsantrasyonu bu nedenle hemen hemen sabit kalmıştır. 1972 yılından sonra termonükleer denemeler öncesi değerlere doğru azalmaya devam etmektedir [27].



**Şekil 3.5** Tritiyum konsantrasyonunun yıllara göre değişimi [27]

Türkiye’de Ankara, Antalya ve Adana yağış istasyonları IAEA’nın kurduğu şebekeye dâhildir. Kuzey yarım kürede 1963 yılındaki artış üç istasyonda da gözlemlenmiştir. Ankara, Antalya ve Adana yağış istasyonlarından 1963 yılında alınan numunelerin trityum konsantrasyonlarının ağırlıklı ortalamaları sırasıyla 2585 TU, 710 TU, 1150 TU’dur. Viyana yağış istasyonu ile hemen hemen aynı paralellikte azalmaya devam etmektedir [30].

Yağışlardaki trityum konsantrasyonu aşağıdaki etkiler altında değişmektedir:

- a) Tritiyum konsantrasyonundaki maksimum değer, bahar ve yaz aylarına ait yağışlarda gözlemlenmektedir. Bu olay “bahar enjeksiyonu” olarak adlandırılır. Yapılan araştırmalar yaz yağmurlarının kış yağmurlarından daha fazla ağır izotop içeriğine sahip olduğunu göstermektedir [31]. Yağışların ağır izotop içerikleri meydana getirdikleri buharın ağır izotop içeriğine göre yüksektir. Yağışlarda meydana gelen ağır izotop zenginleşme miktarı sıcaklık ile ilişkilidir. Sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda ağır izotop zenginleşmesi daha fazladır. Sıcaklık fazla olduğu zamanlarda düşmekte olan yağmur

damlalarının düşme esnasında yeniden buharlaşması daha fazla olacaktır. Buharlaşma esnasında hafif izotopik grupların öncelikle buharlaşması, düşen yağmur damlalarının ağır izotop zenginleşmesini artırır. Bu nedenle kış aylarında düşen yağmur damlalarının ağır izotop içerikleri, yaz aylarında görülen yağmurların ağır izotop içeriğine göre daha fakirdir. Kuzey yarım küredeki yağışların trityum konsantrasyonu genellikle Haziran aylarında, Güney yarım kürede ise Eylül aylarında maksimum değere ulaşır [27,28].

- b) Karasal bölgelerdeki yağışların trityum konsantrasyonu okyanus bölgelerinkinden daha yüksektir. Bunun nedeni, okyanuslardan oluşan su buharının daha soğuk olan kara üzerine hareketleri esnasında ardı ardına yoğunlaşması neticesinde oluşan yağmurların ağır izotop içeriklerinin kendisini oluşturan atmosferik buhara göre zenginleşmesine karşılık kendisinden önceki yağışlara göre ağır izotop bakımından fakirleşmesidir. Kısaca okyanus ve denizlerden kara içlerine gidildikçe daha fakir izotop içeriğine sahip yağışlar görülmektedir [27,28].
- c) Trityum konsantrasyonu coğrafi enlem dereceleri ile değişir. Stratosferden troposfere doğru olan trityum enjeksiyonunun kutup bölgelerinde daha yoğun olması nedeniyle trityum konsantrasyonu Güney yarım küredeki nazaran daha fazladır. Bunun nedeni Kuzey yarım kürede denizlerin alanının karaların alanına oranının Güney yarım küredekinden küçük olması ve nükleer denemelerin daha çok Kuzey yarım kürede yapılmış olmasıdır [27].

### 3.2 Trityumun Ölçümü

Trityum  $^3\text{He}$  kütle spektrometresinde ve atomik kütle spektrometresinde (AMS) ölçülebilir. Numune  $^3\text{He}$  kütle spektrometresinde ölçüm için ilk önce bütün gazlardan arıtılır ve  $^3\text{He}$ 'un trityum bozunmasından elde edilmesi için bir süre bekletilir. Daha sonra  $^3\text{He}$  soygaz kütle spektrometresi ile ölçülür.  $^3\text{He}$  kütle spektrometre yöntemi LSC'den daha hassastır, dedeksiyon limiti  $0,5 \text{ mBq mL}^{-1}$ 'dir.  $^3\text{He}$  metodunun esas dezavantajı numune hazırlığındaki yöntemin karmaşıklığı ve uzun analiz süresidir [32].

Atomik kütle spektrometresi de trityum tespitine yönelik hassas bir yöntemdir dedeksiyon (algılama) limiti olarak 1 mBq (veya  $^3\text{H}/\text{H}^1$  oranı için  $1 \times 10^{-13}$  ile  $1 \times 10^{-15}$ ) sınırı bildirilmiştir. Bu yöntemin temel yararı, biyolojik numunelerin analizi için oldukça uygun olan küçük numunelerin (2 mg hidrojen) analizidir. AMS yönteminde, trityum ilk önce numuneden serbest bırakılır, daha sonra metal üzerinde soğurulan hidrojen gazına dönüştürülür (örneğin Ti) ve sonra da AMS ile ölçülür. Bu yüzden AMS'nin numune hazırlığı LSC ile karşılaştırıldığında daha karmaşıktır. Trityum tespiti için AMS uygulaması oldukça sınırlıdır. Rutin analizlerde, LSC hâlâ, çevresel numunelerde trityum tespiti için en sık kullanılan yöntemdir [32].

Sıvı sintilasyon sayaçlarında daha önceki yıllarda aşağıya çekilemeyen dedeksiyon limitinin, elektronik teknolojisindeki gelişmeler sayesinde çok küçük değerlere indirilmesiyle, atmosferde doğal olarak oluşan trityumun bu sayaçlarla dedeksiyonu mümkün olmuştur. Ayrıca, bu teknikte kullanılan numune hazırlama yönteminin gaz sayma tekniğindeki nazaran daha kolay ve çabuk olması, Sıvı Sintilasyon Sayma Tekniğinin bütün dünyada yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Katı numunelerdeki trityum saptamasına yönelik olarak trityumu THO (trityum hidroksit)'e dönüştürmek için, LSC ile ölçülen yanma (combustion) yöntemi kullanılır [32].

### 3.3 Trityumun İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Trityumun çevrede davranışı, değişik sistemler arasında transferi ve insana geçişi ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Trityum su ve süt gibi sıvı gıdalarla alınarak bütün vücutta dolaşım sağlayabilir, havadan gaz formu solunumla alınabilir ve ayrıca deriden soğurulabilir. Trityumun biyolojik yarı ömrü 12 gündür. İnsan sağlığı açısından, gaz halinde suda çözünürlüğünün az olması nedeniyle daha az zararlı olduğu, içinde  $10^{-6}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  trityum bulunan havanın bir hafta içinde 48 saat teneffüs edildiğinde insan vücudunda yaklaşık 200  $\mu\text{Ci}$  trityum biriktiği ispatlanmıştır. Yapılan deneyler trityumun hayvan karaciğer hücrelerinde aberasyona, kemik iliği hücrelerinde

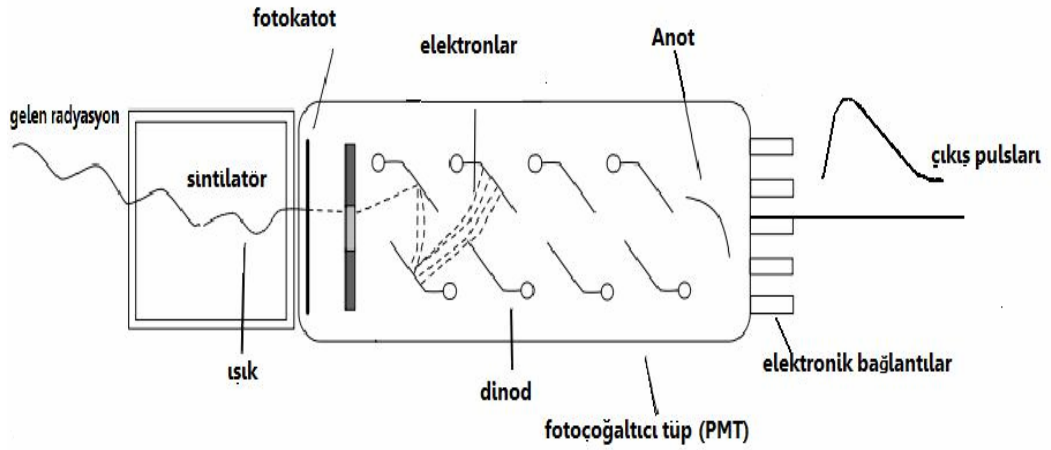


sitolojik zararlı etkiye neden olduğunu, DNA sentezini yavaşlattığını ve çeşitli doku hücrelerinde ölümlere neden olduğunu ortaya koymuştur. Kansere yol açar ancak diğer radyonüklidlere göre daha az tehlikeli radyonüklittir; çünkü zayıf beta yayınlar ve vücudu erken terk eder. Herkes doğada var olan az miktarda trityuma maruz kalmaktadır [29].

## BÖLÜM 4

### SİNTİLYASYON DEDEKTÖRLERİ

İyonlaşma sonucu oluşan elektronlar elektronik pulslarla oluşan elektronlarla aynı değildir. İyonlaşma elektronuyla puls elektronları arasında bir aracı vardır, bu ışıktır. Sintilyasyon sayaçlarında meydana gelen işlemler Şekil 4.1 incelenerek anlaşılabilir [5].



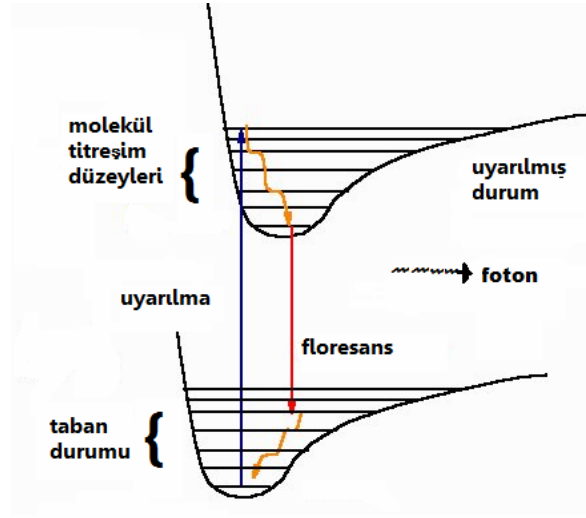
Şekil 4.1 Sintilyasyon dedektörlerinde temel işlemler [33]

Bu işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1. Gelen radyasyon dedektöre girer ve etkileşmeler yaparak atomları uyarır,
2. Uyarılmış durumlar hızla, görünür bölgede (veya görünür bölgeye yakın) ışık yayınlılar,
3. Işık foto duyarlı yüzeye çarparak foton başına en çok bir elektron salınmasına neden olur,
4. Bu ikincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları şekline dönüştürülür [5].

Cisimlerin enerji soğurduktan sonra görünür ışık bölgesinde veya ona yakın bölgede foton adı verilen ışık parçacıkları çıkarmasına “lüminesans” denir. Bu olayın esası kısaca şöyle açıklanabilir: Katı veya sıvı bir ortamdan geçen yüklü parçacıklar

ortamın atomlarını uyarır (excitation). Uyarılan atomlar tekrar taban seviyelerine dönerken ışık fotonları verirler. Uyarılmış atom sayısı ortam içinde yüklü parçacığın kaybettiği enerjiyle orantılı olup foton sayısı da yine bu enerjiyle orantılıdır. Taban duruma geçerken meydana gelen bu lüminesans olayı floresans, fosforesans ve geç floresans şeklinde olmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Elektronik yapı [37]

Uyarılma esnasında  $1 \times 10^{-8}$  saniye içinde ışık salınması oluyorsa bu olaya “floresans”, ışık salınması uyarılma kesildikten sonra da oluyorsa bu olaya “fosforesans” denir. Fosforesans süresi mikro saniye ile saat arasında, lüminesans maddenin cinsine göre değişir. Basit uyarılmış durumdan taban duruma geçişte salınan ışık floresans şeklindedir. Daha karmaşık uyarılma şekli olan triplet uyarılmada ise fosforesans meydana gelir. Ancak, kuantum mekaniğine göre bu durumdan taban duruma doğrudan geçiş zor olduğundan fosforesans olayına seyrek rastlanır. Triplet durumda uyarılmış atomun bu seviyede kalma süresi uzun olup uyarılmış atom ekseri önce basit uyarılmış duruma geçmekte ve sonra taban seviyeye inmektedir. Bu çeşit taban duruma geçişlerde geç floresans görülür [27].

#### 4.1 Sintilatörler

Lüminesan maddeye *sintilatör* denir. Sintilatörler katı, sıvı ve gaz halinde olabilir. Genel olarak; atom uyarılması sonucu gözle görülen bölgede veya ona yakın bölgede ışık yayımlayan kristal veya amorf maddelere “sintilatörler” denir [27,5].

İdeal bir sintilatör; parçacıkların kinetik enerjilerini yüksek sintilasyon verimi ile algılanabilir ışığa çevirmeli, lüminesans süresi hızlı pulsların üretilmesi için kısa olmalı, iyi bir optik kalitesinde olmalı ve boyutu dedektör için uygun büyüklükte olmalıdır [34].

Sintilatörler genel olarak birincil ve ikincil sintilatörler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çözelti hacminin %0,3-1’inde yer alan birincil sintilatörler, yakalanan enerjinin ışık yayılımına dönüştürülmesini sağlamaktadır. Yayılan ışık, fotoçoğaltıcı tüpün (PMT) özellikleri ile her zaman eşleşmediği için, ikincil sintilatörler veya diğer bir adıyla “dalga boyu düzenleyiciler” kullanılır. İkincil sintilatör, fotonları soğurur ve dalga boylarını, fotoçoğaltıcı tüpün tepki alanına yönelik uygun hale getirmek için kaydırır. Geçirgenliği sağlamak için tek kristale gerek vardır; kristal yüzeyindeki yansımalar ve soğurmalar çok kristalli sintilatörü kullanışsız hale getirir [35,36]. Sintilatörler;

- inorganik sintilatörler ,
- organik sintialtörler,
- gazlı sintilatörler olmak üzere üç çeşittir [35].

Bir sintilatörün çalışmasını anlamak için, enerjinin soğurularak, elektronların uyarılmış durumlara çıkmasıyla ilgili mekanizmayı göz önüne almamız gerekir. Organik sintilatörlerde (katı veya sıvı olabilir) moleküller arası etkileşmeler nispeten zayıftır ve bunların özellikleri moleküllerin kesikli uyarılmış seviyeleri cinsinden tartışılabilir. Bir molekülün enerji soğurabileceği iki yol vardır: elektronlar daha yüksek uyarılmış duruma geçirilebilirler ve moleküldeki atomlar titreşebilirler. Tipik bir

titreşim enerji aralığı 0,1 eV iken elektronik uyarılma enerjileri için bu birkaç eV civarındadır [5].

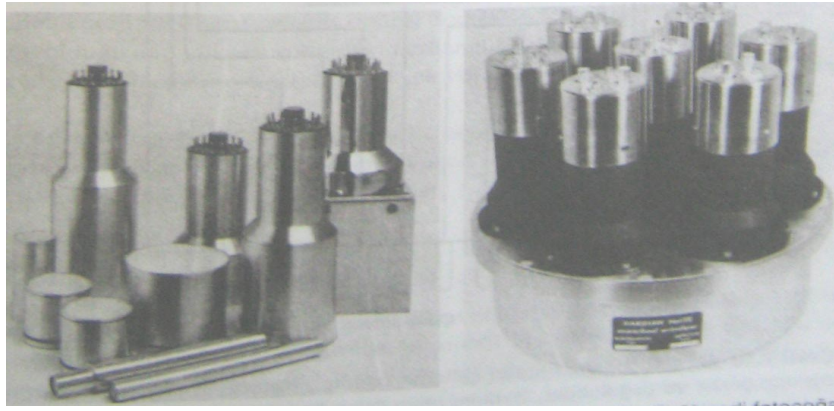
Elektronik durumlar moleküller arasındaki çekim ve itme kuvvetlerinin ortak etkisiyle oluşan bir minimum potansiyel ile temsil edilir. Çekim kuvveti moleküllerin birbirinden daha fazla ayrılmalarını, itme kuvveti ise daha fazla yakınlaşmalarını engeller (Pauli ilkesi gereği atom dalga fonksiyonlarının örtüşmesine izin vermez). Minimum elektronik potansiyel molekül atomlarının birbirine göre titreşmesinden kaynaklanan bir dizi titreşim düzeyinden meydana gelir [5].

Uyarılmış elektronlar genellikle materyale kuvvetli bir bağ ile bağlı değildir. Benzenin halka yapısı gibi, aromatik hidrokarbonlarda karbonun dört değerlik elektronunun 3'ü hibritleşmiş yörüngelerdedirler ve bunlara  $\sigma$  yörüngeleri denir. Bunlar her karbon arasına kuvvetli şekilde yerleşmiştir. İki komşu karbon ve tek bir hidrojen,  $\pi$  yörüngesi denilen yörüngede bulunan 4. elektronun yerleşimi böyle değildir ve  $\sigma$  elektronları kadar kuvvetli şekilde bağlanma işlemine katılmazlar. Bu  $\pi$  elektronları sintilasyon işlemine en çok cevap verenlerdir [5].

Işık çıktısının büyüklüğü ve yayılan ışığın dalga boyu, her sintilatörün en önemli iki özelliğidir. Işık çıktısı, fotoçoğaltıcı tüpün girdisinde üretilen fotoelektronların sayısını etkilemektedir. Numune hacminin azaltılması bu sinyallerin azalması anlamına gelir. Sintilatörü uygun fotoçoğaltıcı tüple eşleştirmek için dalga boyu hakkındaki bilgi gereklidir. Sintilatörün ışık çıktısı sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterir [35].

Bir sintilatörün fotoçoğaltıcı tüple birleştirilmesi çeşitli yollarla yapılabilir. Bazı dedektör–tüp sistemleri tek birim halinde satın alınır. NaI(Tl) dedektörleri, kırılma indisinde nispeten düzgün bir değişim sağlamak ve iç yansımayı en aza indirmek için saydam “optik-yağ” kullanarak PM tüpünün camı ile doğrudan temas edecek şekilde yerleştirilebilir. Fotoçoğaltıcının geometrisi, bazen sintilatör geometrisinden çok farklıdır veya birtakım deneylerde sintilatör fotokatotdan belirli bir uzaklıkta olmalıdır

(örneğin, manyetik alan etkilerini yok etmek için). Bu durumda bir “ışık borusu” kullanılır; ışık boruları herhangi bir büyüklük veya şekilde olabilir. Lucite, kuvars, pleksiglas (plastik cam) ve cam gibi şeffaf bir maddeden yapılır. Hem sintilatör hem de ışık borusu, toplanan ışığın verimini artırmak için yansıtıcı bir madde ile sarılmalıdır. Şekil 4.3 bir sintilasyon dedektörü, ışık boruları ve PM tüpleri seçimini göstermektedir [5,35].



**Şekil 4.3** (Sol) Bazı fotoçöğaltıcı tüplerle birleşik NaI sintilatörleri (Sağ) Yedi çöğaltıcı büyük NaI dedektörü [5]

#### 4.1.1 İnorganik sintilatörler

İnorganik sintilatörlerden en yaygın kullanılanı bir alkali metallerin tek kristalidir. NaI(Tl), CsI(Tl), CaI(Na), LiI(Eu) ve CaF<sub>2</sub>(Eu) örnek olarak verilebilir. Parantez içindekiler safsızlık ya da aktivatördür. Buna rağmen aktivatör nispeten küçük bir konsantrasyondadır. NaI bunlar arasında en çok kullanılanıdır [35].

Foton yayınlanma olasılığını artırmak ve ışığın kendisinin soğurulmasını azaltmak için kristale *aktivatör* denilen küçük miktarda safsızlıklar ilave edilir. En çok kullanılan aktivatörlerden biri talyumdur ve böyle bir dedektör NaI(Tl) şeklinde gösterilir. Aktivatör, enerji aralığında durumlar meydana getirir ve bu aktivatör durumları arasında ışık yayılımı oluşur. NaI’de 303 nm dalgaboylu ışık yayınlarken NaI(Tl) 410 nm’lik

ışık yayınlanır. Dalgaboyundaki morötesi bölgesinden görünür bölgeye değişim, pek çok fotoçoğaltıcı tüpün maksimum duyarlılığı ile uyuşur [5].

Belirli inorganik sintilatörlerin önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

- **NaI(Tl):** Çoğunlukla gama ışınları için kullanılan bir sintilatördür. Yarı iletken dedektörler daha iyi enerji çözünürlüğüne sahip olduğu halde büyük dedektör hacimleri gerektiği zaman NaI(Tl)'ün yerini alamazlar. NaI(Tl)'ün emisyon spektrum piki 410 nm, ve ışık-dönüşüm (light conversion) verimi inorganik sintilatörlerin en yükseğidir. Bir materyal olarak, NaI(Tl) birçok istenilmeyen özelliğe sahiptir. NaI daima az bir miktarda potasyum içerir bu durum radyoaktif  $^{40}\text{K}$  nedeniyle belirli bir background yaratır, kırılımandır ve sıcaklık gradyentlerine duyarlıdır. Yarı iletken dedektörler iyi bir enerji çözünürlüğüne sahip olmasına rağmen büyük dedektör hacimleri gerekli olduğu zaman  $\gamma$ -ışınları için NaI(Tl) iyi bir seçimdir [5,35].
- **CsI(Tl):** CsI(Tl), NaI dan daha yüksek atom numarasına ve daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle  $\gamma$ -ışınları dedeksiyonunda NaI(Tl)'den daha yüksek verim sağlar. Işık-dönüşüm verimi oda sıcaklığındaki NaI(Tl)'ün yaklaşık %45'i kadardır. CsI(Tl)'ün emisyon spektrumu 420 ile 600 nm arasında uzanır. NaI'ya göre daha yumuşak olması nedeniyle şoklara, ivmelere, titreşimlere, yüksek sıcaklık gradyentlerine, ani sıcaklık değişimlerine daha uygunluğu açısından uzay araştırmaları deneylerinde kullanılır ve CsI  $^{40}\text{K}$  içermez [35].
- **CsI(Na):** Yoğunluğu ve atomik numarası CsI(Tl) ile aynıdır. Işık-dönüşüm verimi NaI(Tl)'ün yaklaşık %85'i kadardır. Emisyon spektrumu 320–540 nm arasındadır [35].

- **CaF<sub>2</sub>(Eu):**  $\beta$  parçacıkları ve X-ışınları için düşük gama duyarlılığı ile etkin bir sintilatördür. Öğütülerek ve parlatılarak istenilen geometrik şekle getirilebilir. Çözünmezliği ve hareketsizliği sıvı izotoplar içeren ölçümler için uygundur. Işık-dönüşüm verimi NaI(Tl)'ün yaklaşık %50 si kadardır. Emisyon spektrumu 405–490 nm arasındadır [35].

#### 4.1.2 Gazlı sintilatörler

Gazlı sintilatörler soygazların karışımıdır, oldukça kısa bozunma zamanları vardır. Soygazlar tarafından yayımlanan ışık ultraviyole bölgesine ait olduğu için, azot gibi diğer gazlar ana gaza dalga boyu düzenleyici olarak eklenir. Floresans maddenin ince tabakalar halinde iç tabakalara sürülmesi ile de aynı verim elde edilir. Gama dedeksiyonu için düşük verim sağlar. Ağır parçacıkların (alfalar, fisyon parçacıkları vb.) enerji ölçümüne uygundur [35].

#### 4.1.3 Organik sintilatörler

Organik sintilatörler, kristal ve sıvı sintilatörler olmak üzere iki gruba ayrılır. Etkin organik sintilatör materyalleri aromatik bileşiklerdir. Benzenoid halkalarını oluşturan planar moleküllerinden oluşur. Organik sintilatörler uygun bileşiklerin birleşimiyle şekillenir [35].

İnorganik ve organik sintilatörler arasındaki en önemli fark yanıtlanma süresidir; inorganik sintilatörler için yanıtlanma süresi  $\sim 1$   $\mu$ s iken organik sintilatör için 10 ns'den düşüktür [35].

##### 4.1.3.1 Organik kristal sintilatörler

Organik kristallerin lüminisansını genişletmek için hiçbir aktivatör gerekli değildir. Aslında, hiçbir katıçıklık (impurity) istenmez çünkü varlıkları ışık çıkışını azaltır. Bu nedenle kristal yapımı için kullanılan madde arıtılır.



En yaygın organik kristal sintilatörler antrasen ve trans-stilben'dir [35].

- Antrasen  $1,25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğundadır ve tüm organik sintilatörlerin en yüksek ışık dönüştürme verimine sahiptir; NaI(Tl)'ün ışık dönüşümünün %13'ü civarındadır. Bozunma süresi (~30 ns), inorganik kristallerinkinden daha kısa sürer. Antrasen farklı şekillerde ve boylarda elde edilebilir [35].
- Trans-stilben  $1,15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa ve kısa bozunma süresine sahiptir (4–8 ns). Işık dönüşüm verimi antrasen'in yarısı kadardır. Saydam, renksiz, çeşitli milimetrelere kadar boyu olan tek kristal olarak elde edilebilir. Stilben kristaller termal ve mekanik şoklara hassastırlar [35].

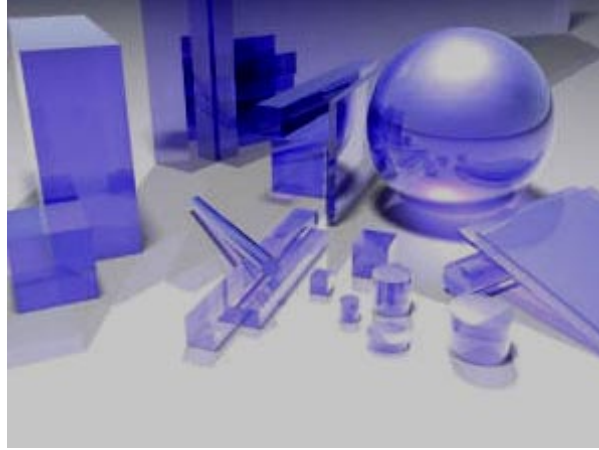
#### **4.1.3.2 Organik sıvı sintilatörler**

Organik sıvı sintilatörler bir ya da daha fazla çözüneni ihtiva eden bir çözücü karışımından oluşur. İyi çözücülüğe sahip bileşenler ksilen, toluen ve heksametilbenzen içerir. Sıvı sintilatörler, verimi artırmak için büyük hacimli dedektöre ihtiyaç duyulan ölçümlerde oldukça kullanışlıdır. Örnekler, düşük aktiviteli  $\beta$  yayıcıların sayımı (özellikle  $^3\text{H}$  ve  $^{14}\text{C}$ ), kozmik ışınların tespiti ve NE 213 sintilatörü kullanılarak MeV mertebesindeki nötronların enerji spektrumlarının ölçümünde kullanılır. Sıvı sintilatörler böylesi ölçümler için oldukça uygundur çünkü büyük miktarlarda kullanılabilirler (kilolitreler); ayrıca uygun kap kullanılarak istenilen boy ve şekilde dedektörlerde kullanılabilirler.  $4\pi$  geometrisini sağladıkları için algılama verimleri yüksektir [35].

#### **4.1.3.3 Plastik sintilatörler**

Plastik sintilatörler (Şekil 4.4) sıvı organik sintilatörlerin katı çözeltisi olarak düşünülebilir. Sıvı organik sintilatörlerinkine benzer özellikler taşırlar fakat sıvılarla karşılaştırıldığında sağladıkları avantaj kaba ihtiyaç duymamalarıdır.

Plastik sintilatörler, ince fiberlerden ince levhalara kadar hemen hemen istenen her tür şekil ve boyda üretilebilirler. Su, hava ve birçok kimyasala karşı eylemsiz (inert)'dirler; bu nedenle radyoaktif numune ile doğrudan temas halinde kullanılabilirler [35].



**Şekil 4.4** Plastik sintilatörler [38]

Plastik sintilatörler ayrıca bir çözücü ve bir veya daha fazla çözünen maddenin karışımıdır. En sık kullanılan çözücüler polistiren (polysterene) ve poliviniltoluendir (polyviniltoluene) [35].

Plastik sintilatörler yaklaşık  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahiptirler. Bozunma süreleri kısadır ve yayılma tayfının maksimum yoğunluğuna karşılık gelen dalga boyu 350 ve 450 nm arasındadır. Yaygın olarak kullanılan ticari plastik sintilatörlerden bazıları Pilot B, Pilot Y, NE 102 ve NE 110'dir [35]

## 4.2 Sönüm (Quenching)

Teknikteki ilk aşama, numunenin uygun bir sıvı sintilasyon solüsyonu içinde diğer maddelerle birleşmesini içermektedir. Problemler genelde bu aşamada ortaya çıkabilirler. Çünkü birçok numune genelde sulu solüsyonlarla hazırlanırken, çoğu sıvı

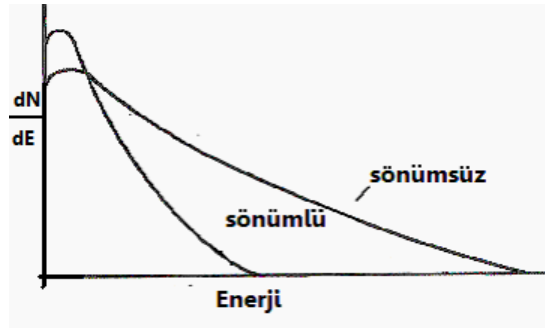
sintilasyon solüsyonları toluen veya diğer organik çözücülere dayanmaktadırlar. Bu nedenle ölçümler için birbirinden farklı yöntemler mevcuttur. Yaygın bir problem *sönüm* (quenching) olarak adlandırılan olayın, çoğu kez sintilatör solüsyonunun içinde etkin bir şekilde birleşebilecek olan numune maddesinin miktarını sınırlandırmasıdır [39].

Bir örnek kabı içine konulan sintilasyon kokteyli, örnek içinde bulunan radyoizotoptan gelen radyasyon emisyonlarını ışığa çevirir. Bu ışık, dedektörün fotoçoğaltıcı tüpüne ulaştığı anda sıvı sintilasyon sayıcısı tarafından dedekte edilir. Fotokatoda üretilen fotoelektron sayısı (puls yüksekliği) gelen foton sayısı ile orantılıdır (örneğin  $^3\text{H}$  için 30 ve  $^{14}\text{C}$  için 300). Quench olayı fotokatoda ulaşan fotonların sayısında azalmaya neden olur, bu nedenle elektriksel puls yüksekliği azalır [34].

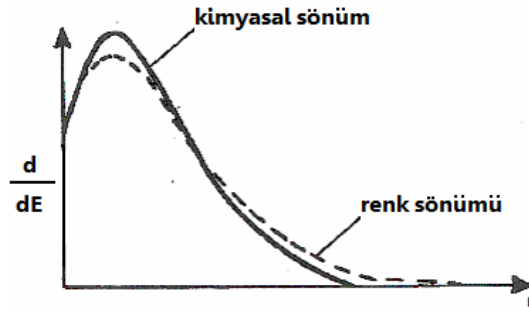
Bu olay enerji spektrumunun (puls yükseklik spektrumu) düşük enerjiye doğru kayması ve sayımda azalmanın gözlenmesi ile anlaşılabilir (Şekil 4.5). Betaların daha düşük enerjili betalarmış gibi dedekte edilmesine neden olur. Yüksek enerjili nüklitlerin ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ , alfa yayınlayıcılar) sayımında çok az bir azalma görülür ancak düşük enerjili nüklitler için ( $^3\text{H}$ ) quench gerçekleştiği zaman sayımdaki azalma ve spectrumdaki kayma büyük olur [36].

Quench, kimyasal (safsızlık), renk ve fiziksel quench olmak üzere üç çeşitte gerçekleşir. *Kimyasal quench* elektronegatif elementler (holojenler) nedeniyle gerçekleşir. Bu elementler elektronları dış yörüngeleri doldurmaya zorlarlar. Böylece bir elektronun yüksek enerjili uyarılmış durumlarına zarar verirler. *Renk quench*'i ışığın, fotonların sintilatörden fotoçoğaltıcı tüpe iletimi sürecinde absorpsiyonudur. *Fiziksel quench*, örneğin fiziksel formu nedeniyle gerçekleşir (Örn. numunenin çökelti ya da parçacık içermesine bağlı olarak ışığın dağılması). Quench azalması gözlenirse quench düzeltilmesi yapılır ve ayrıca spektrum analizleri yapılarak örnek içinde ne tür sönüm ajanının olduğu tespit edilebilir (Şekil 4.6) [36].

Örneğin LSC kullanılarak idrar için trityum analizi yapılırken en büyük problem renk quench'idir. Renk quench'inin nedeni varolan organik bileşiklerdir. Renk quench'i örnekteki organik bileşikler ile sintilasyon kokteylinin floresans emisyonunun üst üst binmesi nedeniyle gerçekleşir. Yani, idrarın doğal sarı rengi, floresansı absorbe ederek sayımı dikkate değer ölçüde azalır. Örnek içindeki idrar miktarı arttıkça quench nedeniyle sayımdaki azalma miktarı da artar [40]. Örneğin renksizleştirilmesi UV ışınlarıyla, hidrojen peroksit ya da benzoyl peroksit eklenmesiyle sağlanabilir [41]



Şekil 4.5 Sönümsüz ve kimyasal- sönümlü spektrumların karşılaştırılması [42]



Şekil 4.6 Kimyasal ve renk sönüm ajanları için puls yükseklik dağılımlarının karşılaştırılması [42]

### 4.3 Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT)

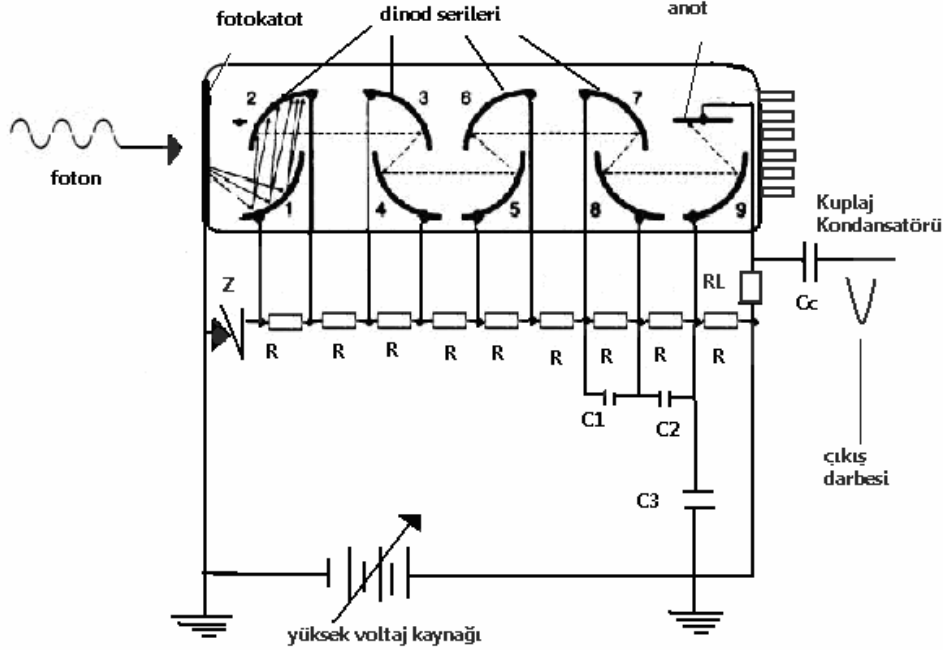
Dedektörde nükleer radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucu oluşan şarj, R direnci üzerinde ani bir voltaj düşüşü meydana getirir. Bu ani voltaj değişikliğine darbe (puls) denir. Darbenin yükselme zaman sabiti dedektörün cinsine, geometrisine ve yükün anotda toplanma zamanına bağlıdır. Alçalma zaman sabiti önyükseltgecin devre elemanları tarafından belirlenmiştir ve değeri birkaç nano saniye ile birkaç mikrosaniye arasında değişir.

Sintilatör ortamından uyarılma sonucu yayınlanan fotonların dedeksiyonunda fotoçoğaltıcı tüpler kullanılır (Şekil 4.7). Temel olarak bir fotokatot, kademeli olarak voltaj uygulanan 8–10 adet dinod denilen elektrottan ve bir toplama elektrotundan (anot) meydana gelmiştir.

Fotokatot, üzerine düşen ışığı (fotonları) fotoelektrik olarak elektronlara çevirmeye yarar. Her fotoçoğaltıcı tüp için oldukça önemli olan parametre, fotokatotunun spektral duyarlılığıdır. En iyi sonuçlar sintilatörün spektrumu ile fotokatotun duyarlılığının eşleşmesi ile elde edilir. Cs-Sb yüzeyi çoğu sintilatörün spektrum tepkisine iyi şekilde uyan 440 nm'deki maksimum duyarlılığa sahiptir. Fotoelektrik akımı çok zayıf olduğundan ölçülebilmesi için çoğaltılması gerekir [27,35].

Çoğaltma işi dinodlar vasıtasıyla yapılır. Dinodlar ikincil elektron yayınlanmasının yüksek olasılıklı olduğu bir maddeden yapılmıştır. Dinodlar bir seri direnç zinciri ile kademeli olarak artan gerilimlerde tutulur. Bir elektron salınması için 2–3 eV yeterli olabilir. Komşu dinodlar arasındaki tipik potansiyel farkı yaklaşık 100 V'dir ve böylece elektronlar dinodlara 100 eV'lik enerji ile çarparlar. Çarpan elektronlar dinoddan dinoda ilerlerken elektron sayısı uygun biçimde çoğalır, böylece elektron sayısında 30–50 çarpanı kadar bir kazanç sağlanabilir. Ancak elektronlar, madde içinde rasgele doğrultularda yayınlandıkları için yüzeyde az sayıda elektron yayınlanacak, her dinoddaki artış 5 çarpanı kadar olacaktır. Böylece fotokatotdan veya önceki bir dinoddan yayınlanan elektronlar, daha çok elektron sökecek kadar enerji kazanacak biçimde, sonraki dinoda doğru hızlandırılırlar. Bu suretle çoğaltılmış

elektronlar, anotta toplanarak RL yük direnci üzerinde bir voltaj darbesi (pulsu) oluşturur [5,27].



Şekil 4.7 Fotoçoğaltıcı tüpün şematik gösterimi [43,27]

Enerji spektrometreleri için iki önemli özellik lineerlik ve kararlılıktır. Lineerlik, son çıkış puls genliğinin, sintilasyon olaylarının sayısı ile dolayısıyla radyasyon tarafından dedektörde depo edilen enerji ile doğru orantılı olması demektir. Her dinodtaki artış, voltaj farkına bağlı olduğu için yüksek voltajdaki herhangi bir değişim çıkış pulslarındaki değişimlere neden olacaktır; bu yüzden yüksek voltaj kaynağının kararlı olması gereklidir [5].

Tüpe uygulanan gerilimin regülasyonu çok iyi olmalıdır. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi son dinodlar arasına yerleştirilmiş olan kondansatörler ve fotokatotla ilk dinod arasındaki zener diyod, elektrotlar arası ön gerilim değişikliklerini engeller. Böylece voltaj stabilizasyonunun daha düzgün olması ve tüpün sabit kazanç altında çalışması sağlanmış olur [27].

Eğer manyetik alan varsa, tüm elektronlar sonraki dinoda çarpmayacak şekilde yönlerini değiştirebilir. Dünyanın zayıf manyetik alanı bile bazen bu istenmeyen etkiye neden olabilir. Manyetik alanın etkisi, fotoçoğaltıcı tüpün  $\mu$ -metal olarak adlandırılan silindirik bir metal levhayla çevrelenmesi suretiyle azaltılabilir.  $\mu$ -metal ticari olarak çeşitli şekillerde ve boylarda mevcuttur [35].

Fototüpün bir diğer önemli parametresi ışıksız akımının (dark current) büyüklüğüdür. Fotoçoğaltıcı tüplerin katodunda kullanılan ışığa duyarlı yüzey maddesi termal enerji soğurulduktan sonra, gerek doğal yapısı gerekse tüpe uygulanan ön gerilim nedeniyle, ışıksız (karanlık) ortamda bile elektron salar. Bu süreç “termiyonik yayılma” olarak adlandırılır ve 50 mm çapındaki fotokatot, oda sıcaklığında 105 kadar elektronu karanlıkta serbest bırakabilir. Bundan dolayı tüp çıkışında istenmeyen elektronik darbeler (elektronik gürültü) oluşur. Katodu serinletmek, sıcaklıktaki her 10–15 °C’lik azalma başına yaklaşık 2 faktörü ile bu gürültü kaynağını azaltır. Termiyonik yayılma, dinotlar ve tüpün cam duvarı nedeniyle de meydana gelebilir fakat bu katkı küçüktür [35].

Elektronik gürültü, nükleer olaylar gibi rasgele karaktere sahiptir ve ölçüm sistemleri tarafından nükleer darbe gibi algılanır. Bu durum özellikle çevresel trityum gibi zayıf aktiviteli radyonüklitlerin dedekte edilmesine engel olur. Gerek kozmik ışınlar gerekse çevresel radyasyonun meydana getirdiği ve adına ortam sayması (veya background) denilen radyasyonun hasıl ettiği sayımlar gerçek nükleer olayın dedekte edilmesine olumsuz katkıda bulunur. Bu husus radyonüklit analizlerinde yanlış değerlendirmelere neden olacağı için önemli olup düzeltilmesi gerekir [27,35].

Çok çeşitli fotoçoğaltıcı tüpler kullanılır; tüp seçimi, fiziksel boyut, gelen farklı dalgaboylu radyasyonlara fotokatodun cevabı, fotokatodun duyarlılığı, kazanç, gürültü seviyesi ve zamanlama karakteristikleri gibi parametreler göz önüne alınarak yapılır [5].

## BÖLÜM 5

### SIVI SİNTİLASYON DEDEKTÖRÜ (LSC)

Sıvı Sintilasyon Sayma Tekniği günümüzde yaygın olarak radyoaktivite miktarının ölçülmesinde ve radyasyonun varlığının araştırılmasında kullanılmaktadır. Bu ölçüm tekniği çekirdek bozunması sonucu oluşan her tür parçacık ve ışınım (alfa ve beta parçacıkları, düşük gama ışınımı, elektron yakalama olayı vb.) algılanmasında uygulanabilmektedir. Sıvı sintilasyon cihazının yüksek sayım verimi ve sayım geometrisi, düşük-seviyeli çevre numunelerini sayma gibi uygulamalara yönelik bazı çekicilikler sunmaktadır [27].

Sıvı sintilasyon sayıcısı;

- Doğal radyoizotop serilerinin ölçümünde (Radyum (Ra), Uranyum (U),  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{231}\text{Pa}$  ve  $^{234}\text{Th}$ ) [44],
- Nükleer güç endüstrisi ile çevreye dağılan genellikle beta yayınlı olan radyoizotopların ölçümünde ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{89,90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$  ve  $^{241}\text{Pu}$ ) [44],
- Radyokarbon ile tarihlemede ( $^{14}\text{C}$ ) [44],
- Yeraltı sularında ve çevresel sularda  $^3\text{H}$  ölçümleri gibi analizlerde [44],
- Rn, Ra, U, toplam alfa/beta analizleri için içme suyu analizlerinde [44],
- Stronsiyum/Tritiyum için yiyecek analizinde [44],
- Radyasyon serpinti çalışmalarında (Sr-90, Cs-137, plutonyum),
- Radyoaktif atık izlemede ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , Pu) [44],
- $^{14}\text{C}$  için yiyecek analizlerinde [44],
- Azaltılmış doz ile biyolojik çalışmalarda ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) kullanılmaktadır [45].

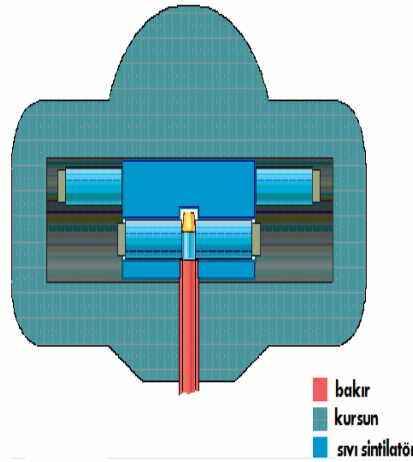
1950'li yıllardan önce sıvılarla etkileşime girecek organik sintilasyon kokteyli geliştirilmediğinden örnekler kokteylin dışına (external LSC) konulup ölçüm yapılırdı. Sıvı sintilasyon sayım sistemleri, çok kanallı analizörler (MCA) ve bilgisayar teknolojisi ile geliştirilerek spektrometrik ve çok detaylı bilgi sunabilme yeteneğine



sahip hale getirilmişlerdir. Bugün bilinen sıvı sintilasyon sayım teknikleri 1953 yılından sonra Hayes ve arkadaşları tarafından geliştirildi. Aynı yıl Packard Instrument Comp. tarafından ticari olarak ilk kez LSC (Packard Tri-Carb Model 314 EX) imal edildi [39,46].

Sıvı sintilasyon cihazları, geleneksel yöntemler kullanılarak düşük enerjili beta parçacıkları veya alfaları ölçerken ortaya çıkan bazı zorlukları önlemek için kullanılabilir. Bazen *dâhili kaynak sıvı sintilasyon sayımı* olarak adlandırılan yaklaşım, numunenin sıvı sintilatör içinde doğrudan sayılması için çözünmesini içerir. Bu şartlar altında, numunenin öz-soğurması (self-absorption), parçacıkların dedektör pencereleri tarafından zayıflatılmaları ve betanın dedektörden geri yansması ile ilgili problemler tamamen önlenir. Bu avantajlar, özellikle  $^3\text{H}$  ve  $^{14}\text{C}$  tarafından yayılan düşük enerjili radyasyonlar için önemlidir. Bu izotoplar özellikle kimyasal ve biyomedikal uygulamalarda önemli oldukları için, sıvı sintilasyon tekniğindeki gelişimin büyük bir kısmı bu bilimlere bağlı olarak meydana gelmiştir. Çözülemez maddeler ise ince parçacıkların süspansiyonu olarak kalabilir. Böylesi durumlarda, bu süspansiyonların hazırlanmasından hemen sonra solüsyonu jele çevirmeyi içeren bazı yöntemler geliştirilmiştir [39].

Dedeksiyon limitini aşağıya çekmek için sıvı sintilasyon cihazının ortam sayımının (background) çok küçük olması gerekir. Bilindiği gibi ortam sayımına kozmik ışınlar, laboratuvarın inşaatında ve cihazın yapımında kullanılan malzemelerin içerdiği doğal radyoaktivite neden olur. Kozmik ışınlardan ileri gelen ortam sayımı coğrafi yükseklikle artar. Kozmik radyasyonun tesiri, ölçüm sisteminde ikincil dedeksiyon devreleri (çakışmazlık devreleri=anticoincidence circuits) kullanmak suretiyle azaltılır. Radyoaktif olmayan asimetric kurşun kaplama (Şekil 5.1) ölçüm pozisyonunda kozmik ışınları zayıflatır. Çevresel radyasyonu tamamen yok etmek mümkün değildir [27,44]



**Şekil 5.1** Radyoaktif olmayan asimetric kurşun kaplama [45]

Sıvı sintilasyon tekniğinin sağladığı avantaj ve dezavantajları şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Radyoizotoplar, uygun bir sintilatör içinde homojen bir dağılım içinde buldukları için  $4\pi$  sayım geometrisinde sayılırlar [46],
- Self-absorbsiyon (öz soğurma) riski yoktur. Beta parçacıklarının menzili kısadır, (1MeV enerjili beta parçacığı için sudaki menzil 0,40 cm) LSC'da beta parçacıkları sıvı sintilatör içinde yakın mesafelere getirilebilir ve diğer metodlardan farklı olarak öz-soğurma olmadan ölçülebilen sintilasyon sağlanır,
- Örnek hazırlama kolay ve çabuktur [32],
- Son yıllarda özellikle beta sayımlarında daha fazla kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan beta yayıcı izotoplar  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  ve  $^{32}\text{P}$ 'dir [34],
- Aynı örnek içinde aynı anda toplam alfa ve beta radyoaktivite değeri saptanabilmektedir [30],
- Belirli uygulamalar için PIPS (passivated implanted planar silicon) ve SSB (Silicon surface barrier) dedektörlerini kullanan geleneksel alfa spektrometri için oldukça yararlı bir alternatif de olabilir. Bununla birlikte, yarı iletken dedektörlere göre daha verimsiz olan LSC çözünürlüğü bir dezavantaj olabilir,
- Alfa sayımlarında alfa radyasyonuna beta ve gamalar da karıştığından alfa sayımları için sıvı sintilasyon tekniği çok fazla kullanılmamaktadır. Sayım cihazlarının geliştirilmesi ve bazı analitik yöntemlerin uygulanması ile bu

problemin çözümüne gidilmektedir. Alfa yayınlayıcılar için ölçümlerden önce alfa yayınlayıcıları ayırmak için kimyasal ayırım yöntemleri kullanılmaktadır,

- Farklı sayım protokolleri kullanılarak farklı örnek tiplerinde (su, hava, idrar, toprak gibi) farklı radyoaktivite değerlendirmeleri yapılabilir.

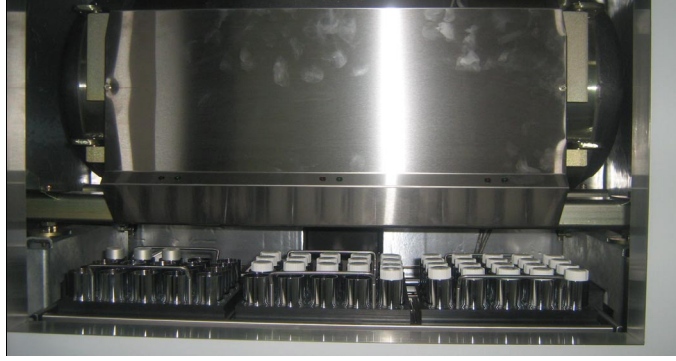
### 5.1 Sayım Kabları (Vialler)

Vialler (numune kapları) genel olarak borosilikat camdan ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  içermeyen) veya yüksek yoğunluklu polietilen ya da polipropilenden yapılmaktadır. Borosilikat camdan yapılmış vialler verim ve ortam saymaları yapılarak seçilmelidir. Özel vialler ise kuvars, teflon veya plastikten imal edilmektedir. Bakır-teflon vialler (Şekil 5.2-sağ) düşük background için uçucu çözücülerde kullanılır. Plastik vialler, rutin analizlerde cama göre daha düşük background'a sahip olması ve çok daha ucuz olması nedeniyle tercih edilirler. Vialler üzerinde oluşan statik elektrik ise cam viallerin kullanımı ile en aza indirilebilir [29]. Ölçümlerimizde kullandığımız sıvı sintilasyon cihazı 20 mL'lik örnek kapları kullanılarak 60 örneği peş peşe değerlendirebilme kapasitesine sahiptir (Şekil 5.3) [45,46].

İçinde sintilatör ile karışmış numune bulunan vialler (Şekil 5.2) sıvı sintilasyon sayma sistemindeki fotoçoğaltıcı tüpler arasına girerek numunelerin sayılmasını sağlar. Bunun için viallerin yüksek foton üretme verimliliği, düşük radyasyon içeren maddelerden yapılmış olmalarını gerektirmektedir [45,46].



Şekil 5.2 (Sol) Cam vialler (Sağ) Bakır-teflon vialler [47,48]



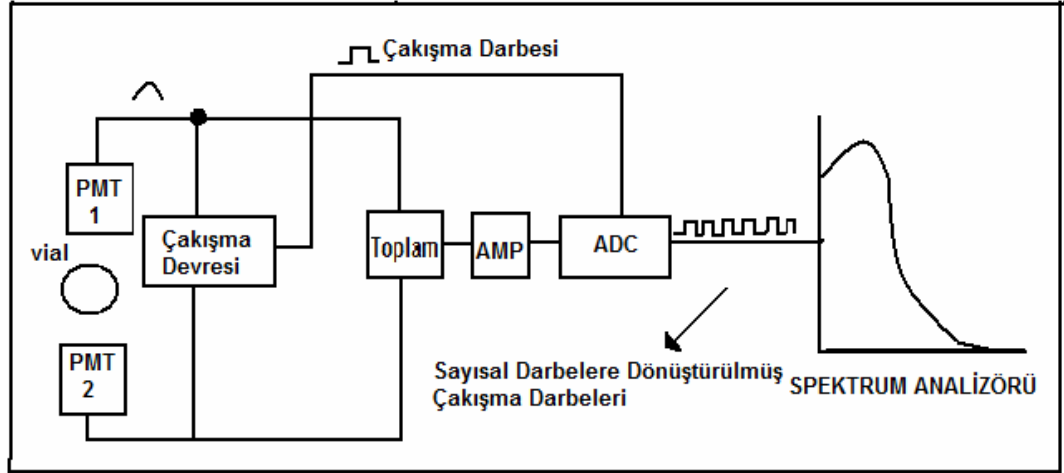
**Şekil 5.3** 60 adet örneğin 20'şerli guruplar halinde tepsilere dizilimi [49]

## 5.2 Sayım Sistemi

LSC; fotoçoğaltıcı tüp, puls amplifikatörü, sayıcı ve kaydedici sistemden oluşur. Bugün bu sistemler çift fotoçoğaltıcı tüp, çok kanallı analizörler ve bilgisayarlı sistemlerden (kaydeden, hesaplayan, spektrumları çizen) oluşmaktadır [27].

Numune tarafından yayılan tüm beta parçacıkları, sintilatörün bazı parçalarından geçtiği ve büyük çoğunluğu solüsyon içinde tamamen durdurulduğu için, sayım en sağlıklı şekilde gerçekleştirilebilir. Tekniğin gelişmesinin ölçümü olarak, fotoçoğaltıcı tüp tasarımında ve diğer tekniklerde uygulanan gelişmelerde olduğu kadar trityumun sayım verimine yönelik gelişmeye de dikkat etmek gerekir [35].

Ölçümler, numunenin sayımına müdahale eden gürültü kaynaklarına oldukça hassastır. Önemli gürültü kaynakları, PM tüpünün fotokatodundan termal olarak üretilen fotoelektronlar, numune-sintilatör solüsyonundaki kimyasal tepkimelerin yarattığı ışık olan kimyasal lüminisans ve sintilatördeki uzun ömürlü fosforesanstır. Hemen hemen bu gürültü kaynaklarının tümü, puls başına sadece bir fotoelektron üretimine karşılık gelmektedir [39].



Şekil 5.4 LSC çalışma düzeneği [28]

Sıvı sintilasyon sayaçlarında kullanılan ilk sistem, çakışan darbe dedeksiyonu (coincidence pulse detection) adı verilen ve karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki adet foto çoğaltıcı tüple birlikte çalışan bir lojik devredir (Şekil 5.4). Her bir tüp içinde meydana gelen gürültü birbirinden bağımsız olacağı için, bu olaylara yönelik tam bir uyuma gözlenemeyecektir. Çakışma devresi fototüplerden çıkan sintilasyon sinyallerini birbirleriyle mukayese eder ve iki sinyal aynı anda oluşmuş (devrenin çözümleme zamanı içinde, 20 ns) ise devre çıkışından darbe (pulse) alınır, böylece radyoizotoptan gelen pulsların yüksek bir verimle sayılmasına olanak sağlanır [28].

Vial içinde rasgele dağılmış olan radyoaktif atomların fototüplere olan uzaklıkları farklı olduğu için yayınlanan fotonlar tüplere farklı şiddette ulaşırlar (foton şiddeti uzaklıkla değişir). Bu olumsuz durum, sayma sisteminde performans azalması yaratır. Zayıf enerjili beta aktif radyonüklitlerin dedeksiyonunda sorun yaratan bu durum ilave edilen darbeler toplamını alan (summation circuit) devreyle yok edilir ve radyoaktif atomların konumu dolayısıyla fototüplere olan uzaklık farklarının önemi kalmaz [28].

Toplama devresi çıkışı ile çakışma devresi bir çakışma kapısı (coincidence gate) vasıtasıyla birleştirilir ve nükleer olayın meydana getirdiği gerçek darbeler ya bir sayıcı-kaydedici ile sayılır ya da bu darbeler genliklerine göre değerlendirilmek üzere spektrum analizörüne gönderilir [28].

### 5.3 Puls Şekil Analizi (PSA) Yöntemi ile Alfa ve Betaların Ayırımı

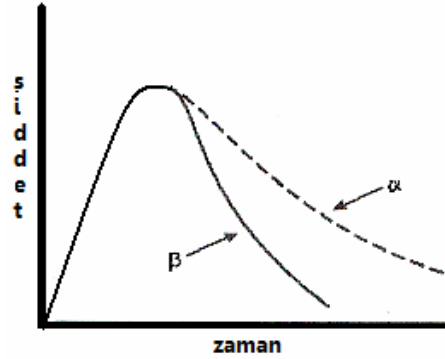
Sıvı sintilasyon sayım cihazı alfa aktif numuneleri saymak için de kullanılabilir. Pek çok alfa parçacığı 2–8 MeV enerji aralığında yayınlanır. Bununla birlikte enerjisinin çoğu doğrudan ışığa çevrilmez, moleküler iyonizasyona sarf edilir. Bu iyonizasyon, ayrışma ve serbest radikal oluşturma olarak, moleküler bozunmayı getirir ve “iyonizasyon sönümü” (ionization quench) adıyla bilinen kısa süreli ürünü ortaya çıkarır. Bu nedenle, 5 MeV enerjili bir alfa parçacığı 500 keV’lik bir enerjiye sahip gibi görünecek ve bütün alfa yayınlayan parçacıklar 200–800 keV aralığında dedekte edilecektir. Bu da alfa parçacıklarının uygun bir sıvı sintilasyon cihazında dedeksiyonuna olanak sağlar [46].

Sıvı sintilatörde absorblanan aynı miktarda alfa radyasyonu, beta radyasyonundan yaklaşık 10 kat daha fazla ışık üretmesi nedeniyle 0,5 MeV enerjili bir beta radyasyonu 5 MeV enerjili bir alfa radyasyonu ile aynı miktarda ışık üretir. Bu, alfa ve beta spektrumlarının çakışması problemini getirir [46].

Dedektörün fotoçoğaltıcı (PMT) anodunda oluşan elektronik pulsların değerlendirilmesiyle alfa ve beta pulsları birbirinden ayrılır. Bu pulslar öncü ve gecikmiş pulslar olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Uyarılmış tekli durumlardan ortaya çıkan ışığın çoğunluğu genellikle süre olarak 2–8 nanosaniye öncü bileşenin içindedir. Büyük oranda üçlü durumların yok edilmesiyle üretilen gecikmeli bileşen yüzlerce nanosaniye sürebilir (>300 ns). Geciken bileşendeki ışığın miktarı parçacık veya bozunma tipine bağlıdır. Beta, gama ve X-ışınları öncü floresansın etkin kaynaklarıdır. Alfa parçacıkları ve nötronlar gecikmiş bileşenlerdir ve elektronlardan daha geniş pulslar üretirler. Alfa pulslarının beta pulslarından daha uzun süreli olması (>30 ns), puls şekil analizi yöntemi ile alfa/beta ayırımının temelini oluşturur. Puls bozunum analizörü, ayırım yöntemine göre pulsları karşılaştırarak pulsun alfa ya da beta olduğuna karar verir. Alfa tipi pulslar alfa çok kanallı analizörüne, beta tipi pulslar da beta çok kanallı analizörüne gönderilir. Bu yolla alfa ve beta pulsları birbirinden ayrılmış olur. İyi bir puls bozunum ayırıcı ayarı için saf beta yayınlayan ve saf alfa yayınlayan iki standart kaynağa gereksinim vardır [46].

PSA'nın en etkin kullanımı alfa sayımına yönelik olmasına rağmen, background ayırımı için de kullanılmaktadır. Cam viallerin background'u, vial ile kozmik veya diğer çevre radyasyonunun etkileşiminden dolayı olan uzun sintilasyon ışık pulsları ayrıca nötron spektrometresindeki gama background'unun kabul edilmemesi gibi geniş ölçüde uygulama alanı bulur. PSA, background'un uzun sintilasyonu ile gerçek beta olaylarının kısa sintilasyonlarını ayırt etmek için kullanılır. PSA değerleri, birçok değer aralıklarına ayarlanabilir [46].

Bu teknikler, puls şekil analizi (*Pulse Shape Analysis=PSA*), puls şekline göre ayırım (*Puls Shape Discrimination=PSD*) veya puls bozunma analizi (*Pulse Decay Analysis=PDA*), olarak farklı cihaz üreticileri tarafından literatürde sıkça bahsedilmişlerdir. Farklı isimler ortaya çıkmaktadır çünkü puls şeklini ayırt etme teknikleri değişebilir, fakat hepsi puls bozunma zamanının bazı açılarını ölçen elektrik devrelerine dayanmaktadırlar [46].



**Şekil 5.5** Bazı alfa/beta enerjilerinin üst üste gelmesi [46]

## BÖLÜM 6

### GEREÇ VE YÖNTEM

#### 6.1. İçme Suları İçin Radyoaktivite Limitleri

17.02.2005 yılında yenilenen TS266 sayılı “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik” hükümleri ve ayrıca, Avrupa Birliğine Üye Ülkelerce esas alınan İnsani Kullanım Amaçlı Suların Kalitesine Dair 98/83/EC sayılı Konsey Direktifince radyolojik parametrelere ait limit değerler Tablo 6.1’de gösterilmektedir.

**Tablo 6.1** *Su radyoaktivite analizinde kullanılan radyolojik parametreler ve limitler [50]*

Parametre	Parametrik Değer	Birim
Tritiyum ( $^3\text{H}_1$ )	$\leq 100$	Bq/L
Toplam gösterge dozu (TGD)	$\leq 0,10$	mSv/yıl
Alfa yayınlıyıcılar ( $\alpha$ )	$\leq 0,1$	Bq/L
Beta yayınlıyıcılar ( $\beta$ )	$\leq 1$	Bq/L

Tritiyum limit değeri 100 Bq/L (839TU) olarak tanımlanmıştır. Bu amaç için analiz talepleri ağırlıklı olarak işletme belgelerini devam ettirmek isteyen içme suyu şişeleme tesislerinden gelmektedir [50].

Bu standard, insani tüketim amaçlı suları kapsar. Maden suyu (TS 9130), içme suyu ve kaplıca suyu gibi şifalı suları, gıda maddesi ile doğrudan teması olmayan sanayide kullanılan suları, tıbbi amaçlarla kullanılan suları ve analitik laboratuvarında kullanılan suları (TS EN ISO 3696) kapsamaz [22].

Standardın amacı bakımından aşağıda verilen terim ve tarifler geçerlidir [22]

a) İnsani tüketim amaçlı su



Orijinal haliyle veya arıtıldıktan sonra bu standarda belirtilen özellikleri sağlayan, genel olarak içme, yemek yapma, gıda maddelerinin hazırlanması (gıda maddelerinin hazırlanmasında gıda maddesi ile doğrudan temas eden sular) vb. amaçlar ile temizlik için kullanılan dere, nehir vb. gibi akarsular, göl, baraj vb. gibi durgun sular ile kaynak (membra) sularıdır.

b) Doğal kaynak (membra) suyu

Jeolojik koşulları uygun jeolojik birimlerin içinde doğal olarak oluşan, bir çıkış noktasından kendiliğinden yeryüzüne çıkarılan, bu standartlarda belirtilen özellikleri orijinal hali ile sağlayan, sıcaklık, debi ve özellikleri mevsimlere göre çok az değişiklik gösteren, yağışlar, yüzey suları ve taban suyundan büyük ölçüde etkilenmeyen, göze, pınar, kuyu, galeri vb. yeraltı kaynaklı sulardır.

c) İşlem görmüş kaynak (membra) suyu;

Jeolojik koşulları uygun jeolojik birimlerin içinde doğal olarak oluşan, bir çıkış noktasından kendiliğinden yeryüzüne çıkan ve teknik yöntemlerle yapay olarak yeryüzüne çıkarılan, bu standartlarda belirtilen özellikleri ancak dezenfeksiyon, filtrasyon, çöktürme, saflaştırma ve benzeri işlemler uygulandıktan sonra ya da özelliklerinin azaltılması veya artırılmasıyla sağlayabilen yeraltı kaynaklı sulardır.

d) İçme ve kullanma suyu

Kaynağına bakılmaksızın orijinal haliyle veya arıtıldıktan sonra bu standartlarda belirtilen özellikleri sağlayan, genel olarak içme, yemek yapma, gıda maddelerinin hazırlanması vb. amaçlar ile temizlik amacıyla kullanılan sulardır.

## 6.2 Örnekleme

Örnek hazırlama hatanın en çok kaynaklanabileceği aşamadır. Analiz için 300 ml örnek yeterli olmaktadır. Ancak analiz sırasında ortaya çıkacak aksamalara karşın 500 ml örneğin laboratuvara ulaştırılması istenmektedir. Örnekleme için suyun temiz polietilen şişeye hava kabarcığı kalmayacak şekilde tamamen doldurulmuş olması gereklidir. Örnek şişeleri açık örnek adı, örnekleme tarihi ve alındığı yeri içerecek

şekilde etiketlenmelidir. Laboratuvara ulaştırılan örnekler analiz sırası gelinceye kadar kapakları açılmadan güneş almayacak şekilde bekletilmektedir. Tritiyum analizi için örneklerin bekleme süresi oldukça uzundur. Örnek yaklaşık 12 yıl bekletilip trityum miktarı yarılansa dahi örnekleme anındaki trityum içeriğinin hesaplanması mümkündür [50].

Laboratuvara ulaştırılan örneğin  $^3\text{H}$  içeriğinin belirlenmesine kadar uygulanan aşamalar aşağıdaki bölümlerde kısaca özetlenmiştir, bu bölümlerde anılan analiz aşamalarında kullanılan çözelti ve standartların anlamları aşağıdaki gibidir [50].

**Ölü Su:** Tritiyum içermediği kabul edilen damıtılmış, su örneğidir. Genel kabul her laboratuvarın kendi yakın çevresindeki  $^3\text{H}$  içeriği sıfır olan bir doğal su kaynağını “ölü su” için kullanması yönündedir. “Ölü su” sadece sayım aşamasında kullanılır [50].

**Laboratuvar Standartı:** Bilimsel amaçlı laboratuvarlar için radyoaktif standart sağlayan kurumlardan temin edilen stok standarttan laboratuvarların kendi ihtiyaçlarını karşılayacak derişimde hazırladıkları  $^3\text{H}$  içeriği bilinen çözeltilerdir. “Laboratuvar Standartı” sayım aşamasında kullanılır. Laboratuvar standartının iyi bir sayma istatistiğine sahip olabilmesi için, trityum konsantrasyonu 15000–20000 TU civarında olması gerekmektedir [50].

**Spike:** Spike olarak adlandırılan çözelti  $^3\text{H}$  analiz sürecinde ve sonrasında oluşacak problemlerin gözlenmesini sağlamak amacı ile kullanılan  $^3\text{H}$  içeriği bilinen çözeltilerdir. Spike olarak hazırlanan çözeltilerin  $^3\text{H}$  içeriğinin 1000–1500 TU arasında olması istenir [50].

### 6.3 Birinci Damıtma

Örneklerin laboratuvarında geçirdikleri ilk işlem bizim “damıtma” (destilasyon) olarak adlandırılan damıtma-saflaştırma-ayrıştırarak arıtma sürecidir. Kaynama dereceleri farklı olan sıvı karışımlarını birbirinden ayırmak ve çözültide bulunan çözücüyü uçucu olmayan bileşenlerinden ayırmak için damıtma işlemi yapılır. Damıtma, numunenin iyonik gücünü azaltmak için, çözülmüş organik karbonu veya bulaşıcı radyonükliti çıkarmak, numunenin kalitesini artırmak, örnekler arasında farklılığa neden olabilecek etkenleri ortadan kaldırmak, sayım sırasında kimyasal bileşikler nedeni ile oluşabilecek hatalı parıldamaların engellenmesini sağlamak için yapılır. Damıtma işlemi ile düşük sıcaklıkta ısıtılarak gaz faza geçirilen örnek, içerdiği kimyasal bileşenlerden ayrıldıktan sonra soğutulup yoğunlaştırılarak sıvı faza dönüştürülür. Damıtılmış su erlenlerde toplanır [27,50].

Damıtma işlemi şu şekilde yapılır:

- 500 mL’lik destilasyon balonuna örnekten ~20 mL koyularak çalkalanır ve dökülür,
- Balona ~300 mL su örneği koyulur,
- Balon ısıtıcıya yerleştirilir,
- Balonun üzerine vigreux kolon (destilasyon köprüsü) takılır ve soğutucuya bağlanır,
- 500 mL’lik şilifli toplama erleni takılır ve silikon tuzaklarla olan bağlantı hortumu yerleştirilir,
- Sistem kontrol edildikten sonra musluk açılır,
- Toplama kaplarının altındaki silikon tuzaklardan çıkan hava kabarcıkları kontrol edilir (hava kabarcığı çıkması gerekir),
- Başlangıçta oluşan destilatın 10–15 mL’si ile toplama kapları çalkalanır ve bu su atılır,
- Isıtıcı kapatılır ve sistemin soğuması beklenir,

- Soğutma suyu kapatılır,
- Erlenlerde toplanan destilat, üzeri örnek kodu ve destilasyon tarihi ile etiketlenmiş kapaklı kahverengi şişelere boşaltılır [27,50].



**Şekil 6.1** *Damıtma sistemi* [49]

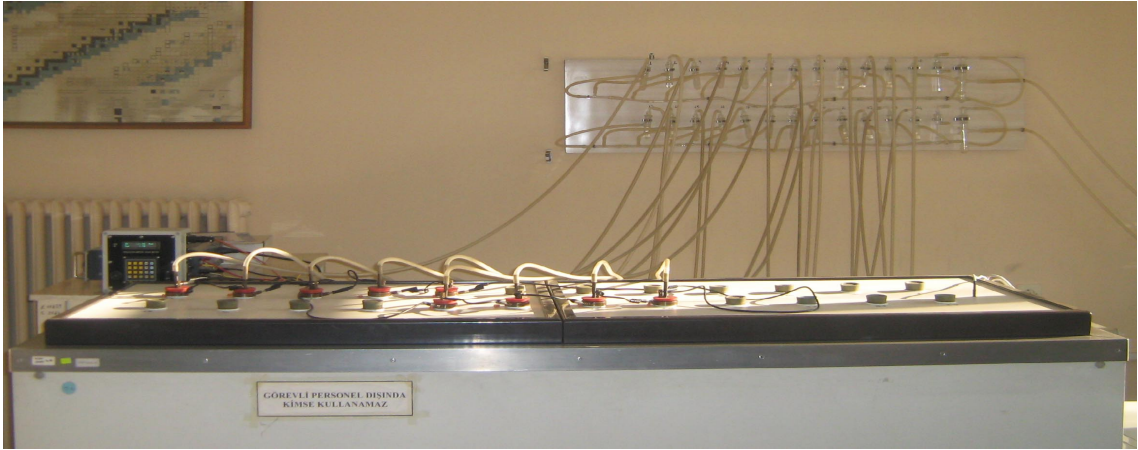
Damıtma sistemi için kullanılan ısıtıcıların ısıtma ayarları en düşük düzeyde tutulmaktadır. Eğer kaynama çok hızlı olursa bazı çözülmüş tuzlar damıtılmış numune içine geçebilir. Damıtma sistemindeki yoğuşurma işlemi, sürekli çeşme suyu ile soğutulan geri soğutucular tarafından sağlanmaktadır. Damıtılmış su ise nuçe erlenlerinde toplanmaktadır. Damıtma işlemine damıtma balonlarında örnek kalmayınca kadar devam edilir. Numunenin atmosferdeki trityumdan etkilenmemesi için sistemde silikonla yağlanmış tuzaklar kullanılır [50].

Damıtma balonlarının tabanında kuruyan tortunun temizlemesi için hidroklorik asit (HCl) kullanılmaktadır. Zaman zaman oluşabilecek farklı karakterdeki tortuların temizliği için farklı asitler ve/veya asit karışımları kullanılabilir. Damıtma sonrasında damıtma sisteminin tüm bileşenleri önce çeşme suyu ardından saf su ile yıkanır ve etüvde kurutulur. Damıtma balonları malzemenin yıpranması ile zaman içinde ya da damıtma sırasında geri dönen damlalar nedeni ile sık sık çatlamaktadır. Çatladıkları

zaman tamir edilmeleri sağlıklı olmayan damıtma balonları trityum analizinin en sık yenilenen malzemesidir [50].

#### 6.4 Elektroliz

Elektrik akımı yardımı ile bir sıvı içinde çözülmüş kimyasal bileşiklerin ayrılması işlemi elektroliz olarak bilinir. Aktiviteleri çok düşük olan çevresel suların trityum konsantrasyonlarının ölçülmesinde yeterli sayım hızına ulaşılabilmesi için trityum içeriğinin zenginleştirilmesine ihtiyaç vardır.  $^3\text{H}$  içeriği bu yöntem ile 10–15 kat zenginleştirerek sayılabilir bir büyüklüğe yükseltilmektedir [27,50].



**Şekil 6.2** Elektroliz sistemi [49]

Elektroliz sistemi; akım kaynağı, elektroliz banyosu, soğutma sistemi olarak adlandırılabilir temel bileşenlerden oluşmaktadır.

Elektroliz sırasında devreden geçirilecek toplam elektrik yükü miktarı aşağıdaki formülle verilir [27]:

$$\text{Toplam elektrik yükü miktarı} = \sum A_i \cdot t_i$$

burada;

$A_i = i$ . Kademe boyunca geçen akım şiddeti (amper)

$t_i = i$ . Kademe için geçen süre (saat) dir.

2 °C’de yapılan bir elektroliz için buharlaşmadan dolayı meydana gelen kayıplar yaklaşık %1-2’dir. Elektroliz ile ilgili Faraday Yasası’na göre, elektroliz sırasında 1 eşdeğer-gram maddeyi serbest hale geçirmek için 96479 coulombluk elektrik yükü gereklidir. Bu elektrik yükü miktarına “faraday” denir (1 eşdeğer- gram, bir iyonun kütesinin valansına bölümüdür. Örneğin, bir eşdeğer gram; hidrojen iyonu için 1 g, oksijen için 8 g, bakır için 31,8 g’dır). 1 faraday toplam olarak 9 g su ayrıştırır. 1 amper.saniye, 1 coulomb’luk yük miktarına eşit olduğundan dolayı 96479 coulomb’luk elektrik yükününün 26,80 A.saat olduğu açıktır. Buna göre 1 gram suyun elektroliz yoluyla ayrışması sırasında devreden

$$26,8/9=2,977 \text{ A.saat}$$

elektrik yükü geçer. İkinci destilasyon sonunda sayım için gerekli olan 10 mL numuneye ihtiyaç vardır. Bu nedenle 250 mL numunenin 18 mL’ye dönüştürülmesi için gereken toplam elektrik yükü miktarı [50];

$$Q=232 \times 2,977=690 \text{ A.saat’dir.}$$

- 1) Bu nedenle A.saat metre 690 A.saat’e ayarlanır. Elektroliz esnasında devreden geçirilecek akım şiddeti çalışma şekline bağlı olup şu şekilde düzenlenmelidir. Elektroliz başlangıcında, numune seviyesi hücre içinde en yüksek düzeydeyken suyun sıçramaları fazla olabileceğinden düşük akım şiddetiyle çalışmak gerekir. Bu nedenle, ilk 100 A.saat’lik kademe için ampere 3 ampere ayarlanır. Daha

sonra akım şiddeti 6 ampere çıkartılır. Bu akım şiddetiyle A.saat metrede 100 A.saat kalıncaya kadar sürdürülür [27].

- 2) Elektrolizin sonuna doğru aktif elektrot alanı küçüldüğü için yüksek akım şiddetinden kaçınmak gerekir. Bu nedenle son 100 A.saat'lik kademe için ampermetre 3 ampere ayarlanır. Elektroliz tamamlandığında yani devreden 690 A.saat'lik elektrik yükü geçtiğinde A.saat metre akımı otomatik olarak keser [27].

Elektroliz hücrelerinin içine yerleştirildiği elektroliz banyosu su ile doludur. Banyodaki su sıcaklığın 4 °C'yi aşmaması soğutma sistemi üzerindeki kontrol elemanları ile sağlanmaktadır. Banyo suyunun donmaması için su içine antifriz ilave edilmektedir. Banyo suyunda özellikle soğutucu gaz dolaşan bakır boru yüzeylerinde zaman içinde bakteri ürediğinden 6 ayda bir temizlenmesi gerekmektedir. Banyo suyunun sıcaklığı 4 °C'nin üzerine çıkarsa elektroliz koşulları bozulacağından akım kaynağındaki akım otomatik olarak kesilmektedir [50].



**Şekil 6.3** *Hücre, metal elektrod* [49]

Her bir elektroliz hücresi paslanmaz çelikten yapılmış anot ve yumuşak çelikten yapılmış katotdan meydana gelmiştir (Şekil 6.3). Elektroliz hücreleri ve elektrodları numaralandırılır.

Hücreler tamamen kuru iken tek tek tartılır ve kaydedilir. Pratikte hücrelerin kütleleri değişmez, fakat zamanla oluşan tartım değişimi katotların elektroliz sırasında korozif etkiye maruz kaldığını gösterir. Elektroliz işlemi şu şekilde yapılır:

- 1'er gram  $\text{Na}_2\text{O}_2$  tartılır. Tartım işlemi  $\text{Na}_2\text{O}_2$  çok çabuk nem kaptığı için çok hızlı yapılmalıdır,
- Spike'a ve her bir numuneye ait elektroliz hücrelerine ait 250 ml'lik balon jodelere yaklaşık 1g  $\text{Na}_2\text{O}_2$  (granül ya da toz) ve numuneden az miktarda ilave edilir.  $\text{Na}_2\text{O}_2$ 'nin çözünmesi için belli aralıklarla çalkalanır daha sonra balon jopenin işaretli yerine kadar (250 mL) numunenin geri kalan kısmı doldurulur.  $\text{Na}_2\text{O}_2$  suyun iletkenliği düştüğü için elektrolit ortamı sağlayacak bir araçtır. Sodyum peroksitten çok fazla konulursa köpürmeler olur, elektroliz hücrelerinin bakır kısımlarına temas eder. Sodyum peroksidin tamamı çözünmezse çözünmemiş numuneler elektroliz hücrelerini korozyona uğratabilir. Balondaki örnek bulanıksa sayıma alınmaz,
- Katotların G-ring'lerine silikon gres sürüldükten sonra boş hücreler tartılır,
- Balon jodelerdeki NaOH çözeltisi hücrelerin anoduna aktarılır, katotlar anotların içine yerleştirilir ve hücreler yeniden tartılır,
- Her bir hücre numara sırasına göre soğutma tankında kendi bölmesine bağlanır, Elektroliz sırasında açığa çıkacak oksijen ve hidrojen karışımı ile taşınan buhardan dolayı numunedeki kayıpları en aza indirmek için, elektroliz soğutma sisteminde yapılır. Soğutma sistemi aynı zamanda elektrolitin akım geçerken ısınmasını engeller. Soğutma sistemi soğutma tankından oluşmuştur,
- Tüm elektroliz hücreleri doldurulup yerlerine yerleştirildik sonra elektroliz sırasında oluşacak gazların (hidrojen ve oksijen) uzaklaştırılmasını sağlayacak gaz çıkış başlıkları yerleştirilir,



- Hücrelerin birbirleriyle seri bağlantıları yapılır ve hücreler 2 °C'ye kadar soğutulduktan sonra elektrolize başlanır,
- Tüm bağlantıları hazırlanan sisteme akım kaynağından yavaş yavaş akım verilir,
- Akım verilirken hücrelerin silikon yağ tuzakları kontrol edilir ve gaz çıkışının gerçekleştiğinden emin olunur. Gaz çıkışı gözlenmeyen elektroliz hücrelerinin bağlantıları kontrol edilir. Eğer gaz çıkışı gözlenmiyorsa tüm bağlantılar gaz çıkışı gözlenene kadar silikon ile izole edilir. Gaz çıkışının gözlenmemesi elektroliz sonucunda açığa çıkan gazların hücre içerisinde ya da elektroliz banyosunda içinde biriktiği anlamına gelmektedir. Bu biriken gazlar bir süre sonra dikkatsizlik sonucu alev alıp patlamaya neden olabilir,
- İşlem tamamlandıktan sonra sistem kapatılır ve hücreler çıkarılır. Numuneler banyodan dışarı çıkartılır, oda sıcaklığına gelmesi beklenir ve dış yüzeyleri iyice kurulandıktan sonra tartılır [27].

250 ml'lik elektrolitin yaklaşık 18 ml'ye indirilmesi 7-8 gün sürmektedir. Elektroliz işleminin ne zaman sonlandırılacağına tartım ile karar verilir. Elektrolit miktarının istenilen yere inmiş olması, beklenen miktarda zenginleşmenin sağlanmış olması anlamına gelmektedir. Zenginleşmenin artması sayım hassasiyetini özellikle düşük trityum içeren sularda artırmaktadır [27].

### **6.5 İkinci Damıtma ve Nötralizasyon**

İkinci damıtma işleminin amacı temelde çökeltiyi uzaklaştırmaktır ve aynı zamanda damıtma nötralizasyonun sağlanmasına da yardımcı olmaktadır. İkinci damıtma işlemi "Birinci damıtma" prosedürü ile hemen hemen aynıdır, sadece damıtma hacmi küçük olduğundan 100 mL'lik damıtma balonları ve 20 ml'lik toplama tüpleri kullanılmaktadır [27].

İkinci damıtma şu şekilde yapılır;

- Her bir 100 mL'lik damıtma balonuna 3,55 g  $PbCl_2$  ilave edilir.  $PbCl_2$  sayım yapabilmek için gerekli olan nötralliği sağlar (Kurşun klorür ( $PbCl_2$ ) miktarının hesaplanması Ek A'da verilmiştir.)
- Balonlar düzeneğe yerleştirilir ve damıtma işlemine başlanılır,
- Balonlarda numune kalmayınca kadar damıtma işlemine devam edilir. Damıtma işlemi yaklaşık 45 dakika içinde sona ermektedir,
- Numuneler bittiğinde ısıtıcılar kapatılır su bağlantısı kesilir,
- Numunelerin pH'ları kontrol edilir değerler 5–7 arasında ise sayıma alınabilir. Eğer numunelerin pH'ları 9–11 arasındaysa numunelerin kurşun hidroksit içerdiğini gösterir ve bu durum sönüm olayını (quenching) artacağından dolayı sayım için uygun değildir. Bu tür numuneler yeniden destile edilir,
- Toplama tüpündeki damıtma ürünü, zenginleştirilmiş sayıma hazır spike 10 ml'ye ayarlanmış pipet ile sayım vialine aktarılır. Artan damıtma ürünü eğer kullanılmayacaksa ya da tekrar kullanım için yeterli hacimde değil ise atılır. Nötralizasyon ve İkinci damıtma işlemi sırasında laboratuvarın ve diğer örneklerin spike ile kirletilmemesine özellikle dikkat edilmelidir,
- Numaralandırılmış vialer kapakları ile birlikte boş olarak tartılır,
- Laboratuvar standartının, numunelerin ve ölü suyun üzerine 10'ar mL sintilatör ilave edilir. Vialerin kapakları kapatılır, dış yüzeyleri alkolle silinir ve vialer iyice çalkalanır,
- Vialer sayım cihazına yerleştirilir [27].

Hücreler elektrolizden sonra basınçlı sıcak suyla yıkanır. Balon jojelerde çöken kurşunoksit ise küçük bilyelerin jojelerin içine atılıp çalkalanması ile kazınmış olur. Jojeler sudan geçirildikten sonra yıkama asidinde bekletilir ve yıkanarak etüvde kurutulur. Kurşunklorür zehirli bir kimyasaldır kullanımı sırasında dikkatli olmak gerekir.

## 6.6 Sayım

Sayım için 20 mL'lik plastik kapaklı vialler kullanılır. Plastik sayım vialleri  $^{40}\text{K}$  içermediği için ve cam viallere göre daha düşük beta içerdikleri için, background'u azaltma etkisine sahiptirler [50].

Sayıma hazır örnekler sayım cihazının içinde termal dengeye ulaşmaları için 2–3 saat bekletildikten sonra sayıma başlanmıştır. Sayımlarımız sırasında su örneklerinin yanı sıra Amersham Laboratuvarı'ndan alınan  $4,8 \times 10^{-6}$  konsantrasyona sahip 20912 TU'ya seyreltilmiş laboratuvar standartı (DWS), destillenmiş spike (RWS) ve ölü su da (DW) eş zamanlı olarak saydırılmış, QUANTULUS-1220 Ultra Düşük Sintilasyon Sayma Sistemi ile sayımlarımız gerçekleştirilmiştir. Bir sayım turunda (cycle) her bir örnek 50 dakika süre ile saydırılır. Bir grup örneğin analizinin tamamlanabilmesi için sayım 10 tur tekrar edilir. Bu durumda her bir örnek 500 dakika sayılmış olmaktadır [27].

## 6.7 Araştırma Sahası

### 6.7.1 Eskişehir

Eskişehir, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alır. İl merkezi kuzeyinde Mihalgazi, Sarıcakaya ve Ankara il, doğusunda Alpu, güneyinde Mahmudiye, Seyitgazi ve Afyon il, batısında ise İnönü ve Kütahya il sınırları ile çevrilidir [51].

Ortasından Porsuk Çayı geçen şehir, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ve Anadolu Üniversitesi nedeniyle bir öğrenci kenti görünümündedir. Toplam nüfusu 2008 sayımlarına göre 724.849, şehir nüfusu 595.157, ilçe nüfusu 148.981, yüzölçümü  $13.655 \text{ km}^2$ , rakımı 788 metredir [51].

Eskişehir ili, içme suyunu Kalabak membaa sularından sağlamaktadır. Eskişehir ilinin içme ve kullanma suyunu temin etmek amacıyla, Porsuk Çayı'nın Eskişehir il

merkezi girişinde yer alan Karacaşehir Regülâtörü öncesinde su alma tesisleri, klasik arıtma tesisleri ve dağıtım tesisleri kurulmuştur. Arıtıldıktan sonra şehre içme ve kullanma suyu amacıyla verilen su, aynı noktada Porsuk Çayı'ndan temin edilmektedir [51].

### **6.7.2 Sarıcakaya ilçesi**

İlçe doğudan batıya doğru uzanan güneyinde Sündiken Dağları'nın, kuzeyinde Köroğlu Dağları'nın arasında bulunan Sakarya Nehri boyunca 450 km<sup>2</sup> lik bir alana sahiptir. Denizden yüksekliği 200–250 metredir. Sakarya Nehri ilçe topraklarını ikiye ayırmakta olup tarım elverişli bir vadi oluşturmaktadır. İlçe nüfusu 2000 yılda yapılan genel nüfus sayımına göre, 14,968 olup, nüfusun 7.026'sı (%47) köylerde, 7.942'si (%53) ilçe merkezinde yaşamaktadır. İlçenin yüzölçümü 375 km<sup>2</sup>dir [51].

Sarıcakaya şebeke suyu Bozaniç Dağı'ndan, Sarıcakaya çeşme suyu ise Mayıslar Köyü'nden sağlanmaktadır (Şekil 6.4).



**Şekil 6.4** Çalışma alanı; Sarıcakaya ilçesi , Mayıslar Köyü, Bozaniç Dağı [52].

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL BULGULAR VE HESAPLAMALAR

#### 7.1 Numune ve Standartlara Ait Tartım Sonuçları

Çevresel örneklerde trityum seviyesi çok düşük olduğundan belirli değerler elde etmek adına numunelerimizin trityum seviyelerini elektroliz ile zenginleştirme yöntemini kullanarak belirlemeyi tercih ettik.

**Tablo 7.1** *Elektroliz için yapılan tartımlar*

NUMUNE ADI	ALINMA TARİHİ	HÜCRELERİN KÜTLESİ (g)		ELEKTROLİZ SONU
		BOŞ	DOLU	
Spike 1	28.11.2006	1446,70	1696,00	1462,70
Spike 2	28.11.2006	1496,20	1746,50	1513,20
Sarıcakaya Çeşme	25.03.2008	1503,80	1753,70	1521,50
Eskişehir Şebeke	25.03.2008	1491,60	1742,00	1507,70
Sarıcakaya Şebeke	25.03.2008	1495,90	1745,80	1513,40
Eskişehir Kalabak	25.03.2008	1507,10	1757,30	1525,50
Sazova Kaynak	25.03.2008	1508,30	1758,20	1526,50
Sazova Şebeke	25.03.2008	1443,40	1693,10	1460,60

Belirsizliği artıran durumların daha çok tartımlar ve numunenin sayıma hazırlanması sırasında gerçekleştiğini unutmamak gereklidir. Bu nedenle tartımları gösteren tablonun (Tablo 7.1) yanı sıra Denklem 7.7 ve 7.8'de belirtilecek olan belirsizlik hesaplarını da işlemlerde dahil etmek gereklidir.

## 7.2 Numune ve Standartlara Ait Sayımlar

Ölçümlerimiz QUANTULUS–1220 Sintilasyon Sayma Sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bir sayım turunda (cycle) her bir örnek 50 dakika süre ile saydırılır. Bir grup örneğin analizinin tamamlanabilmesi için sayım 10 tur tekrar edilir. Bu durumda her bir örnek 500 dakika sayılmış olmaktadır. Sayımlarımızdan elde edilen sonuçlar Tablo 7.2’de verilmiştir.

**Tablo 7.2** Numuneler ve standartlara ait sayma değerleri

NUMUNENİN ADI	SAYMALAR (sayma /dak)									
Sarıcakaya Çeşme	4,64	4,56	4,40	4,21	4,25	4,99	4,17	4,34	4,50	4,72
Eskişehir Şebeke	4,07	3,72	3,78	4,21	4,11	3,42	3,72	3,76	3,70	3,76
Sarıcakaya Şebeke	4,64	4,81	4,44	5,15	4,48	4,56	5,03	4,79	4,01	4,56
Eskişehir Kalabak	3,68	3,70	3,87	4,13	3,76	4,07	3,66	3,44	3,58	3,62
Sazova Kaynak	3,07	3,03	2,43	2,54	2,80	3,17	3,05	2,64	2,56	2,47
Sazova Şebeke	2,52	2,95	2,62	2,99	2,41	2,50	2,41	2,76	2,29	2,68
Spike	249,63	252,41	252,76	248,54	248,91	247,80	246,94	248,39	243,58	241,40
Spike	232,71	231,53	234,80	233,97	233,54	231,19	234,24	231,03	230,30	227,86
Lab.Std	396,51	400,73	398,49	400,52	394,96	397,18	393,53	394,12	394,12	394,62
Lab. Std	396,96	395,06	394,71	394,16	400,95	394,62	398,17	396,74	388,97	390,12

### 7.3 Spike ve Laboratuvar Standartına Ait Veriler

Tritiyum konsantrasyonu hesabı yapılırken ölçümlerimiz sırasında kullandığımız spike ve laboratuvar standartının konsantrasyonuna ait bilgiler, ölçüm tarihleri Tablo 7.3'deki gibidir.

**Tablo 7.3** Laboratuvar standartı ve spike'in TU değerleri

Ölçüm tarihi	17.04.2008
Lab. std'nin ölçüm tarihi	28.11.2006
Lab.std'nin ilk konsantrasyonu $X_0$ (std.)	19993 TU
Lab. std için geçen süre	506 gün
Ölçüm tarihinde lab.std'nin konsantrasyonu ( $A_{ST}$ )	18494 TU
Spike'nin hazırlanma tarihi	28.11.2006
Spike'nin ilk konsantrasyonu $X_0$ (spk)	858 TU
Spike için geçen süre	506 gün
Ölçüm tarihinde spike'nin konsantrasyonu	794 TU

### 7.4 Tritiyum Konsantrasyonunun Hesabı

Su numunelerinin tritiyum konsantrasyonlarının hesaplanabilmesi için ölçüm setinde su numunelerinin dışında tritiyum konsantrasyonu bilinen ana standarttan hazırlanmış laboratuvar standartı ölü su ve spike'in bulunması gereklidir. Tritiyum konsantrasyonunun hesabı için Denklem 7.1 kullanılır.

$$A_{TU} = \frac{N_{num} \times A_{std}}{N_{std} \times Z} \times D \quad (7.1)$$

burada,

$A_{TU}$  : numunenin konsantrasyonu (TU),

$N_{num}$  : numunenin net sayma hızı (sayma/dakika, cpm),

$A_{std}$  : laboratuvar standartının ölçüm yapıldığı tarihteki konsantrasyonu (TU),

$N_{std}$  : laboratuvar standartının net sayma hızı (sayma/dakika),

$D$  : numunenin alındığı tarih ile ölçüm tarihi arasındaki trityumun parçalanma düzeltmesi,

$Z$  : zenginleştirme faktörü.

Numunelerin trityum konsantrasyonlarının hesabı için aşağıdaki işlemler yapılır;

- a) Numuneler ve standartların ortalama sayma hızları hesaplanır,
- b) Numuneler ve standartların net sayma hızları hesaplanır.

$$N_{num} = S_{num} - B$$

$$N_{std} = S_{std} - B$$

burada,

$S_{num}$  : numunenin ortalama sayma hızı (sayma/dakika),

$S_{std}$  : lab std'nin ortalama sayma hızıdır (sayma/dakika),

$B$  : background numunesinin ortalama sayım hızıdır (sayma/dakika).

- c) Kalibrasyon faktörü (F) hesaplanır.

Kalibrasyon faktörü yani kullanılan sıvı sintilasyon sayma sisteminde 1 cpm'lik (count per minute=dakikadaki sayım) saymanın kaç trityum birimine karşılık geldiği, laboratuvar standartından hazırlanmış numunelerin sayılmasıyla bulunur. Laboratuvar standartı ölçüm setine bu amaçla konulmaktadır. Kalibrasyon faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:



$$F(TU / cpm) = \frac{A_{std}}{N_{std}} \quad (7.2)$$

burada,

$A_{std}$  : lab. std'nin ölçüm tarihindeki konsantrasyonu (TU),

$N_{std}$  : lab. std'nin net sayma hızıdır (sayma/dakika).

d) Zenginleştirme faktörü (Z) hesaplanır.

Doğal sularda trityum konsantrasyonu düşük olduğu için numuneler elektroliz yolu ile zenginleştirilmektedir. Gerçek trityum konsantrasyonunun belirlenmesi için ne kadar zenginleştirme yapıldığının bilinmesi gerekmektedir.

Laboratuvar standardı ve spike'ın aynı tarihte hazırlanması koşuluyla zenginleştirme faktörü şu şekilde hesaplanır:

$$Z = \frac{N_{spk} \cdot F \cdot \frac{X_{0, std}}{X_{0, std}}}{X_{std-ölç}} \quad (7.3)$$

burada;

$N_{spk}$  : zenginleştirilmiş spike'ın net sayma hızı (sayma/dakika),

$X_{0, std}$  : lab. standartının hazırlandığı tarihteki trityum konsantrasyonu (TU),

$X_{0, spk}$  : spike'ın hazırlandığı tarihteki trityum konsantrasyonu,

$X_{std-ölç}$  : lab. standartının ölçüldüğü tarihteki trityum konsantrasyonu (TU)'dur.

Zenginleştirme faktörünün diğer bir ifadesi aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$Z = \exp \left[ \frac{PQ}{(W_i - W_f) \times 2,977} \ln \frac{W_i}{W_f} \right] \quad (7.4)$$

$Q$  : elektroliz sırasında geçmesi gereken amper saat değeri,

$W_i$  : su numunesinin başlangıçtaki kütlesi (g),

$W_f$  : su numunesinin elektroliz sonundaki kütlesi (g),

$P$  : zenginleştirme parametresidir.

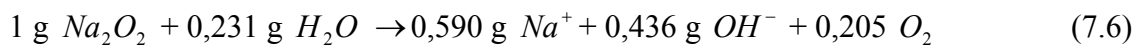
$W_i$  ve  $W_f$ 'nin hesabında belirsizlik bileşenlerini katarak bazı düzeltmelere gitmek gereklidir. Bu düzeltmeler aşağıdaki şekilde sağlanır:

*i) Elektroliz öncesinde su numunelerinin ve hücrelerin tartımı*

Bu işlem boş hücrelerin tartımı ( $W_{CE}$ ) ve daha sonra 1 g sodyum peroksitin ( $W_{Na_2O_2}$ ) önce bir miktar çözültide çözünmesi ve 250 mL'ye tamamlanmasından oluşur. Sodyum peroksitin sudaki çözünme reaksiyonu aşağıdaki gibidir.



Sodyum peroksitin çözünmesi tamamlandıktan sonra numuneler hücrelere boşaltılır ve dolu olarak tartılır ( $W_{CI}$ ). Sodyum peroksit su ile reaksiyona girdiğinde oksijen gazı çıkışı olur. Bu durumda kalan çözeltinin kütlesinde çok az bir kayıp meydana gelir. Su içinde 1 g sodyum peroksitin çözünmesi sonunda denklemin sitokiyometresi aşağıdaki denkleme verilmiştir.



Numunenin elektrolize hazırlanması yaklaşık 30 dk sürdüğü düşünülürse bu zaman zarfında sodyum peroksitteki kütle kaybı 0,08 g'dır. Başlangıçtaki suyun kütlesi ( $W_1$ ) boş hücrenin ve ilave edilen sodyum peroksitin kütlesi çıkarılarak hesaplanır

( $W_{CI}$ ). Ayrıca  $W_{CI}$  için havanın kaldırma kuvveti düzeltilmesi yapılması gereklidir.  $\text{OH}^-$  içeren suyun başlangıçtaki kütlesi ( $W_I$ ), oksijen gazı çıkışı ve  $\text{Na}^+$  iyonunun kütlesinin çıkarılmasıyla aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$W_I = (W_{CI} + H) - W_{CE} - (0,59 + 0,25 - 0,08) \times W_{\text{Na}_2\text{O}_2} \quad (7.7)$$

burada,

$W_I$  : numunenin kütlesi

$W_{CI}$  : dolu hücrenin kütlesi

$W_{CE}$  : boş hücrenin kütlesi (g)

$W_{\text{Na}_2\text{O}_2}$  : sodyum peroksitin kütlesi (g)

$H$  : havanın kaldırma kuvveti düzeltmesidir ( $\Delta m = 0,30$  g)

ii) *Elektrolizden sonra hücre tartımları*

Zenginleştirilme işlemlerinden sonra hücrelerin kütleleri belirlenir.  $\text{OH}^-$  içeren su numunesinin elektrolizden sonraki kütlesi,

$$W_F = (W_{CF} - 0,1 - W_{CE} - 0,59) \times W_{\text{Na}_2\text{O}_2} \quad (7.8)$$

formülüyle hesaplanır. Burada,

$W_F$  : elektrolizden sonra numune kütlesi

$W_{CF}$  : elektrolizden sonra hücre kütlesi

$W_{CE}$  : boş hücrenin kütlesi

e) Zenginleştirme parametresi (P) hesaplanır.

Spike hücrelerinden hesaplanan ortalama zenginleştirme faktörünün değeri, aşağıdaki denklemde yerine koyularak her bir spike doldurulmuş hücre için zenginleştirme parametresi bulunur ve ortalaması alınır.

$$P = \frac{2.977}{Q} \times \frac{(W_i - W_f) \ln Z}{\ln \frac{W_i}{W_f}} \quad (7.9)$$

Yukarıdaki denklemde;

$Q$  : elektroliz sırasında geçmesi gereken A.saate değeri,

$W_i$  : su numunesinin başlangıçtaki kütlesi (g),

$W_f$  : su numunesinin elektroliz sonundaki kütlesi (g),

$P$  : zenginleştirme parametresidir.

f) Hücrelerin Z zenginleştirme faktörleri hesaplanır.

Numune konulmuş hücreler için Denklem 7.9 kullanılarak zenginleştirme faktörü her numune hücresi için bulunur.

g) Numunelerin A(TU) trityum konsantrasyonları hesaplanır.

Yukarıda bulunan  $A_{std}$ ,  $N_{num}$ , D değerleri ve Z değeri Denklem 7.1'de yerine konularak numunelerin ölçüldüğü tarihteki trityum konsantrasyonları hesaplanır [27].

Trityum konsantrasyonu hesabı ayrıntılı olarak Sazova şebeke suyu için Ek B'de yapılmıştır.

### 7.5 İçme Suyu Numunelerinde Belirlenen Tritiyum Konsantrasyonları

Eskişehir ve civarında alınan 6 adet içme suyu örneğinin analizi sonucu belirlenen trityum konsantrasyonları Tablo 7.4’de gösterildiği gibidir.

**Tablo 7.4** Araştırma sahasından alınan su örneklerinin trityum seviyeleri

Sıra No	Numunenin Adı	Alınma Tarihi	Tritiyum (TU)	Belirsizlik $\pm$ TU
1	Sarıcakaya Çeşme	25.03.2008	7,10	1,60
2	Eskişehir Şebeke	25.03.2008	4,65	1,20
3	Sarıcakaya Şebeke	25.03.2008	8,10	1,80
4	Eskişehir Kalabak	25.03.2008	4,90	1,25
5	Sazova Kaynak	25.03.2008	1,35	0,80
6	Sazova Şebeke	25.03.2008	0,73	0,70

Deneye Başlama Tarihi : 09.04.2008

Deney Bitiş Tarihi : 25.04.2008

Numunelerimizin trityum sonuçları  $0,73\pm 0,70$  ila  $8,10\pm 1,80$  arasında olup en yüksek değer olan  $8,10\pm 1,80$  Sarıcakaya ilçesinin şebeke suyu, en düşük değer olan  $0,73\pm 0,70$  ise Sazova şebeke suyudur.

## BÖLÜM 8

### SONUÇ VE TARTIŞMA

Sıvı Sintilasyon Sayım Tekniği ile içme sularında trityum analizinin nasıl gerçekleştirildiğine dair bilgilerimizi artırmak adına Eskişehir ve Sarıcakaya'dan toplam 6 adet içme suyu örneği alınmıştır.

Çevresel örneklerde trityum seviyesinin çok düşük olması nedeni ile numunelerin trityum aktivite seviyeleri belirlemeden önce, elektroliz ile zenginleştirme yöntemi tercih edildi. İçme sularında trityum değerlerinin çok düşük olduğu bilindiği için içilebilirlik sınırlarını sağlayacağı göz önünde bulundurularak numuneler elektroliz yöntemi ile zenginleştirilmeden de gidilmeden hızlı bir değerlendirme yapmak mümkündür.

Tablo 8.1'de Eskişehir İli ve civarındaki yerleşim birimi olan Sarıcakaya'dan alınan içme suyu örneklerinde trityum miktarları görülmektedir. Yaptığımız analizler sonucu alınan numunelerdeki trityum miktarının limit değer olan 839 TU'nun çok altında olduğu tespit edilmiştir. Numunelerimiz trityum açısından içilebilirlik sınırları içerisinde dir.

Trityum ( $^3\text{H}$ ) hidrolojik sisteme yağış ile girer. Efteni (Düzce)'de daha önce yapılan izotop analizlerine göre soğuk su kaynaklarının  $^3\text{H}$  içeriği, güncel yağışların  $^3\text{H}$  içeriğine (~8–10 TU) yakın değerlerde bulunmuştur [53]. Bulgularımız Eskişehir ve civarı için yağış analizi yapıldığı takdirde elde edilebilecek verilerle paralellik sağlayacaktır.

Trityum konsantrasyonundaki maksimum değer bahar ve yaz aylarına ait yağışlarda gözlemlenir [27]. Numunelerimizin toplanma tarihi Mart ayı olduğu için kış aylarında elde edilebilecek değerlerden daha yüksek olacağı görüşünü öne sürebilir.

Hidrojeolojik olarak trityum değeri  $TU > 5$  olan sular, genç yağış sularından oluşan 5–10 yıllık “modern sular”; trityum değeri 0–2 TU arasında olan sular, nükleer denemeler öncesi (1952 öncesi) yağışlardan beslenen sular (50 yıldan daha yaşlı sular); trityum değeri 2-5 TU arasında olan sular ise, nükleer denemeler öncesindeki yağış suları ile nükleer denemeler sonrası yağış sularından etkilenmiş “sub-modern” sulardır [54].

Bulgulara göre Sarıcakaya çeşme ve şebeke suları modern sular grubunda yer almaktadır. Sarıcakaya çeşme suyu Mayıslar Köyü’nden, Sarıcakaya Şebeke suyu da Bozaniç Dağı’ndan sağlanmaktadır (Şekil 6.4). İkinci grupta yer alan Sazova kaynak suyu ve şebeke suyu 1952 yılı öncesi yağışlardan beslenen, 50 yıldan yaşlı sular grubuna girmektedir. Eskişehir kalabak suyu ve şebeke suyu sub-modern sular grubunda yer alır. Eskişehir şebeke suyu porsuk nehrinden, Eskişehir kalabak suyu Kalabak Köyü’nden sağlanmaktadır. Porsuk nehri birçok koldan beslenmektedir. Nükleer denemeler öncesi ve sonrası yağış sularının karışımından oluşması muhtemeldir.

Sazova kaynak ve şebeke sularının ölçüm değerleri arasında 0,65’lik bir fark mevcuttur. Muhtemel neden şebeke suyundaki parçacıkların filtrasyon ile ayrılmasıdır.

Trityum verilerinin değerlendirilmesinde dolaşım süresi önemlidir. Buna göre dolaşım süresinin trityum oranındaki azalmaya neden olduğu düşünülürse Sazova’da şebeke suyu olarak kullanılan suyun derin dolaşım olduğu düşünülebilir. Örneğin Eskişehir’den 2004 yılında alınan yeraltı suyu numunelerinin analizi sonucunda elde edilen trityum değerlerinin  $0-7,2 \pm 0,31$  TU arasında değiştiği gözlenmiştir [55]. Bozaniç Dağı’ndan sağlanan su Sarıcakaya şebeke suyudur. Mevsimsel yağışlardan elde edilen suyun derin dolaşıma girmeden hızlıca içme suyu olarak kullanıldığı varsayımını gözününe alabiliriz.

Analiz sonuçlarındaki belirsizlikler numuneler için yüksek çıkmıştır. Bunun nedenleri arasında numune sayısının yetersizliği, sayım süresinin yetersizliği, destilasyon, tartımlar ve elektroliz sırasında meydana gelen hatalar sayılabilir.

İçme sularındaki trityumun kaynağı 1945–1980 yılları arasında atmosferde yapılan nükleer bomba denemeleri, reaktör kazaları sonucu havaya salınan radyoaktif maddeler ve atmosferin üst tabakalarındaki azot atomlarıyla kozmik nötronların etkileşmesinden doğal olarak oluşan trityumdur. Nükleer denemelerin yasaklanmasıyla radyoaktif yağışların etkinliğinin azaldığı analizini yaptığımız içme suyu numunelerinde de net bir şekilde fark edilmektedir. IAEA'nın kurduğu şebekeye dâhil olan Ankara, Antalya ve Adana yağış istasyonlarından 1963 yılında alınan numunelerin trityum konsantrasyonlarının ağırlıklı ortalamaları sırasıyla 2585 TU, 710 TU, 1150 TU'dur [27]. Analizlerimiz neticesinde elde edilen değerler ise yalnızca  $0,73\pm 0,70$  ile  $8,10\pm 1,80$  aralığındadır.

Sudaki  $Cl^-$  artışına bağlı olarak trityum değerleri belirgin bir azalma gösterir [56]. Bu nedenle numunelerin daha iyi değerlendirilmesi açısından  $Cl^-$  değerinin de incelenmesi gereklidir. Trityumdaki düşüşün  $Cl^-$  daki artıştan ileri gelebileceği göz önüne alınarak Sazova Şebeke ve Sazova Kaynak sularının yaşlı tuzlu sular ile karışmış olduğu düşünülebilir.

Misli Havzasından alınan kısa dolaşımli soğuk suları temsil eden sığ kuyulardan alınan örneklerin trityum değerleri 10–14 TU arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 100 metreden daha derin olan kuyulardan alınan suların trityum değerleri  $1.59\pm 1.16$  TU arasında değişmekte olup, dolaşımda uzun süre kalmış suları temsil etmektedir [57]. Bu nedenle Sazova'daki suyun kuyu suyu olması muhtemeldir.

Analizlerimiz için numune sayısı imkânlar dâhilinde belirlenmiş olup detaylı bir yorum uzun gözlemler ve çok sayıda örneğin analizi neticesinde elde edilebilir. Ayrıca hidrojeolojik açıdan yalnızca trityuma dayanarak yapılan yorumun, ancak gerekli diğer izotopların analizi neticesinde kesinlik kazanacağını belirtmek gereklidir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

1. TAŞKIN, H., 2006, “İnsan sağlığı ve çevre kirliliği açısından Kırklareli ilinin fon radyasyonunun belirlenmesi ve haritalanması”, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 96s.
2. Cansoy, Ç., 1978, “Teorik fizik dersleri çekirdek teorisi”, İstanbul Üniversitesi, cilt 10, 192s.
3. Patel, S.B., 1991, “Nuclear physics: An introduction”, New Age Publishers, 346p.
4. Lilley, J., 2001, “Nuclear physics: Principles and applications”, Wiley, 8.
5. Krane, K.S., “Nükleer fizik”, 2002, Palme Yayıncılık, Çeviri editörü; Şarer,B., Ankara, 2.cilt.
6. Khan, F, M., “The Physics of radiation therapy”, 2003, Lippincott Williams & Wilkins, 511p.
7.  
[http://www.dogainsanisbirligidernegi.org.tr/makaleler/radyasyon\\_ve\\_yasam\\_2.d](http://www.dogainsanisbirligidernegi.org.tr/makaleler/radyasyon_ve_yasam_2.d)  
oc.
8. Shepard, W.P., 1977, “The physician in industry”, Ayer Publishing, 290p.
9. Dashek, W, V., 2000, “Methods in plant elektron microscopy cytochemistry”, Humana Pres, 300p.
10. Habash, W.Y., 2002, “Elektromagnetic fields and radiation human bioeffects and safety”, CRC Pres, 424p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

11. [http://lasp.colorado.edu/cassini/images/Electromagnetic%20Spectrum\\_noUVIS.jpg](http://lasp.colorado.edu/cassini/images/Electromagnetic%20Spectrum_noUVIS.jpg).
12. “Türkiye’de radyasyon korunmasına ilişkin yasal mevzuat”, TAEK, 57s.
13. Seligman, H., 1990, “Isotopes in everyday life”, International Atomic Energy Agency, PI,A6E.
14. Johnson, H., Tuitah, M., 1983, “Radiation is part of your life”, Nuclear Information Series, Atomic Energy of Canada Limited Public Affairs.
15. Dawis, R.M., Watson, J.E., 1990, “Influence of <sup>226</sup>Ra concentration in surrounding rock on <sup>222</sup>Ra concentration in ground water”, Health Physics 58, 369-371.
16. Lucas, H.F., 1991, “Radium-226 whole-body gama counting and Radon-222 breath analysis”, Health Physics 60, 163-167.
17. Çelebi, N., Yaşar, S., “Sularda radyoaktivite”, ÇNAEM.
18. Watson J.E., Evans, J.P., Mabry, A.M., 1993, “Analysis of <sup>222</sup>Ra concentration in North Caroline household water supplies derived from private wells”, Health Physics 65, 156–160.
19. Hammond, D.E., Teng, T.L., Miller, L., Haraguchi, G., 1981, “A search for covariance among seismicity, ground chemistry, and groundwater Radonin Southern California”, Geophysical Research Letters, Vol.8, 5, 445-448.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

20. Lawrence, E.P., Wanty, R.B., Nyberg, P., 1992, "Contribution of  $^{222}\text{Rn}$  in indoor air in Colorado Homes", Health Physics 62, 171–177.
21. "Standart practices for the measurement of radioactivity", 1987, Annual Book of ASTM (The American Society for Testing and Materials) Standarts D–3648, 330–356.
22. "İçme Suları TS 226/1965, UDK 663–7,543", 1979, Türk Standartlar Enstitüsü, III. Baskı.
23. "Protection against radon – $^{222}$  at home and at work", 1993, International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP, ICRP Publication 65, Pergamon, Oxford.
24. "Radiation safety", 1996, International Atomic Energy Agency, IAEA Division of Public Information, 96–00725, PI, A47E.
25. Çelebi, N., 1995, "Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi", İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Doktora Tezi, 21–22.
26. "International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources", 1994, International Atomic Energy Agency, Safety Series, Vienna115-I.
27. Altay, T., Çifter, C., 1996, "Tritiyum laboratuvarı el kitabı", DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, İZ-963, 55s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

28. “Elektroliz zenginleştirmesi ve sıvı sintilasyon sayma sistemi kullanılarak su numunelerinin trityum içeriği üzerindeki belirsizliklerin saptanması”, 2003, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, İZ-903.
29. Portakal, S., Birol, E., Ünlü, Y., Topçuoğlu, S., Varinlioğlu, A., Bayülgen, N., 1988, “Trityumun elektrolizle zenginleştirilmesi ve sayım yöntemi”, ÇNAEM, A.R-251.
30. Mook, G.W., 2002, “Environmental isotopes in hydrology cycle principles and applications”, Introduction-Theory, Methods, Review, Vienna.
31. Gonfiantini, R., 1982, “On the isotopic composition of precipitation, translation from a paper presented at the annual meeting of the Societa Italiana di Minerologia a Petrologia, Cetraro (cosenza)”, Italy.
32. Xiaolin, H., Per, R., “Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples”, 2008, Analytica Chemica Acta 608, 105-139.
33. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/52/Photomultipliertube.svg/400px.Photomultipliertube.svg.png>.
34. “Handbook of liquid scintillation counting”, 2001, Wallac-PerkinElmer.
35. Tsoufanidis, N., 1995, “Measurement and detection of radiation”, Taylor & Francis, London, 636p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

36. “Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry”, Packard.
37. <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/spec/molec/graphics/mol-fluo.gif>.
38. <http://www.rexon.com/images/plastic7.jpg>.
39. Knoll, G.F., 1989, “Radiation detection and measurement”, Wiley, 754p.
40. Watanabe, Y., Kywabara, J., 2006, “Ultraviolet photolysis of urine for suppression of color quenching prior to liquid scintillation counting of tritium”, Anal Bional Chem. 384, 547–550.
41. “Principles and applications of liquid scintillation counting”, National Diagnostics Laboratory Staff, 15p.
42. “Environmental health, safety and risk management radiaton safety program: liquid scintillation counting”, University of Wisconsin-Milwaukee, 14p.
43. [http://www.bruker-axs.de/fileadmin/user\\_upload/xrfintro/images/Abb9\\_e.jpg](http://www.bruker-axs.de/fileadmin/user_upload/xrfintro/images/Abb9_e.jpg).
44. Arankytö, P., Paso, C., Kaihola, L., “Nuclear counters in environmental applications”, Perkin Elmer, 29p.
45. “Quantulus 1220 The ultra Low level Liquid Scintillation Spectrometer”, 15 june 2005, Lauri Kaihola.
46. Kessler, M.J., 1986, “Liquid Scintillation analysis: Science and technology”, Packard.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

47. “The tri-carb liquid scintillation counters: Featuring quanta smart tri-carb lsc software for the windows nt operating system”, Perkin Elmer, 10p.
48. “Quantulus 1220 the ultra low level liquid scintillation spectrometer, may 2005, Lauri Kaihola, 32.
49. Fotoğraflar DSİ'nin izniyle çekilmiştir.
50. “Hacettepe Üniversitesi Tritiyum İzotop laboratuvarı El Kitabı”, 10s.
51. “Eskişehir il çevre durum raporu”, 2004, Eskişehir Valiliği İl Çevre ve Orman Müdürlüğü.
52. [www. map.google.com](http://www.map.google.com).
53. Karakuş, H., Şimşek, Ş., İnan, S., “Efteni (Düzce) sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeokimyasal ve izotopik incelemesi”, II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, 45–58.
54. Burçak, M., “Aksaray jeotermal sahalarında (Acıgöl-Ziga-Sahinkale) hidrokimyasal ve izotopik çalışmalar”, II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, 89–105.
55. Yüce, G., Uğurluoğlu, D., Yalçın, T., Bozkurtoğlu, E., Özçelik, Ş., Eser, T., Azdiken, S., “Depremlerin önceden kestirilmesinde hidrolojik ve su kimyası değişimlerinin gözlenmesi: Eskişehir Bölgesinde başlatılan çalışmalardan elde edilen ilk verilerin değerlendirilmesi”, II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, 75-87.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

56. Yaman, D., Özgür, N., “Kızıldere ve çevresi jeotermal alanların hidrojeolojik, hidrokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri”, Süleyman Demirel Üniversitesi, II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, 297–308.

57. Yüce, G., “Misli Havzasındaki sıcak suların sığ yer altı suları kalitesine etkilerinin incelenmesi”, ESOGÜ Jeoloji Mühendisliği , II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, 59-73.

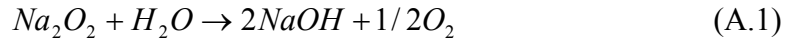
## EKLER

### EK-A

#### Kurşun Klorür (PbCl<sub>2</sub>) Miktarının Hesaplanması

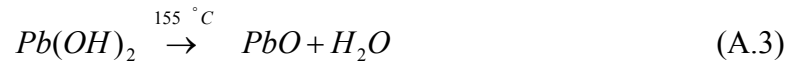
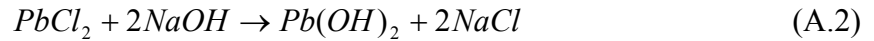
Trityum analizlerinde elektrolizin sağlanması amacıyla yaratılan bazik ortamı nötr hale getirmek ve tekrar destile su numunesi elde etmek için kurşun klorür (PbCl<sub>2</sub>) kullanılır.

Sodyum hidroksit (elektrolit) çözeltisinin oluşması su numunesine sodyum hidroksitin ilavesiyle olur.



Yukarıdaki denkleme göre 78 g sodyum peroksit 18 g suyla reaksiyona girer ve reaksiyon sonunda 80 g sodyum hidroksit meydana gelir. Buna göre 1 g sodyum peroksit ilavesiyle oluşan sodyum hidroksit miktarı 1,025 g'dır.

Sodyum hidroksit çözeltisi kurşun klorür eklendiği zaman kurşun hidroksit [Pb(OH)<sub>2</sub>] ve sodyum klorür (NaCl) meydana gelir. Kurşun hidroksit yüksek sıcaklıkta kurşun oksit (PbO) ve suya ayrışır.



1 g sodyum hidroksitin yarattığı bazik ortamı nötrleştirmek için gerekli kurşun klorür miktarı 3,55 g'dır [27].



## EK-B

### Sazova Şebeke Suyu Numunesi İçin Trityum Konsantrasyonunun Hesabı

Aktiviteyi çok düşük olan çevresel suların trityum konsantrasyonlarının ölçülmesinde yeterli sayım hızına ulaşılabilmesi için trityum içeriğinin zenginleştirilmesine ihtiyaç vardır. Zenginleştirme işlemi numunelerin elektrolizi yapılarak gerçekleştirilir.

Elektroliz işlemi için yapılan tartım sonuçları Tablo B.1'deki gibidir. Örnek çözüm için tek bir numune ele alınmış olup kullanılan numune Sazova şebeke suyudur.

**Tablo B.1** Elektroliz işlemi için tartım değerleri

NUMUNE ADI	ALINMA TARİHİ	HÜCRELERİN KÜTLESİ (g)			NUMUNELERİN KÜTLESİ	
		BOŞ	DOLU	ELEKTROLİZ SONU	ELEKTROLİZ ÖNCESİ (W <sub>i</sub> )	ELEKTROLİZ SONRASI (W <sub>f</sub> )
Sazova Şebeke	25.03.2008	1443,40	1693,10	1460,60	249,24	16,62
Spike 1	28.11.2006	1446,70	1696,00	1462,70	248,84	15,42
Spike 2	28.11.2006	1496,20	1746,50	1513,20	249,84	16,42

$$W_I = (W_{CI+H}) - W_{CE} - (0,59+0,25-0,08) \times W_{Na_2O_2} \quad (B.1)$$

$$W_F = (W_{CF}+0,01-W_{CE}-0,59) \times W_{Na_2O_2} \quad (B.2)$$

olduğundan Sazova şebeke suyu için Tablo B.1'deki değerler Denklem B.1 ve B.2'de yerine konulduğunda;

$$W_I = (1693,1+0,3)-1443,40-(0,59+0,25-0,08) \times 1=249,24 \text{ g,}$$

$$W_F = (1460,6+0,01-1443,4-0,59) \times 1=16,62 \text{ g olarak bulunur.}$$

Sayımlarımız QUANTULUS–1220 Ultra Düşük Sintilasyon Sayma Sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sayımlarımız sırasında su örneklerinin yanı sıra laboratuvar standartı, destillenmiş spike ve background için ölü su da eş zamanlı olarak saydırılmıştır. Her bir tepsiye 20’şerli dizilmiş grubun analizinin tamamlanabilmesi için sayım 10 tur tekrar edilir. Sayımlarımızdan elde edilen sonuçlar Tablo B.2’de verilmiştir.

**Tablo B.2** Numuneler ve standartlara ait sayma değerleri

Numune	Saymalar (say/dak)									
Ölü Su 1	2,19	2,58	2,41	2,58	1,92	2,56	2,68	2,56	2,27	2,45
Ölü Su 2	2,27	2,31	2,47	2,50	2,25	2,64	2,11	2,56	2,00	2,25
Ortalama B.G Sayması (B): 2,378~2,4										
L.Std 1	396,51	400,73	398,49	400,52	394,96	397,18	393,53	394,12	394,12	394,62
L.Std 2	396,96	395,06	394,71	394,16	400,95	394,62	398,17	396,74	388,97	390,12
Ortalama Lab.Std Sayması , $S_{std} = 395,762$ Ortalama Net Lab. Std Sayması, $N_{std} = 393,362$										
Sazova Şebeke	2,52	2,95	2,62	2,99	2,41	2,50	2,41	2,76	2,29	2,68
Ortalama “Sazova Şebeke” Sayması, $S_{num} = 2,613$ Ortalama “Sazova Şebeke” Net Sayması, $N_{std} = 0,213$										
Spike 1	249,63	252,41	252,76	248,54	248,91	247,80	246,94	248,39	243,58	241,40
Ortalama Spike 1 Sayması= 248,036 Ortalama Net Spike 1 Sayması= 245,636										
Spike 2	232,71	231,53	234,80	233,97	233,54	231,19	234,24	231,03	230,30	227,86
Ortalama Spike 2 Sayması =232,117 Ortalama Net Spike 2 Sayması =229,717										

Hesaplamaları yaparken ölçüm tarihine ait konsantrasyon değerleri gereklidir. Laboratuvar standartı ve spike’a ait değerler Tablo B.3’de verilmiştir.

**Tablo B.3** Laboratuvar standartı ve spike'ın TU değerleri

Ölçüm tarihi	17.04.2008
Lab. std'ının ölçüm tarihi	28.11.2006
Lab.std'ın ilk konsantrasyonu ( $X_{0,std}$ )	19993 TU
Lab. std için geçen süre	506 gün
Ölçüm tarihinde lab.std'ının konsantrasyonu ( $A_{ST}$ )	18494 TU
Spike'ın hazırlanma tarihi	28.11.2006
Spike'ın ilk konsantrasyonu ( $X_{0,spk}$ )	858 TU
Spike için geçen süre	506 gün
Ölçüm tarihinde spike'ın konsantrasyonu	794 TU

Kalibrasyon faktörü laboratuvar standartından hazırlanmış numunelerin sayılmasıyla bulunur. Kalibrasyon faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F(TU / cpm) = \frac{A_{std}}{N_{std}} \quad (B.3)$$

Tablo B.2'den ortalama net laboratuvar standart sayması ve Tablo B.3'den laboratuvar standartının ölçüm tarihindeki konsantrasyon değerleri denklem B.3'de yerine konulduğunda;

$$F = \frac{18494}{393,362} = 47,0152 \text{ cpm/TU} \sim 47,02 \text{ TU bulunur.}$$

Gerçek trityum konsantrasyonunun belirlenmesi için ne kadar zenginleştirme yapıldığının bilinmesi gerekmektedir. Zenginleştirme faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Z = \frac{N_{spk} \cdot F \cdot \frac{X_{0,std}}{X_{0,std}}}{X_{std-ölç}} \quad (B.4)$$

$$\text{1. spike için; } Z_1 = \frac{245,636 \times 47,02 \times \frac{19993}{858}}{18494} = 14,5523$$

$$2.\text{spike için; } Z_2 = \frac{229,717 \times 47,02 \times \frac{19993}{858}}{18494} = 13,6092$$

Spike hücreleri için  $Z_{\text{ort}} = 14,0808$  bulunur.

Spike hücrelerinden hesaplanan ortalama zenginleştirme faktörünün değeri, Denklem B.5'de yerine konularak her bir spike hücresi için zenginleştirme parametresi bulunur.

$$P = \frac{2,977}{Q} \times \frac{(W_i - W_f) \ln Z}{\ln \frac{W_i}{W_f}} \quad (\text{B.5})$$

1.spike için ;

$$P_1 = \frac{2,977}{690} \times \frac{(248,84 - 15,42) \ln 14,0808}{\ln \frac{248,84}{15,42}} = 0,9578$$

2. spike için;

$$P_1 = \frac{2,977}{690} \times \frac{(249,84 - 16,42) \ln 14,0808}{\ln \frac{249,84}{690}} = 0,9785 \text{ bulunur.}$$

Ortalama zenginleştirme parametresi  $P_{\text{ort}} = 0,9681$  olarak elde edilir.

Bu ortalama P değeri kullanılarak numunelerin konulduğu hücreler için zenginleştirme faktörü Denklem B.6'dan yararlanılarak hesaplanır:

$$Z = \exp \left[ \frac{PQ}{(W_i - W_f) \times 2,977} \ln \frac{W_i}{W_f} \right] \quad (\text{B.6})$$

Sazova şebeke suyu için;

$$Z = \exp \frac{0,9681 \times 690}{(249,24 - 16,62) \times 2,977} \ln \frac{249,24}{16,62} = 13,628 \text{ elde edilir.}$$

Bu değerleri trityum konsantrasyonunu veren bağıntıda yerine koymadan önce numunenin araziden alındığı tarih ile analiz tarihi arasındaki zaman düzeltmesi (D), aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$D = e^{-\lambda t} \quad (\text{B.7})$$

Sazova şebeke suyu için;

Alınma tarihi : 25.3.2008

Ölçüm tarihi : 17.4.2008 olduğuna göre aradan 22 gün geçmiştir. Buna göre;

$$D = e^{(-0,693 / 4500) \times 22} = 0,9966 \text{ 'dır.}$$

Bu değerler Denklem B.8'de yerine konulduğunda

$$A_{TU} = \frac{N_{num} \times A_{std}}{N_{std} \times Z} \times D \quad (\text{B.8})$$

$$A_{TU} = \frac{0,213 \times 18494}{393,362 \times 13,6233} \times 0,9966 = 0,73 \text{ TU}$$

olarak numunenin trityum konsantrasyonu bulunur.