

**DİJİTAL ÇAKIŞMA SAYIM YÖNTEMİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE 4Pİ-BETA-GAMA SAYIM
SİSTEMİNDE KARMAŞIK BOZUNMA ŞEMALİ BELİRLİ
RADYOİZOTOPLARA UYGULANMASI**

**DEVELOPMENT OF DIGITAL COINCIDENCE COUNTING
METHOD AND ITS APPLICATION IN 4PI-BETA-GAMMA
COUNTING SYSTEM ON CERTAIN RADIOISOTOPES
HAVING COMPLEX DECAY SCHEME**

NAMIK KEMAL ŞAHİN

DOÇ. DR. ŞULE ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

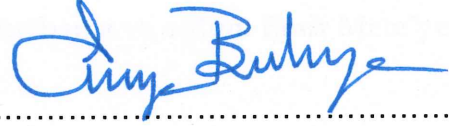
Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

NAMIK KEMAL ŞAHİN'nin hazırladığı "Dijital Çakışma Sayım Yönteminin Geliştirilmesi ve 4Pi-Beta-Gama Sayım Sisteminde Karmaşık Bozunma Şemalı Belirli Radyoizotoplara Uygulanması" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

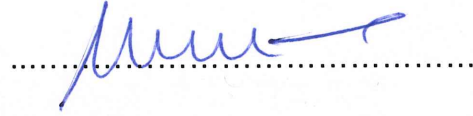
Prof. Dr. Enver BULUR

Başkan



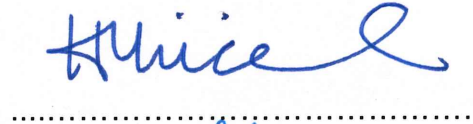
Doç. Dr. Şule ERGÜN

Danışman




Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Üye



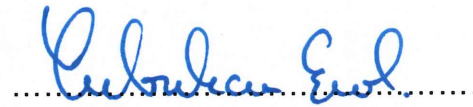
Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Erol ÇUBUKÇU

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Eşim Mihriban'a ve oğlum Emir Mete'ye,

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/ 09 / 2019



NAMIK KEMAL ŞAHİN

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

27 / 09 / 2019

 (İmza)

NAMIK KEMAL ŞAHİN

ÖZET

DİJİTAL ÇAKIŞMA SAYIM YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE 4Pİ-BETA-GAMA SAYIM SİSTEMİNDE KARMAŞIK BOZUNMA ŞEMALİ BELİRLİ RADYOİZOTOPLARA UYGULANMASI

Namık Kemal ŞAHİN

Doktora, NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERGÜN

Eylül 2019, 180 sayfa

Radyonüklit standardizasyonu için $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemlerinde veri alma ve işleme yöntemleri uzun yıllar analog elektronik modüller kullanılarak yapılmıştır. Bu modüllerin teminlerinin ve bakımlarının pahalı olması, radyasyon ölçüm sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak geleneksel sistemlere alternatif daha hızlı, esnek ve güvenli olan dijital veri alma ve işleme ihtiyacını doğurmuştur. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde bulunan bir dedektörden sinyal zamanını ve sinyale ait diğer bilgileri dijital kartlar kullanarak elde etmek ve bu bilgileri yazılımlar vasıtasıyla çevrimdışı bir şekilde analiz etmek, geleneksel geleneksel sistemlere kıyasla daha kolay ve yenilikçi bir yöntem olmuştur.

Bu tez çalışmasında, Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarında kurulumu yapılmış olan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ dijital çakışma sayım sisteminde veri analiz yöntemi olarak kullanılmak üzere özgün bir yazılım geliştirilmiştir. Bu gerçek zamanlı dijital çakışma yazılımı, beta-gama çakışmalı analiz yöntemini ve çakışmasız analiz yöntemini içermektedir. Özgün algoritmalar kullanılarak bu iki yöntemle aktivite hesaplamaları yapılmıştır.

Yazılımın doğruluğu ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerini ayrı ayrı içeren ve aktivitesi bilinen radyoaktif standart çözeltilerden belli miktarlarda alınarak ve sistemde ölçümleri gerçekleştirilerek yapılmıştır. Çakışmalı yöntemde ve çakışmasız yöntemde, basit bozunma şemalı ^{60}Co ve ^{133}Ba için ve nispeten daha karmaşık bozunma şemalı ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için elde edilen aktivite değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. İki yöntem arasında ^{60}Co için %0,3, ^{133}Ba için %0,18, ^{152}Eu için %0,1, $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için ise %0,08 fark bulunmuştur.

Ayrıca, Monte Carlo yöntemi kullanılarak $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde dedektör-kaynak etkileşimleri simüle edilerek Nal dedektörünün ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için gama tepki fonksiyonları elde edilmiş ve dedektör verimleri hesaplanmıştır. Bu verim değerleri ve deneysel olarak elde edilen gama sayım hızları kullanılarak ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktiviteleri hesaplanmıştır.

Çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem ve Monte Carlo yöntemi kullanılarak hesaplanan aktivite değerleri karşılaştırıldığında, çakışmalı yöntem ile çakışmasız yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında en fazla %0,3 göreceli fark bulunurken, çakışmalı yöntem ile Monte Carlo yöntemi arasında ise en fazla %2,5 göreceli fark olduğu görülmüştür. Bu tez çalışması çerçevesinde, özgün algoritmalar kullanılarak oluşturulan dijital çakışma yazılımı, laboratuvarında kurulu olan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemine hem basit hem de karmaşık bozunma şemalı radyonüklitler için uygulanmaya hazır durumdadır. Radyoaktivite ölçümü konusunda dünyanın önde gelen laboratuvarlarında bulunan bu birincil ölçüm yöntemi, bu tez çalışması sonucu TAEK Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarında da kullanılabilir duruma gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dijital çakışma sayımı, $4\pi\beta\text{-}\gamma$, çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem, verim dışı değerlendirme yöntemi, mutlak radyoaktivite ölçümü.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF DIGITAL COINCIDENCE COUNTING METHOD AND ITS APPLICATION IN 4PI-BETA-GAMMA COUNTING SYSTEM ON CERTAIN RADIOISOTOPES HAVING COMPLEX DECAY SCHEME

Namık Kemal ŞAHİN

Doctor of Philosophy, Department of NUCLEAR ENERGY ENGINEERING

Supervisor: Doç. Dr. Şule ERGÜN

September 2019, 180 pages

The methods of data acquiring and processing in the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting systems for radionuclide standardization have been employed by using analogue electronic modules for decades. Since the supply and maintenance of these modules are costly, the need for the digital data acquiring and processing systems which are faster, more flexible and more reliable have been arisen in parallel to the new advancements in radiation measurement systems. Achieving the signal parameters from the detector of a $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting system by using a digital card and analyzing these signal parameters offline by using computer programs became an easy and innovative alternative method for the conventional analogue systems.

In this thesis, a unique software has been developed to be used as data analysis method of the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting system setup in the Radionuclide Metrology Laboratories of Turkish Atomic Energy Authority (TAEK) for absolute activity standardization. This real-time coincidence counting software includes coincidence and anticoincidence methods. Activity calculations have been performed using unique algorithms of these methods. The validation of the software were done by determining the activity values of the standart radioactive solutions including ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu and $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radionuclides separately. Some amount of radioactive solutions were used as the source and then measured in the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting system. The data achieved from the counting system were analyzed in the software. The activity values of ^{60}Co and ^{133}Ba , which have relatively simple decay schemes, and of ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$, which have relatively much more complicated decay schemes, have been determined by both coincidence and anticoincidence methods in a good agreement. The relative bias values between the two methods are found as 0.3% for ^{60}Co , 0.18% for ^{133}Ba , 0.1% for ^{152}Eu and 0.08% for $^{166\text{m}}\text{Ho}$.

In addition, the Monte Carlo simulation of the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting system was performed, and the response functions of NaI detector for ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu and $^{166\text{m}}\text{Ho}$ are determined as the detector efficiencies. The efficiency values and the experimental count rates of ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu and $^{166\text{m}}\text{Ho}$ are used to calculate the activities of these radionuclides.

When the activity values of these radionuclides determined by the coincidence method, anticoincidence method and Monte Carlo method were compared, it is found that the results agree well with each other within at most 2.5% relative bias. The developed digital coincidence software is now ready to be applied to the measurements of all radionuclides having simple or complicated decay schemes in the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting system. This primary radioactivity measurement system, which is used in world's leading radioactivity measurement laboratories, has become availbale in TAEK Radionuclide Metrology Laboratories as a result of this thesis study.

Keywords: Digital coincidence counting, $4\pi\beta\text{-}\gamma$, coincidence method, anti-coincidence method, efficiency extrapolation method, absolute radioactivity measurement.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince esirgemediği yardımları ve değerli katkıları için ve aynı zamanda zor anlarımda göstermiş olduğu anlayış ve destek için danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şule ERGÜN'e en derin şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

Tez çalışmama olan değerli katkıları ve yönlendirmeleri için tüm jüri üyesi hocalarıma teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Emin YELTEPE'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan yazılım TAEK RHTDB Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarında kurulumu yapılan 4πβ-γ çakışma sayım sisteminde uygulanmaktadır. Bu sayım sistemi, "A1.H2.P1- RHTDB Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarında 4πβ-γ birincil standart radyoaktivite sayım sistemlerinin tasarımı, kurulması ve standardizasyon yöntemlerinin geçerli kılınması" başlıklı proje kapsamında kurulmuştur. 2017-2019 yılları arasında gerçekleştirilmiş olan bu proje TAEK tarafından desteklenmiştir. TAEK'e ve değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca her zaman bana olan güvenlerini ve desteklerini esirgemeyen sevgili anne ve babama, bana verdiği destek ile beraber gösterdiği sabır ve anlayış için sevgili eşim Mihriban ŞAHİN'e ve ona zaman ayıramadığımda bile anlayış ve sabır gösteren sevgili oğlum Emir Mete ŞAHİN'e teşekkür ediyorum, iyi ki varsınız.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	x
ŞEKİLLER.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Nükleer Bozunmanın Kısa Özeti	4
2.2. Aktivite Ölçümünde Birincil Yöntemler.....	11
2.2.1. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Sayım Yöntemi	12
2.2.2. Aktivite Ölçümünde Önemli Parametreler	15
2.2.2.1. Ölü Zaman	15
3. ÇAKIŞMA SAYIM YÖNTEMİ	20
3.1. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Sayım Yönteminde Verim Dışadeğerleme	20
3.2. Çakışmalı Yöntemde Sayım Hızlarına Uygulanan Düzeltmeler.....	26
3.2.1. Tek Kanallara Uygulanan Düzeltmeler	26
3.2.2. Çakışma Kanalına Uygulanan Uzamayan Ölü Zaman Düzeltmeleri 29	
3.2.2.1. Campion'un Yaklaşımı	30
3.2.2.2. Hayward'ın Yaklaşımı	31
3.2.2.3. Gandy'nin Yaklaşımı	32
3.2.2.4. Campion, Hayward ve Gandy Tarafından Geliştirilen Yaklaşımların Değerlendirilmesi.....	33
3.2.2.5. Cox-Isham ve Smith Uzamayan Ölü-Zaman Düzeltmesi	33
3.2.3. Çakışma Kanalına Uygulanan Uzayan Ölü-Zaman Düzeltmesi	35
3.3. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Yönteminin Diğer Türevleri	36
3.3.1. Çakışmasız Yöntem	36
3.3.1.1. Sayım Hızlarına Uygulanan Düzeltmeler	38
4. SAYIM SİSTEMİ ve MONTE CARLO SİMÜLASYONLARI	40
4.1. Sayım Sistemi ve Geometri.....	40

4.2.	Kaynakların Hazırlanması	43
4.3.	Monte-Carlo Simülasyonları ile Sistemin Optimizasyonu	45
5.	DİJİTAL ÇAKIŞMA SAYIMI YAZILIMI ve UYGULAMASI.....	51
5.1.	Dijital Çakışma Sayımı Veri Analiz Yazılımına Genel Bakış	51
5.2.	Çakışmalı Yöntemin Program Modülleri	53
5.2.1.	Ham Verinin Derlenmesi	53
5.2.2.	Enerji Spektrumlarının Oluşturulması	54
5.2.3.	Sinyal Gecikmesinin Belirlenmesi.....	54
5.2.4.	Enerjinin Filtrelemesi	55
5.2.5.	Ölü Zaman Uygulanması.....	56
5.2.6.	Sinyal Zaman Aralıklarının Belirlenmesi.....	57
5.2.7.	Çakışma Yapan Sinyallerin Belirlenmesi.....	57
5.2.8.	Aktivitenin Belirlenmesi	58
5.2.9.	Verim Dışadeğerleme Yöntemi	59
5.3.	Çakışmasız Yöntemin Program Modülleri	60
5.3.1.	Çakışma Yapmayan Sinyallerin Belirlenmesi	60
5.3.2.	Çakışmasız Yöntem ile Aktivite Hesabı	62
5.4.	Yazılımın Özeti	63
6.	AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLAR	66
6.1.	Monte Carlo Modellemelerinin Sonuçları.....	66
6.1.1.	Elektron – Plastik Sintilatör Etkileşimleri.....	66
6.1.2.	Gama Işını – Nal Etkileşimleri	68
6.2.	Çakışmalı Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar	73
6.2.1.	⁶⁰ Co Ölçümünün Sonuçları.....	73
6.2.2.	¹³³ Ba Ölçümünün Sonuçları	94
6.2.3.	¹⁵² Eu Ölçümünün Sonuçları	104
6.2.4.	^{166m} Ho Ölçümünün Sonuçları	118
6.2.5.	Belirsizlik Hesaplamaları	127
6.3.	Çakışmasız Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar.....	132
6.3.1.	⁶⁰ Co Ölçümünün Sonuçları.....	132
6.3.2.	¹³³ Ba Ölçümünün Sonuçları	138
6.3.3.	¹⁵² Eu Ölçümünün Sonuçları	144
6.3.4.	^{166m} Ho Ölçümünün Sonuçları	152
6.3.5.	Belirsizlik Hesaplamaları	158

6.4. Farklı Yöntemler ile Bulunan Sonuçların Karşılaştırılması.....	162
7. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME.....	163
8. KAYNAKLAR	165
EKLER	170
Ek 1. ^{152}Eu radyonüklitine ait bozunma şeması (Nucleide, 2019).....	170
Ek 2. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitine ait bozunma şeması (Nucleide, 2019).....	176
Ek 3. LINEST Fonksiyonu ve Belirsizlik Hesaplama Yöntemi	178
Ek 4. Sayım İstatistiğinin Belirsizliğini Hesaplama	178
Ek 5. Toplam Belirsizlik Hesaplama.....	179
ÖZGEÇMİŞ	180

ÇİZELGELER

Çizelge 5.1. Yazılımı oluşturan program modülleri ve kısa açıklamaları.	51
Çizelge 6.1. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin bozunması sonucu ortaya çıkan beta parçacığı, iç dönüşüm elektronları ve Auger elektronları enerjilerinin plastik sintilatör malzemedeki davranışlarının Monte Carlo yöntemi ile belirlenmesi (Enerji değerleri Nucleide, 2019'dan alınmıştır).....	67
Çizelge 6.2. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitleri için Nal dedektörünün EGS4 ile elde edilen toplam verim değerleri, deneysel olarak belirlenen sayım hızları ve hesaplanan aktivite değerleri (aktivite değerinde toplam belirsizlik $k=2$ için hesaplanmıştır).	73
Çizelge 6.3. ^{60}Co aktivite hesabı için 5 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	80
Çizelge 6.4. ^{60}Co aktivite hesabı için 5 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	81
Çizelge 6.5. ^{60}Co aktivite hesabı için 10 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	83
Çizelge 6.6. ^{60}Co aktivite hesabı için 10 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	84
Çizelge 6.7. ^{60}Co aktivite hesabı için 30 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	86
Çizelge 6.8. ^{60}Co aktivite hesabı için 30 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	87
Çizelge 6.9. ^{60}Co aktivite hesabı için 50 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	89

Çizelge 6.10. ^{60}Co aktivite hesabı için 50 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	90
Çizelge 6.11. 5, 10, 30, 50, 100, 200 ve 400 μs uzamayan ölü zaman değerleri için hesaplanan ^{60}Co aktivite değerleri.	92
Çizelge 6.12. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 53 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	99
Çizelge 6.13. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 198 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	100
Çizelge 6.14. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 53 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	102
Çizelge 6.15. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 198 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	103
Çizelge 6.16. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 43 - 588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	109
Çizelge 6.17. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 176 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	110
Çizelge 6.18. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 495 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	111
Çizelge 6.19. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 43 - 588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	113
Çizelge 6.20. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 176 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	114

Çizelge 6.21. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 495 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	116
Çizelge 6.22. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 530 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	122
Çizelge 6.23. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 160 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	123
Çizelge 6.24. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 530 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	125
Çizelge 6.25. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 160 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	126
Çizelge 6.26. ^{60}Co aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem) ...	129
Çizelge 6.27. ^{133}Ba aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem) ..	129
Çizelge 6.28. ^{152}Eu aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem) ..	130
Çizelge 6.29. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem)	130
Çizelge 6.30. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{60}Co aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	131
Çizelge 6.31. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{133}Ba aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	131
Çizelge 6.32. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{152}Eu aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	131
Çizelge 6.33. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	132
Çizelge 6.34. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 852- 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	133
Çizelge 6.35. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 852- 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	134

Çizelge 6.36. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 852-2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	136
Çizelge 6.37. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 852-2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	137
Çizelge 6.38. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 53-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	139
Çizelge 6.39. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 198-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	140
Çizelge 6.40. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 53-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	142
Çizelge 6.41. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 198-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	143
Çizelge 6.42. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 43-588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	145
Çizelge 6.43. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 176-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	146
Çizelge 6.44. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 495-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	147
Çizelge 6.45. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 43-588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	149
Çizelge 6.46. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 176-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	150

Çizelge 6.47. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 495-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	151
Çizelge 6.48. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 160-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	153
Çizelge 6.49. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 530-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	154
Çizelge 6.50. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 160-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	156
Çizelge 6.51. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 530-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.	157
Çizelge 6.52. ^{60}Co aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem).	159
Çizelge 6.53. ^{133}Ba aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem)	159
Çizelge 6.54. ^{152}Eu aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem)	159
Çizelge 6.55. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem).....	160
Çizelge 6.56. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{60}Co aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	160
Çizelge 6.57. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{133}Ba aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	161
Çizelge 6.58. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{152}Eu aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	161
Çizelge 6.59. Çakışmasız yöntemle hesaplanan $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).	161
Çizelge 6.60. Çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem ve Monte Carlo yöntemi ile bulunan aktivite değerlerinin karşılaştırılması (toplam belirsizlik değerleri $k=2$ için verilmiştir).....	162

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Kararlı ve kararlı olmayan radyonüklitlerin proton sayısına karşılık nötron sayısı grafiğindeki yerleri. Mavi çizgi kararlı çekirdeklerin bulunduğu bölgeyi temsil eder (Anonim, 2019) .	5
Şekil 2.2. Uzayan ve uzamayan ölü zaman modellerinin şematik gösterimi (Pomme, Fitzgerald ve Keightley, 2015'den alınarak yeniden düzenlenmiştir). Kırmızı dairesel başlığa sahip sinyaller ölü zamandan dolayı tespit edilemeyen sinyallerdir.	17
Şekil 2.3. Uzayan ve uzamayan ölü zaman modelleri için gözlemlenen sayım hızının gerçek sayım hızına bağlı değişimi (Knoll, 2000'dan alınarak değiştirilmiştir).	19
Şekil 3.1. Geleneksel bir $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminin şematik gösterimi.	21
Şekil 3.2. Çakışmalı yöntemde ölü zaman ve ayırma zamanı değerlerinin belirlenmesinde doğru olmayan bir örnek.	30
Şekil 3.3. Çakışmasız yöntemin çalışma prensibinin şematik gösterimi.	37
Şekil 3.4. Çakışmasız yöntemde çakışma yapmayan gama sinyalinin belirlenmesinin şematik gösterimi.	38
Şekil 4.1. Bu çalışmada kullanılan dijital $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminin şematik gösterimi.	42
Şekil 4.2. Bu çalışmada kullanılan dijital $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sistemi.	42
Şekil 4.3. Ölçüm yapılmak üzere hazırlanmış kaynaklar. Sıvı kaynak çözeltiler çeşitli kalınlıkta dairesel plastik sintilatöre damlatılmış, kurutulduktan sonra üzeri başka bir plastik sintilatör ile kapatılmıştır.	44
Şekil 4.4. Beta ve gama radyasyonunun plastik sintilatör malzeme içerisindeki etkileşimlerinin incelenmesi amacıyla yapılan Monte Carlo modelinin şematik gösterimi.	48
Şekil 4.5. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminin EGS4 kodu ile modellenmesi.	50
Şekil 5.1. Program modüllerinin çalışma sıralaması.	53
Şekil 5.2. Ham_veri_oku_yaz modülünün işleyişi.	54
Şekil 5.3. Sinyal_gecikmesi modülünün işleyişi.	55
Şekil 5.4. Enerji_filtreleme modülünün işleyişi.	56
Şekil 5.5. Uzayan_ölü_zaman ve uzamayan_ölü_zaman modüllerinin işleyişleri.	56

Şekil 5.6. Zaman_araligi modülünün işleyişi.	57
Şekil 5.7. Cakisma modülünün işleyişi.	58
Şekil 5.8. Aktivite_hesabi modülünün işleyişi.	59
Şekil 5.9. Cakismasiz modülünün işleyişi.	61
Şekil 5.10. Cakismasiz_aktivite_hesabi modülünün işleyişi.	63
Şekil 6.1. EGS4 kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{60}Co gama spektrumu.	68
Şekil 6.2. EGS4 kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{133}Ba gama spektrumu.	69
Şekil 6.3. EGS4 kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{152}Eu gama spektrumu. Üstteki spektrum elektron yakalama olayı sonucu yayınlanan gama enerjilerini, alttaki spektrum ise beta bozunması sonucu yayınlanan gama enerjilerini göstermektedir.....	70
Şekil 6.4. EGSnrc kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen $^{166\text{m}}\text{Ho}$ gama spektrumu.....	71
Şekil 6.5. ^{60}Co bozunma şeması (Nucleide, 2019).....	74
Şekil 6.6. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{60}Co beta enerji spektrumu.	75
Şekil 6.7. ^{60}Co ölçümü sonucunda elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.	76
Şekil 6.8. ^{60}Co gama enerji spektrumu. Mavi çizgiler arasında kalan bölgeler hesaplama yapmak için seçilen gama enerji aralıklarını göstermektedir.....	77
Şekil 6.9. ^{60}Co ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sifıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.	78
Şekil 6.10. 5 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	82
Şekil 6.11. 10 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	85
Şekil 6.12. 30 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	88
Şekil 6.13. 50 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	91

Şekil 6.14. Uygulanan uzamayan ölü zaman değerine karşılık hesaplanan ^{60}Co aktivite değerlerinin değişimi.	93
Şekil 6.15. ^{133}Ba bozunma şeması (Nucleide, 2019).....	95
Şekil 6.16. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{133}Ba elektron enerjisi spektrumu.	96
Şekil 6.17. ^{133}Ba ölçümüne ait beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.	97
Şekil 6.18. ^{133}Ba gama enerji spektrumu. Mavi çizgilerin arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarıdır.....	98
Şekil 6.19. ^{133}Ba ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.	98
Şekil 6.20. 10 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.	101
Şekil 6.21. 30 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.	104
Şekil 6.22. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{152}Eu için beta ve elektron enerjisi spektrumu.....	105
Şekil 6.23. ^{152}Eu ölçümünde elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.	106
Şekil 6.24. ^{152}Eu gama enerji spektrumu. Renkli çizgiler arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarını gösterir.	107
Şekil 6.25. ^{152}Eu ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.	107
Şekil 6.26. 5 μs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{152}Eu verim dışadeğerleme fonksiyonları.	112
Şekil 6.27. 30 μs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{152}Eu verim dışadeğerleme fonksiyonları.	117
Şekil 6.28. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen $^{166\text{m}}\text{Ho}$ ölçümünde elde edilen beta enerji spektrumu.	119
Şekil 6.29. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ ölçümünde elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.	120
Şekil 6.30. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için gama enerji spektrumu. Mavi ve yeşil çizgilerin arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarını gösterir.....	121

Şekil 6.31. ^{166m}Ho ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.	121
Şekil 6.32. 10 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	124
Şekil 6.33. 30 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	127
Şekil 6.34. Çakışmasız yöntemde 5 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	135
Şekil 6.35. Çakışmasız yöntemde 10 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	138
Şekil 6.36. Çakışmasız yöntemde 5 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	141
Şekil 6.37. Çakışmasız yöntemde 10 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	144
Şekil 6.38. Çakışmasız yöntemde 5 μs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{152}Eu verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	148
Şekil 6.39. Çakışmasız yöntemde 10 μs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{152}Eu verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	152
Şekil 6.40. Çakışmasız yöntemde 5 μs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	155
Şekil 6.41. Çakışmasız yöntemde 10 μs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışı değerlendirme fonksiyonları.	158

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

β	Beta
γ	Gama
ϵ_{β}	Plastik sintilatörün beta verimi
ϵ_{γ}	Nal dedektörün gama verimi
$\epsilon_{\beta\gamma}$	Platik sintilatörün gama verimi
ϵ_{ce}	Plastik sintilatörün dönüşüm elektronu verimi
α	Toplam dönüşüm katsayısı
R_{β}	Gözlemlenen beta sayım hızı
R_{γ}	Gözlemlenen gama sayım hızı
$R_{\beta\gamma}$	Gözlemlenen çakışma sayım hızı
ρ_{β}	Düzeltilmiş beta sayım hızı
ρ_{γ}	Düzeltilmiş gama sayım hızı
$\rho_{\beta\gamma}$	Düzeltilmiş çakışma sayım hızı
τ_{β}	Beta kanalına uygulanan ölü zaman
τ_{γ}	Gama kanalına uygulanan ölü zaman
r_{β}	Beta çözümüleme zamanı
r_{γ}	Gama çözümüleme zamanı
δ	Gama sinyallerine uygulanan gecikme zamanı

Kısaltmalar

Nal	Sodyum İyodür
HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum
PVT	Poliviniltoluen
Bq	Becquerel
ADC	Analogtan Dijitale Dönüştürücü

1. GİRİŞ

Radyoaktivite ölçümü ile ilgili bilim dalına radyonüklit metrolojisi denir (Judge ve ark., 2014). Radyonüklit metrolojisi, nükleer fizik, radyokimya, sinyal işleme, istatistiksel analiz gibi birçok değişik alandan faydalanırken, temel araştırmalar, endüstriyel uygulamalar, radyonüklit üretimi, nükleer tıp, nükleer enerji ve nükleer güvenlik gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır (Karam, 2018). Çevresel izleme, nükleer güvenlik, nükleer tıp ve radyasyondan korunma gibi birçok alanda gerek yasalara uygunluk gerekse de kişilerin radyasyondan korunmasını sağlamak amacıyla rutin radyoaktivite ölçümleri yapılmaktadır. Hayatın birçok alanında yapılan bu radyoaktivite ölçümlerinin doğruluğu için ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, aktiviteleri bilinen referans malzemeler kullanılarak yapılır. Bu nedenle, doğru bir ölçüm yapabilmek için öncelikle doğru bir kalibrasyon yapmak oldukça önemlidir. Doğru bir kalibrasyon yapabilmek için ise kullanılan standart referans malzemelerin aktivitelerinin yüksek kesinlikte ve yüksek doğrulukta belirlenmiş olması gerekmektedir.

Radyoaktivite veya radyonüklit standardizasyonunda kullanılan en güçlü araçlardan biri $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım tekniğidir. Bu teknik kullanılarak çoğu radyonüklit için yüksek doğrulukta ve yüksek hassasiyette yani düşük belirsizlikte radyoaktivite ölçümleri yapabilmek mümkündür. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi, bir radyonüklitin radyoaktif parçalanması olayında, β bozunmasını takiben γ ışınlarının da yayınlandığı durumlarda, o radyonüklitin aktivitesini dedektör veriminin veya nükleer bozunma parametrelerinin detaylı bir şekilde ele alınmasına gerek kalmaksızın belirlemeye imkân veren birincil bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanıldığı sistemlerde her biri idealde tek tip bir radyasyona (beta veya gama) duyarlı olan iki dedektöre ihtiyaç vardır. Bu yöntemde iki dedektörden elde edilen beta ve gama sayım hızları ve aynı zamanda çakışma yapan beta ve gama sayım hızı değerleri belirlenerek radyoaktivite ya da kısaca aktivite hesabı yapılır.

Radyonüklit standardizasyonu için $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemlerinde veri alma ve işleme yöntemleri uzun yıllar boyunca analog elektronik modüller kullanılarak yapılmıştır. Bu modüllerin teminlerinin ve bakımlarının pahalı olması

ve özellikle veri alma işlemlerinde yüksek derecede tecrübeli çalışanlara ihtiyaç duyulması daha esnek ve güvenli olan dijital veri alma ve işleme ihtiyacını doğurmuştur. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde bulunan bir dedektörden sinyal zamanını ve sinyale ait diğer bilgileri dijital olarak elde etmek geleneksel geleneksel sistemlere daha kolay ve yenilikçi bir alternatif olmuştur. Radyonüklit standardizasyonu amacıyla dijital çakışma sayım tekniği, ilk kez 1996 yılında uygulanmıştır ve sonraki yıllarda yapılan çalışmalarla geliştirilmiştir (Buckman ve lus, 1996).

Dijital çakışma sayım sisteminde daha az elektronik modül kullanıldığından, bu sistem daha kompakttır. Dijital sistemde dedektörden çıkan sinyallerin genliklerinin yükseltilmesini takiben (ön yükselteç sonrası) kullanılan bütün analog elektronik modüllerin yerini sinyallerin genlik ve zaman bilgilerini kaydeden bir sayısallaştırıcı alır. Bu sayısallaştırıcı genlik ve zaman bilgilerini liste formatında (list mode) kaydeder ve bilgisayar diskine aktarır. Bir yazılım vasıtasıyla bu bilgiler analiz edilerek ölçümü yapılan kaynağın aktivitesi belirlenmiş olur. Dijital çakışma sistemlerinde veri analiz yazılımları çok büyük oranda kullanıcıların kendileri tarafından geliştirilmiş olup ticari olarak bu yazılımları elde etmek oldukça güç ve maliyetlidir.

2017 yılında başlatılan bir Türkiye Atom Enerjisi Kurumu projesi kapsamında Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı bünyesinde yer alan Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarına $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi kurulması kararlaştırılmıştır (Proje kodu A1.H2.P1). Proje kapsamında gerekli cihaz ve malzeme alımlarının ardından sistemin kurulumu yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, kurulumu yapılan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminin Monte Carlo yöntemi ile modellenmesi, optimizasyonu ve sistemde kullanılacak uygun bir veri analiz yazılımı geliştirilmiştir. Aktiviteleri bilinen farklı standart referans kaynakların $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde ölçümleri yapılarak geliştirilen yazılımın doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca, EGS4 Monte Carlo kodu kullanılarak çakışma sayım sisteminin modellenmesi yapılmıştır ve çeşitli radyoizotoplar için dedektör tepki fonksiyonları belirlenmiştir. Bu tepki fonksiyonları kullanılarak gama dedektörünün sayım verimi değerleri hesaplanmış ve ölçümü yapılan standart kaynakların aktiviteleri hesaplanmıştır. Bu yöntem ile bulunan aktivite değerleri yazılım ile bulunan aktivite değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım çakışmalı yöntemin yanı sıra, çakışmalı yönteminin bir türevi olan çakışmasız yöntem ile de aktivite hesabı yapılabilmektedir. Her iki yöntem için de algoritmalar geliştirilerek program modülleri oluşturulmuştur. Çakışmasız yöntem kullanılarak bulunan aktivite değerleri çakışmalı yöntem ile bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bu tezin içerik olarak yapısını aşağıdaki gibidir:

Bölüm 2’de nükleer bozunma, bozunma çeşitleri, radyonüklit metrolojisi ve aktivite ölçüm sistemleri hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Ayrıca, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi konusuna ayrıntılı bir giriş yapılmıştır. Tez boyunca kullanılacak terminolojinin tanımları yapılmıştır. Ayrıca, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi ile ilgili uluslararası alanda yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, dünya genelinde kullanımda olan dijital çakışma sistemlerine ve yapılan standardizasyon çalışmalarına yer verilmiştir.

Bölüm 3’te $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi ile ilgili parametrelere uygulanan ve literatürde bulunan çok sayıda düzeltme formüllerine yer verilmiştir. Bu formüllerin sınır koşulları, avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Çakışmalı yöntemin bir türevi olan çakışmasız yöntemin çalışma prensipleri özetlenmiş ve bu yöntemde kullanılan düzeltmelere yer verilmiştir.

Bölüm 4’te $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde kullanılan dedektörler ve sistemin diğer bileşenleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sistemin geometri tanımlaması yapılarak Monte Carlo yöntemini kullanan EGS4 kodu ile yapılan optimizasyon ve tepki fonksiyonu çalışmalarına yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, ölçümlerde kullanılan kaynakların hazırlanma prosedürleri açıklanmıştır.

Bölüm 5, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemine uyumlu olarak geliştirilen veri analiz yazılımı ile ilgili genel bilgileri ve yazılımda yer alan her bir program modülünün tanımlarını içermektedir.

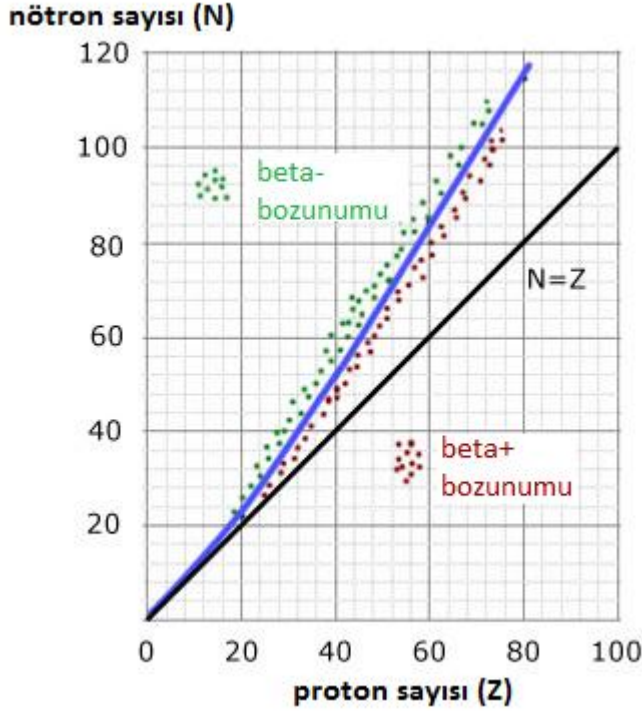
Bölüm 6’da $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde yapılan radyonüklitlerin geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen detaylı analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem ve Monte Carlo metodu ile hesaplanan aktivite değerleri karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Nükleer Bozunmanın Kısa Özeti

Atom numarası Z , atom ağırlığı A ile tanımlanan ve ${}_Z^AX$ (X , elementin kimyasal sembolüdür) şeklinde ifade edilen atom çekirdeklerine nüklit denir. Atom numarası, Z , atom çekirdeğindeki proton sayısına, atom ağırlığı ise atom çekirdeğindeki proton ve nötronların toplam sayısına (nükleon sayısına) eşittir. Nötr bir atomda, çekirdekteki proton sayısı, Z , kadar elektron bulunur. Elektronlar atomun yörüngelerinde bulunur. Protonlar pozitif nükleer yüke sahipken, elektronlar aynı şiddette fakat negatif nükleer yüke sahiptirler. Nötronlar ise yüksüzdürler.

Nükleonlar, protonlar arasındaki elektromanyetik (Coulomb) itme kuvveti ve nükleonlar arasındaki nükleer çekme kuvveti altında çekirdekte bir arada bulunurlar. Düşük atom numarasına sahip atomlarda güçlü nükleer çekme kuvveti (Coulomb) itme kuvvetine karşı üstünlük sağlar ve nükleon ayrılması meydana gelmez. Atom numarası arttıkça çekirdek hacmi de artar ve dolayısıyla çekirdeğin zıt taraflarında birbirlerine uzak haldeki protonlar daha büyük bir ayrılma eğilimi gösterirler. Bu durumda protonlar arasındaki Coulomb itme kuvveti nükleonlar arasındaki güçlü nükleer çekme kuvvetine üstünlük sağlar. Çekirdeğin güçlü bir şekilde bağlanması için nötronların varlığına ihtiyaç vardır. Bu etkiler kararlı ve kararsız (radyoaktif) nüklitler için nötron sayısına karşı proton sayısının çizildiği Şekil 2.1'de görülebilir.



Şekil 2.1. Kararlı ve kararlı olmayan radyonüklitlerin proton sayısına karşılık nötron sayısı grafiğindeki yerleri. Mavi çizgi kararlı çekirdeklerin bulunduğu bölgeyi temsil eder (Anonim, 2019) .

Proton sayısının veya nötron sayısının fazla olduğu radyoaktif çekirdekler, kararlı çekirdeklerin bulunduğu bant olan kararlılık vadisinin her iki tarafında bulunur. Kararlılık durumu için nötron-proton oranı düşük atom numaralı çekirdeklere yaklaşık birdir.

Atomun kendisinin ve çekirdeğinin tekrar yapılanması ile sonuçlanan, atom çekirdeğinin kendiliğinden meydana gelen bir dönüşüm ile daha düşük enerjili nükleer seviye veya seviyelere geçiş yaptığı nüklitlere radyonüklit denir. Atom çekirdeğinin mümkün olan en alt enerji seviyesinde yani temel seviyede olmadığı durumlarda nükleer bozunma kaçınılmazdır ancak bu bozunmanın ne zaman meydana geleceğini tahmin etmek imkansızdır.

Nükleer bozunma, ana bir çekirdekten ürün bir çekirdeğin oluştuğu ve bu sırada atom numarasının değiştiği bir dönüşümdür. Bu dönüşüm sırasında ürün çekirdeğin üst uyarılmış seviyelerinden alt uyarılmış seviyelere enerji geçişleri meydana gelir. Bir radyonüklitin bozunması çeşitli bozunma biçimleri vasıtasıyla

olur. Bu bozunma biçimlerinin gerçekleşme yoğunluğu dallanma oranı olarak tanımlanır.

Kendiliğinden meydana gelen nükleer geçişler sonucunda bir çekirdeğin iyonlaştırıcı radyasyon yayınlamaya bozunması olayına radyoaktivite denir. Bir radyonüklitin bozunma oranına o radyonüklitin aktivitesi denir ve A ile gösterilir (ICRU, 1994). Belli bir sürede, belli bir enerji seviyesinde bulunan bir miktar radyonüklitin aktivitesi, beklenen değerdir ve bu enerji seviyesinden yapılan nükleer geçişlerin birim zamandaki sayısıdır (NCRP, 1985).

Aktivitenin birimine becquerel denir ve sembolü Bq olarak gösterilir. SI birim sisteminde 1 saniyede 1 bozunma yapan radyonüklitin aktivitesi 1 Bq'dir. Bir radyonüklitin mutlak standardizasyonu demek, belli bir süre içerisinde meydana gelen nükleer geçişleri doğrudan sayarak ya da başka bir aktivitesi bilinen standart kullanmaksızın yapılan ölçüm vasıtasıyla o radyonüklitin aktivitesini bulmak demektir. Bir kaynağın birim ağırlığında bulunan aktiviteye spesifik aktivite ya da aktivite konsantrasyonu denir.

Bir örnekte t anında N radyoaktif atom varsa, bu atomların bozunma oranı atom sayısı ile orantılıdır ve aşağıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilir:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

Bu denklemde λ bozunma sabitidir ve her radyonüklit için tektir. λ ile yarı-ömür ($T_{1/2}$) arasında şu ilişki vardır: $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2}$.

Yukarıdaki denklemin integrali alındığında zamanla üstel olarak azalan radyoaktif atom sayısı bulunmuş olur:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

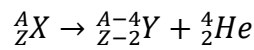
Bu eşitlikte, N_0 , $t = 0$ anındaki atom sayısıdır. Aktivite, $A = \lambda N$ olarak tanımlandığından ve A_0 , $t = 0$ anındaki aktivite değeri olduğundan,

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

eşitliği aktivitenin zamanla değişimini gösterir. Belirtilen aktivitenin ait olduğu tarihe referans tarih denir.

Radyonüklitlerin yarı-ömür, bozunma biçimi, dallanma oranları, radyasyon enerjileri ve bu enerjilerin yayınlanma olasılığı gibi temel özellikleri çeşitli kaynaklarda bulunabilir. Bu kaynaklardan alınan bilgiler Nichols tarafından özetlenmiştir (Nichols, 2006). 1995 yılında radyoaktivite ölçümü konusunda uzmanlaşmış laboratuvarların katılımıyla gerçekleştirilen uluslararası bir işbirliği olan Bozunma Datası Ölçme Projesi (DDEP) oluşturulmuştur. Bu proje kapsamında güvenilir ve güncellenmiş bozunma verisi üretilmiştir ve üretilmeye devam edilmektedir (Be ve ark., 2004a, 2004b, 2006). Tüm radyonüklitlere ait bozunma verisine http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm web adresinden ulaşılabilir (Dulieu ve ark., 2004).

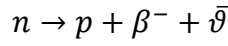
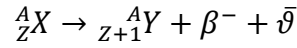
Alfa bozunması, kararsız bir çekirdeğin yüksek hızlarda bir alfa parçacığı (${}^4\text{He}$) yayınlarak bozunması olayıdır. Alfa bozunması yapan nispeten hafif radyonüklitler için enerji seviyeleri arasındaki geçiş genellikle ürün radyonüklitin temel seviyesine doğrudan olur ve yayınlanan alfa parçacıkları tek enerjilidir. Daha ağır radyonüklitler için birçok geçiş olasılıkları vardır ve her bir geçiş ürün radyonüklitin farklı uyarılmış enerji seviyelerine olabilir. Bu durumda yayınlanan alfa parçacıkları tek enerjili değildirler, birkaç farklı enerjide alfa parçacıkları yayınlanabilir. Bu bozunma olayı aşağıdaki şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:



Burada X ana radyonüklitin kimyasal sembolü, Y ise ürün radyonüklitin kimyasal sembolüdür. Belli bir geçiş için, toplam enerji Q_α (ana ve ürün radyonüklitlerin taban seviyeleri arasındaki sabit enerji farkı), alfa parçacığı ($E_{\alpha i}$ enerjisi), geritepki çekirdeği ($E_{r i}$ enerjisi) ve ürün radyonüklitin herhangi bir uyarılmış enerji seviyesi (E_i enerjisi) arasında paylaşılır: $Q_\alpha = E_{\alpha i} + E_{r i} + E_i$.

Beta bozunması atomdan bir elektron (β^-) ya da pozitron (β^+) yayınlanması olayıdır. Her iki durumda da atomun kütle numarası değişmezken, atom numarası bir azalır ya da artar.

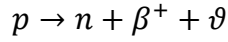
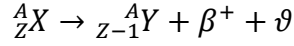
Nötron sayısı proton sayısından fazla olan radyonüklitlerde genellikle β^- bozunması meydana gelir. Bu olayda bir nötronun protona dönüşmesi sonucu bir elektron ve bir anti-nötrino yayınlanır. Bu bozunma aşağıdaki gibi şematik olarak gösterilebilir:



β^- bozunmasında belli bir enerjide beta parçacığı yayınlanabilmesinin için ilk atom ağırlığının son atom ağırlığından fazla olmasıdır. Çekirdekten yayınlanan beta parçacığının (elektronun) boşluğu orbital bir elektronun atoma eklenmesiyle telafi edilir.

Bozunum sonucunda ortaya çıkan ürün radyonüklitin kütlesi diğer ortaya çıkan ürünlere göre çok daha fazla olduğu için ürün radyonüklitin hemen hemen durgun olduğu ve enerjisi olmadığı farz edilir. Bu durumda bozunum reaksiyonunun maksimum enerjisi elektron ve anti-nötrino arasında paylaşılır. Bu paylaşım olayında elektron ve anti-nötrinin maksimum reaksiyon enerjisinden alacağı oranlar rastlantısaldır ve her bir radyonüklit için özeldir. Belli sayıda bozunum için enerjinin tamamını anti-nötrino alabilirken, belli sayıda bozunum için enerjinin tamamını elektron da alabilir. Fakat çoğunlukla bu enerjiyi değişik oranlarda paylaşırlar. Bu yüzden beta parçacığının enerji spektrumu sıfırdan maksimum beta enerjisi arasında süreklidir.

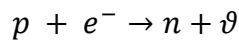
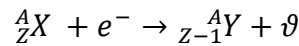
Nötron sayısı proton sayısından az olan radyonüklitlerde genellikle β^+ bozunması meydana gelir. Bu olayda bir protonun nötrona dönüşmesi sonucu bir pozitron ve bir nötrino yayınlanır. Bu bozunma aşağıdaki gibi şematik olarak gösterilebilir:



Pozitron yayınlaması, ancak ana radyonüklitin atom ağırlığının ürün radyonüklitin atom ağırlığından en az 2 elektron durgun kütlesi ($2m_0$) kadar fazla olması durumunda mümkündür. Enerji olarak ise fark en az 1,022 MeV ($2m_0c^2$) olmalıdır.

Pozitronun maksimum enerjisi (E_{β^+max}), ana ve ürün radyonüklitlerin temel seviyeleri arasındaki atom ağırlıklarının farkından (Q^+) bozunmanın meydana geldiği uyarılmış seviyenin enerjisi (E_i) ve $2m_0c^2$ enerjisi çıkarıldıktan sonra kalan enerjiye eşittir. Maksimum enerji pozitron ve nötrino arasında paylaşılır. Bu yüzden β^+ enerjisi sıfır ile maksimum enerji arasında sürekli bir spektruma sahiptir.

Nötron sayısı proton sayısından az olan radyonüklitlerde, ilk ve son enerji seviyeleri arasındaki fark, bazen yukarıda pozitron bozunması için bahsedilen kriteri sağlayamaz. Bu durumda ana radyonüklit elektron yakalama diye bilinen olay vasıtasıyla bozunabilir. Ancak, eğer pozitron bozunması için şartlar sağlanırsa, bu iki olay birbirinin alternatifi gibi davranır ve her iki olay sonucunda da aynı ürün radyonüklit oluşur. Atomun yörüngelerinde bulunan elektronların kuantum mekaniği davranışları göz önüne alındığında, bu elektronların atomun çekirdeğine girebilmeleri ve bir protonun nötrona dönüştürmeleri mümkündür (Keightley, 2008). Bu olay daha çok iç yörüngede bulunan elektron için geçerlidir. Elektron yakalama olayı aşağıda şematik olarak gösterilmiştir.



İç yörüngelerde birinden yakalanan elektronun bıraktığı boşluk dış yörüngelerden gelen bir elektronla kapatılır. Dış yörüngedeki elektronların iç yörüngelere doğru hareketi, bir başka deyişle iç yörüngedeki boşluğun dış yörüngelere doğru hareketi, yörüngelerde yeni bir elektron yapışmasına yol

açar. Meydana gelen bu ardışık hareketler karakteristik X-ışınlarının yayınlanmasına ile sonuçlanır. Bu X-ışınlarının enerjisi, elektronun koptuğu ve bağlandığı yörüngelerdeki bağlanma enerjilerinin farkı kadardır. Yayınlanan X-ışınlarından bazıları dış yörünge elektronlarından biriyle veya birkaçıyla çarpışıp enerjisini elektronlara aktarabilir. Atomdan kopan bu elektronlara Auger elektronları denir (Be ve ark., 1999).

Yukarı anlatılan bozunma tiplerinden birisinin ardından ürün radyonüklitin uyarılmış enerji seviyelerinden birinde veya birkaçında kalma olasılığı vardır. Bir uyarılmış enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine ya da taban seviyesine geçiş bir gama ışını salınımı ile olur. Bu gamanın enerjisi seviyelerin enerjileri arasındaki farka eşittir. İki uyarılmış seviye arasında yayınlanan gama her zaman tek enerjilidir. Bir uyarılmış seviyeden yapılan gama geçişi taban seviyeye değilse, taban seviyeye ulaşılan kadar enerji seviyeleri arasında gama geçişleri ardışık olarak devam eder.

Uyarılmış seviyeler arasındaki enerji, her zaman gama salınımına neden olmaz, bunun yerine yörüngede bulunan bir elektron ile etkileşim yapar ve bu etkileşim sonucunda elektron atomdan kopar. Kopan elektronun enerjisi, uyarılmış iki seviye arasındaki enerji farkından elektronun bağlanma enerjisi kadar daha azdır. Gerçekleşen bu olaya iç dönüşüm, bu olay sonucu kopan elektrona da iç dönüşüm elektronu denir. Elektronun bağlanması enerjisi her yörüngede farklıdır. Dolayısıyla belirli iki uyarılmış seviye arasındaki geçiş farklı yörüngelerden elektron koparabildiği için, iç dönüşüm elektronlarının enerjisi farklı tek değerlerde olur. Belirli bir gama geçişi için iç dönüşüm olayının derecesine iç dönüşüm katsayısı denir. İç dönüşüm katsayısı α ile gösterilir. Gama yayınlanma olasılığı P_γ , iç dönüşüm elektronunun yayınlanma olasılığı P_{ce} olarak tanımlanırsa, $\alpha = P_{ce} / P_\gamma$ olur. $P_{ce} + P_\gamma = 1$ olduğundan, iç dönüşüm derecesi bilindiğinde $P_{ce} = \alpha / (1+\alpha)$ ve $P_\gamma = 1 / (1+\alpha)$ olarak bulunur.

Elektron yakalama olayında olduğu gibi, iç dönüşüm olayının sonucunda iç yörüngede elektron kopmasıyla bırakılan boşluk dış yörüngeden gelen bir elektron ile doldurulur ve bu ardışık olaylar böylece devam eder. Elektronların iç yörüngelere hareketi sırasında karakteristik X-ışınları ve Auger elektronları yayınlanır.

Uyarılmış enerji seviyeleri arasındaki gama geçişleri çoğunlukla hemen (nanosaniyeler içinde) olur. Ancak, bazı seviyelerden gama salınımı gecikmeli olabilir. Bu seviyelere yarıkararlı seviyeler denir ve m üst simgesi ile gösterilir (^{99m}Tc gibi). Bu tür geçişlere de isomerik geçişler denir.

Fotonların (γ - ve X-ışınları) madde ile etkileşimi üç şekilde olur: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu.

Fotoelektrik olayda, fotonun enerjisi maddenin atomlarından birine bağlı bir elektrona tamamen aktarılır, foton ortamda soğurulmuş olur ve fotonun enerjisini alan elektron atomdan kopar ve ortamda yol alır. Kopan elektrona fotoelektron denir. Fotoelektronun enerjisi fotonun enerjisi ve elektronun bağlanma enerjisi farkı kadardır. Bu olay sonucunda uyarılmış olan atom, Auger elektronu ya da karakteristik X-ışını yayarak fazla enerjisini atar.

Compton saçılmasında, foton madde içerisindeki serbest bir elektronla etkileşime girer ve enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Enerjisi azalmış foton ve fotonun enerjisinin bir kısmını almış elektron ortamda ikincil çarpışmalar yaparak enerjileri bitene kadar yol almaya devam ederler. Enerji aktarım oranı, saçılma açısıyla ilgilidir. Saçılan fotonun ve elektronun enerjileri ile saçılma açıları momentum ve enerjinin korunması prensiplerinden yararlanılarak hesaplanabilir.

Çift oluşumu olayında, foton bir ortamda hareket ederken enerjisini tamamen kaybederek yok olur ve yerine bir elektron-pozitron çifti oluşur. Bu olayın gerçekleşebilmesi için foton enerjisinin en az 1,022 MeV (elektronun ve pozitronun durgun kütle enerjilerinin toplamı) olması gereklidir. Enerji ve momentumun korunabilmesi için bu etkileşimin atomun Coulomb alanı içerisinde meydana gelmesi gerekir. Elektron ve pozitron, fazla kalan enerjiyi kinetik enerji olarak aralarında paylaşırlar. Pozitron yeterli derecede yavaşladığı zaman, bir elektrona etkileşime girerek yok olur ve 511 keV enerjili zıt yönde hareket eden iki foton ortaya çıkar.

2.2. Aktivite Ölçümünde Birincil Yöntemler

Bir radyonüklitin tam standardizasyonu demek, o radyonüklitin bozunma yapan atom sayısını veya atomlarında meydana gelen nükleer dönüşüm sayısını belli

bir zaman aralığında doğrudan sayarak radyonüklitin tam aktivitesinin belirlenmesi demektir. Literatürde tam standardizasyon yerine geçmiş yıllarda doğrudan ve temel standardizasyon terimlerinin de kullanıldığı görülmüştür (NCRP, 1985). Bu terimlerin kullanılmasının nedeni, “tam” standardizasyon veya aktivite denildiği zaman aktivite değerinin bir belirsizlik değeri içermediği yanlış algısının olmasıydı. Radyonüklit metrolojisinde “tam” terimi bir radyonüklitin aktivitesinin bulunması için başka bir radyonüklitin bilinen aktivitesinin kullanılmadığı (yani dedektör verimlerinin bilinmesine ihtiyaç olmadığı) ve yayınlanma olasılığı, dallanma oranı gibi bozunma şeması parametrelerine gerek duyulmayan ölçümlerde bulunan aktivite değeri için kullanılır. Bu tür ölçümlerin yapıldığı sistemlere birincil ölçüm sistemleri denir.

Nükleer bozunma şeması parametrelerin belirlenmesinde birincil ölçüm sistemlerine ihtiyaç vardır. Elde edilen parametre değerleri tam aktivite ölçümünün yapıldığı sistemden sisteme bazen küçük farklılıklar gösterebilir. Bu durumda ölçümü yapan kişinin yöntemler arasında karşılaştırma yapması ve karar vermesi gerekmektedir.

2.2.1. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Sayım Yöntemi

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi bir radyonüklitin radyoaktif parçalanma olayında, β bozunmasını takiben γ ışınlarının da yayınlandığı durumlarda o radyonüklitin aktivitesini dedeksiyon veriminin detaylı bir şekilde belirlenmesine gerek kalmaksızın belirlemeye imkân veren birincil bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanıldığı sistemlerde her biri idealde tek tip bir radyasyona (beta veya gama) duyarlı olan iki dedektöre ihtiyaç vardır. Bu yöntemde iki detektörden elde edilen beta ve gama sayım hızları (R_β ve R_γ) ve aynı zamanda çakışma yapan beta ve gama sayım hızı (R_c) değerleri bulunarak aktivite hesabı yapılır.

Bu sistemlerde beta dedektörü olarak genelde gaz dolu orantılı sayaçlar ve plastik sintilatörler kullanılır. Sıvı sintilasyon sayaçları ve yarı iletken yüzey bariyeri dedektörleri de beta dedektörü olarak kullanılabilir (Koskinas ve Dias, 2004).

Gama dedektörü olarak çoğunlukla talyum katkılı sodyum iyodür (NaI(Tl)) dedektörü, nadiren de yarı iletken yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanılır. Beta ve gama dedektörleri hangi tip olursa olsun $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yönteminin esası ve prensipleri değişmez.

Bu tez çalışmasında kullanılan standardizasyon yöntemi (verim dışı değerlendirme kullanarak $4\pi\beta\text{-}\gamma$ dijital çakışma sayım yöntemi) gelişmiş altyapıya sahip ulusal metroloji enstitüleri tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve çoğu zaman en güvenilir tam aktivite ölçüm yöntemi olarak kabul edilmektedir (NCRP, 1985).

Radyonüklit standardizasyonu için $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemlerinde veri alma ve işleme yöntemleri uzun yıllar analog elektronik modüller kullanılarak yapılmıştır. Bu modüllerin teminlerinin ve bakımlarının pahalı olması ve özellikle veri alma işlemlerinde yüksek derecede tecrübeli çalışanlara ihtiyaç duyulması daha esnek ve güvenli dijital veri alma ve işleme ihtiyacını doğurmuştur. Dolayısıyla, geçmiş yıllarda analog olarak kullanılan bu sistem son yıllarda dijital kartlar ve çevrimdışı analizler (geliştirilen bilgisayar programları) kullanılarak geliştirilmiştir.

Dijital çakışma sayım sistemi daha kompakttır ve bu sistemde daha az elektronik modül kullanımına ihtiyaç vardır. Dijital sistemde dedektörden çıkan sinyallerin genliklerinin yükseltilmesini takiben (ön yükselteç sonrası) kullanılan bütün analog elektronik modüllerin yerini sinyallerin genlik ve zaman bilgilerini kaydeden bir sayısallaştırıcı alır. Bu sayısallaştırıcı genlik ve zaman bilgilerini liste formatında (list mode) kaydeder ve bilgisayar diskine aktarır. Ölçülen radyonüklitin aktivitesine bağlı olarak genellikle megabayt veya gigabayt büyüklüğünde bilgisayar diskine kaydedilmiş olan bu veriler uygun yazılımlar kullanılarak tekrar tekrar işlenebilir, spektrumlar oluşturulabilir, sinyallerin zaman aralığı dağılımları elde edilebilir, çakışma yapan ve yapmayan sinyaller tespit edilebilir ve sonuç olarak aktivite hesabı yapılabilir.

Radyonüklit standardizasyonu için dijital çakışma sayımı kavramı 1996 yılında ortaya atılmış ve tanıtılmıştır (Buckman ve Lus, 1996). Bu sistemin uygulaması için ilk girişimler ise 1998 yılında rapor edilmiştir (Buckman ve ark., 1998).

Geleneksel $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi radyonüklit standardizasyonu çalışmalarında yaklaşık elli yıldır kullanılan bir yöntem olmasına rağmen dijital çakışma sayım sistemi son 10-15 yılda dünyada belli başlı ulusal metroloji enstitülerinin radyasyon ölçüm laboratuvarlarında geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu durumun en önemli sebebi hızlı veri alma kartlarının ancak son yıllarda geliştirilmiş olmasıdır. Tüm dünyada radyonüklit standardizasyonu amacıyla dijital çakışma sayım sistemi geliştirme çalışmaları son yıllara kadar büyük oranda izole edilmiş bir şekilde devam etmekteydi. Uluslararası Radyonüklit Metrolojisi Komitesinin (ICRM) Radyonüklit Metrolojisi Teknikleri Çalışma Grubunun koordinatörlüğünde dünyada bu konuda çalışan enstitüler ve laboratuvarlar arasında ortak dilin kullanılması, veri formatlarının anlaşılabilir olması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla çalışmalar ve işbirlikleri yapılmıştır (Keightley, 2008). Bu konularda oldukça aktif olan laboratuvarların çalışmaları hakkında aşağıda bilgiler verilmiştir.

İngiltere’de bulunan Ulusal Fizik Laboratuvarı (NPL) ve Avustralya’da bulunan Avustralya Nükleer Bilim ve Teknoloji Organizasyonu (ANSTO) arasındaki işbirliği projesi sonucu NPL’de bir $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi kurulmuştur ve bu sistemin veri alma/işleme modülü yapılmıştır (Keightley, 2002, 2005, 2006; Keightley ve Watt, 2002). Bir süre geleneksel olarak çakışma sayımlarının ve aktivite hesaplamalarının yapıldığı sistem daha sonra Keightly’nin geliştirdiği yazılım ile birleştirilerek dijital çakışma sayımı yöntemini kullanmaya başlamıştır (Keightley, 2008).

Almanya Metroloji Enstitüsü olan Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi konusunda özellikle son yıllarda oldukça önemli çalışmalar yapmıştır (Schönfeld ve Janssen, 1994; Kossert ve ark., 2017). PTB çakışma sayım sistemlerinde beta dedektörü olarak çoğunlukla sıvı sintilasyon sayacı ve gaz dolu orantılı sayaç kullanmıştır. Gama ölçümleri için ise NaI dedektör kullanmıştır.

Güney Kore Cumhuriyeti ulusal metroloji enstitüsü olan Standartlar ve Bilim Araştırma Enstitüsü (KRISS) ve ortakları 1990’lı yıllarda çakışma sayımı yöntemi ile aktivite ölçümü amacıyla dijital veri alma sistemi geliştirmişlerdir (Park ve ark., 1995). Sistem iki adet analogdan dijitale dönüştürücü (ADC), çakışma kontrol modülü, sinyal geciktirici modül ve ölü zaman modüllerinden

oluşmaktadır. Çakışma kontrol modülü ve ADC'de depolanan sinyal bilgileri bilgisayar diskine aktarılarak daha sonra kendi geliştirmiş oldukları yazılım vasıtasıyla işlenerek ölçülen radyoizotopun aktivitesi belirlenebilmektedir. Bu sistem kullanılarak aktivite standardizasyonu ölçümlerinin yanı sıra çeşitli radyonüklitlerin yarı ömür hesaplamaları da yapılmıştır (Hwang ve ark., 1996a, 1996b, 1999, 2000).

Çek Cumhuriyeti Metroloji Enstitüsü (CMI) ilk defa 2002 yılında kendilerine ait "Yazılımsal Çakışma Sayımı" adını verdikleri dijital çakışma sayım sistemini geliştirdiklerini rapor etmişlerdir (Havelka, Auerbach ve Sochorova, 2002). Sayım sisteminde gama dedektörü olarak iki adet NaI dedektör, beta dedektörü olarak da gaz dolu orantılı sayaç kullanılmıştır. Sayım sisteminin veri alma kısmında sinyal sayısallaştırıcısı olarak ticari olarak elde edilebilen ve 4 sinyal girişi -çıkışı olan bir ADC kullanılmıştır. Sistemde sinyalin sayısallaştırılmasından önce sırasıyla ön yükselteç, yükselteç, ayrıştırıcı, sinyal geciktirici ve ölü zaman kontrol modülü gibi modüller kullanılmıştır. Sistemde kullanılan kontrol ünitesi ADCden ve zamanlayıcı modülden sırasıyla sinyal yüksekliği (enerji) ve sinyal zamanı bilgilerini alarak bir bilgisayar diskine depolama görevini yürütür. Sistemin ve yazılımın testi için ^{60}Co kaynağı ölçülmüştür (Havelka, Auerbach ve Sochorova, 2002). Havelka, Auerbach ve Sochorova daha sonra aynı sistemi ve yazılımı kullanarak 2006 yılında ^{54}Mn ve ^{65}Zn radyoizotoplarının aktivitelerini belirlemişlerdir (Havelka, Auerbach ve Sochorova, 2006). Havelka ve Sochorova daha sonra aynı sistemde yazılımsal çakışma sayımı ve verim dışadeğerleme ("extrapolation") yöntemini kullanarak 2008 yılında ^{56}Co ve ^{57}Co standardizasyonu, 2010 yılında ^{124}Sb ve ^{152}Eu standardizasyonu çalışmalarını yapmışlardır (Havelka ve Sochorova, 2010).

2.2.2. Aktivite Ölçümünde Önemli Parametreler

2.2.2.1. Ölü Zaman

Hemen hemen bütün dedektör sistemlerinde, iki farklı olayı ayırt edebilmek ve dolayısıyla iki farklı sinyal olarak kaydedebilmek için minimum bir zamana ihtiyaç vardır. Bu minimum süreye sayım sisteminin ölü zamanı denir. Bir başka tanımlamayla, kayıt edilen bir olayın veya sinyalin hemen ardından geçen belli süreye ölü zaman denir ve bu süre boyunca başka bir kayıt mümkün değildir.

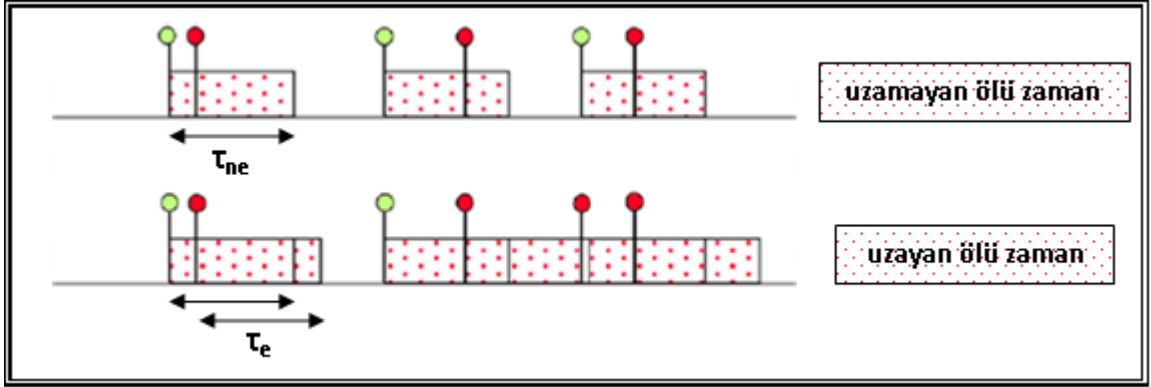
Ölü zaman, dedektörün kendi içindeki yük oluşum süreçlerinden dolayı olabileceği gibi sistemde bulunan diğer elektronik bileşenlerin de katkısı buna dahil olur. Radyoaktif bozunmanın rastgele olma özelliğinden dolayı, gerçek olan ve kaydedilmesi gereken bir olay, bir önceki olaydan çok kısa bir süre sonra meydana geldiği için sonraki olayın kaybolma veya kaydedilememe olasılığı her zaman vardır. Özellikle yüksek sayım hızlarının ölçüldüğü durumlarda, ölü zamandan dolayı olan sayım kayıpları yüksek olabilir. Doğru bir ölçüm için bu kayıplar göz önüne alınarak düzeltilmeler yapılmalıdır.

Sayım sistemlerinde, genelde iki tip ölü zaman modeli kullanılır. Bunlar uzayan ölü zaman (“extending dead time”) ve uzamayan ölü zaman (“non-extending dead time”) modelleridir.

Uzayan ölü zaman modelinde, her gerçekleşen olay, kaydedilsin veya kaydedilmesin, ölü zaman süresini uzatır. Gerçekleşen bir olayın ardından τ_e kadar süre bir ölü zaman oluşur. Bu τ_e süresi içinde başka bir olay gerçekleştiğinde bu olay kaydedilemez fakat bu olaydan dolayı da τ_e kadar ölü zaman oluşur ve dolayısıyla sistemin ölü zaman süresi uzamış olur.

Uzamayan ölü zaman modelinde ise, gerçekleşen bir olayın ardından τ_{ne} kadar süre bir ölü zaman oluşur. Bu τ_{ne} süresi içinde başka bir olay gerçekleştiğinde bu olay kaydedilemez ve kaydedilmeyen bu olay yeni bir ölü zamana neden olmaz. Dolayısıyla, kaydedilmeyen bir olaydan dolayı sistemin ölü zamanı uzamaz.

Uzayan ve uzamayan ölü zaman mekanizmalarının aynı sinyal serisine yaptığı etkiler şematik olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Yeşil ve kırmızı başlığa sahip doğru parçaları, sırasıyla tespit edilen ve edilemeyen sinyalleri temsil eder. Sinyallerin önündeki dikdörtgenler ise ölü zaman periyodunu temsil eder.



Şekil 2.2. Uzayan ve uzamayan ölü zaman modellerinin şematik gösterimi (Pomme, Fitzgerald ve Keightley, 2015'den alınarak yeniden düzenlenmiştir). Kırmızı dairesel başlığa sahip sinyaller ölü zamandan dolayı tespit edilemeyen sinyallerdir.

Bir ölçümde n gerçek sayım hızı, m ölçülen sayım hızı ve τ ölü zaman olarak tanımlandığında, uzamayan ölü zaman modeli için, dedektörün ölü zamanda olduğu yani sayım yapmadığı toplam zaman $m\tau$ olarak bulunur. Ölü zaman periyotlarında sayım kaybı oranı ise $n m \tau$ olur. Sayım kaybı oranı aynı zamanda $n - m$ de olduğu için,

$$n - m = n m \tau$$

eşitliği bulunur.

Bu eşitlik n için çözüldüğünde,

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

bulunur. Bu eşitlik uzamayan ölü zaman düzeltmesi eşitliği olarak bilinir.

Uzayan ölü zaman durumunda, ölü zaman periyotları her zaman aynı uzunlukta olmadığı için yukarıdaki yaklaşım yapılamaz. Ayrıntısı literatürde bulunabilecek (Knoll, 2000) yaklaşımlar sonucunda uzayan ölü zaman modelinde ise sayım hızı düzeltmesi için aşağıdaki eşitlikten elde edilir:

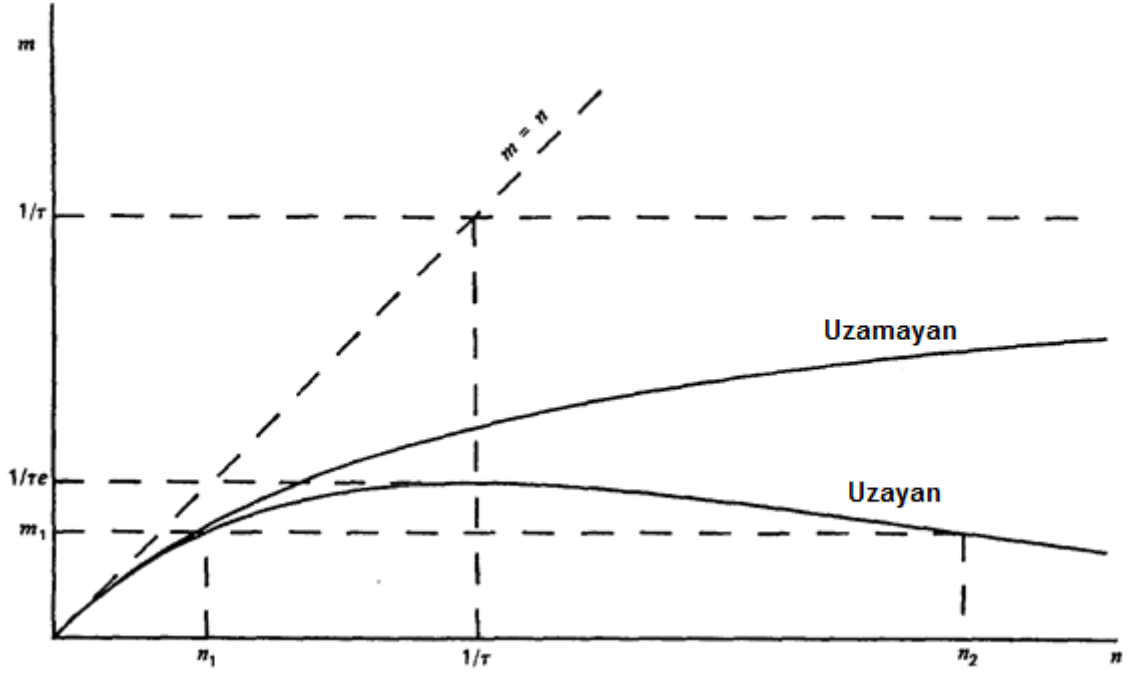
$$m = ne^{-n\tau}$$

Yüksek sayım hızlarının elde edildiği ölçümlerde ölü zaman kaynaklı sayım kayıpları oldukça önemli bir orana ulaşabilmektedir ve iki model farklı düzeltmeler yapmaktadır. Düşük sayım hızının olduğu durumda ($n \ll 1/\tau$) ise iki ölü zaman modeli aynı sonucu vermektedir:

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \cong n(1 - n\tau)$$

$$m = ne^{-n\tau} \cong n(1 - n\tau)$$

Gözlemlenen ya da ölçülen sayım hızına (m) karşılık gerçek sayım hızının (n) grafiği çizildiğinde ortaya çıkan davranış her iki ölü zaman için Şekil 2.3'de verilmiştir. Düşük sayım hızlarında iki modelin aynı sonucu, yüksek sayım hızlarında ise farklı sonuçlar verdiği grafikte açıkça görülebilir. Çok yüksek sayım hızlarında her iki model de tam doğru düzeltmeleri yapamayacağından, sayım hızındaki ölü zaman kaynaklı kayıpları azaltmak için ya ölçüm şartları ya da ölçüm sistemi değiştirilmelidir.



Şekil 2.3. Uzayan ve uzamayan ölü zaman modelleri için gözlemlenen sayım hızının gerçek sayım hızına bağlı değişimi (Knoll, 2000'dan alınarak değiştirilmiştir).

3. ÇAKIŞMA SAYIM YÖNTEMİ

3.1. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Sayım Yönteminde Verim Dışadeğerleme

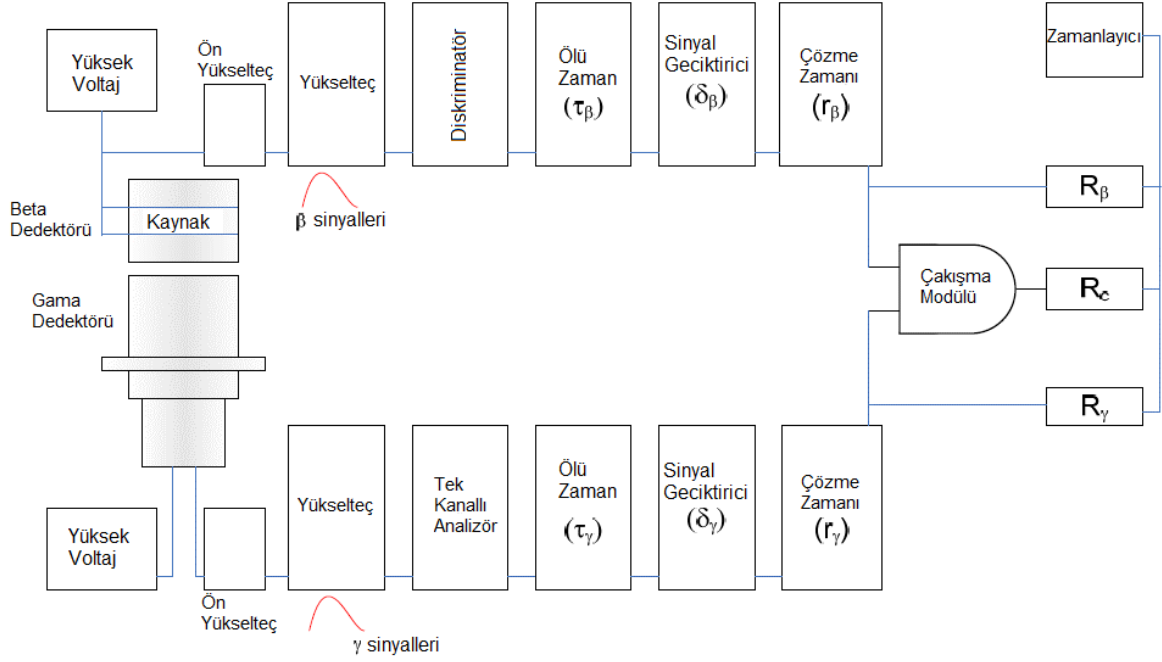
Genel tanımı Bölüm 2.2.1’de verilen $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım yöntemi prensip olarak; ana radyonüklitin beta bozunumunu takiben ürün radyonüklitin uyarılmış seviyeye çıktığı ve sadece gama ışınları yayınlayarak (iç dönüşüm elektronunun olmadığı ve dolayısıyla iç dönüşüm katsayısının sıfır olduğu dönüşüm) taban enerji seviyesine indiği bir bozunmada kaynağın aktivitesi, A, ile düzeltilmiş sayım hızları ve dedektör verimleri (ϵ_β ve ϵ_γ) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\rho_\beta = A\epsilon_\beta, \quad \rho_\gamma = A\epsilon_\gamma, \quad \rho_{\beta\gamma} = A\epsilon_\beta\epsilon_\gamma \quad (3.1)$$

Burada, ρ_β , ρ_γ ve $\rho_{\beta\gamma}$ sırasıyla düzeltilmiş beta sayım hızı, düzeltilmiş gama sayım hızı ve düzeltilmiş çakışma sayım hızını ifade eder. Düzeltilmiş sayım hızları, gözlemlenen sayım hızlarına uygulanan çeşitli düzeltmeler sonucunda elde edilen değerlerdir. Çakışma sayım yönteminin esasını oluşturan bu düzeltmeler oldukça önemlidir ve ilerleyen bölümlerde detaylı açıklanacaktır.

Çakışma sayım hızı, $\rho_{\beta\gamma}$, eşitliğinin beta ve gama dedektör verimlerinin çarpımını içermesi, dedektör verimleri arasında açısal bir korelasyon olmamasını ve detektörlerden en az birinin 4π katı açıda yayınlanan tüm radyasyonu ölçebilmesini gerektirir. Bu yüzden, bozunma şemasında birden fazla bozunma dalı varsa 4π beta dedektör geometrisinin kullanılması oldukça kritik bir öneme sahiptir (Keightley, 2008).

Tipik bir $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi birçok analog elektronik modülden oluşmaktadır. Birçok modülden oluşan ve tüm sinyal işleme ve analiz etme işlemlerinin bu elektronik modüller tarafından yapıldığı bu sisteme geleneksel sistem denir. Geleneksel bir $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi ve sistemin tüm bileşenleri şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Geleneksel bir $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminin şematik gösterimi

Bir radyasyon ölçüm dedektörünün elektronik yük toplama zamanlarında sürekli farklılıklar olur. Buna ek olarak, ölçüm sisteminde yükselteç ve diğer bileşenlerin kullanılması sinyal varış zamanlarında bozulmalara yol açar. Bu bozulmalar, zaman seğirmesi (gecikmesi) dağılımı diye bir parametre ile adlandırılır. Zaman seğirmesi değeri, kullanılan ölçüm sistemine göre değişiklik gösterir ve birkaç ns ile birkaç μs arasında olabilir (ICRU, 1994; Keightley, 2008). Zaman seğirmesinin beta ve gama sayım hızları üzerine etkisi ihmal edilebilir seviyede iken, çakışma sayım hızına etkisi bazen çok önemi seviyelerde olabilir.

Çakışma sayım hızı kaydedilirken bu zaman bozukluklarının da göz önüne alınması gerekmektedir. Bu zaman bozukluklarının çakışma sayım hızı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için çözümüleme zamanı da (r_β ve r_γ) denilen, çakışma modülüne giren sinyallerin genişliği parametresi kullanılır. Gözlemlenen çakışma sayımı, gerçek çakışmalardan kaynaklanan sayımların ($R_{\text{gerçek}}$: aynı nükleer bozunmadan kaynaklanan olayların çakışma sayım hızı) yanında engellenemeyen kazara çakışma sayımları (R_{kazara} : farklı atomların bozunmasından kaynaklanan olayların çakışma sayım hızı) da içerir. Düzeltilmiş çakışma sayım hızı ($\rho_{\beta\gamma}$) hesaplanırken istenmeyen bu çakışma

sayımlarının da hesaba katılması gerekir. Bu düzeltmelerin ayrıntılarına ileriki alt bölümlerde detaylıca yer verilecektir.

Aktivite ve dedektör verimleri aşağıdaki basit eşitlikler ile verilmektedir:

$$A = \frac{\rho_{\beta}\rho_{\gamma}}{\rho_{\beta\gamma}}, \quad \varepsilon_{\beta} = \frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\gamma}}, \quad \varepsilon_{\gamma} = \frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\beta}} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1’de yapılan her dedektör sadece bir radyasyon tipine duyarlıdır varsayım olarak fazlaca basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Gerçekte, her dedektör az da olsa bütün radyasyon tiplerine duyarlıdır. Beta dedektörü, kararsız ürün radyonüklitin uyarılmış seviyeden yayınladığı gama ışınlarına veya iç dönüşüm elektronlarına, sırasıyla $\varepsilon_{\beta\gamma}$ ve ε_{ce} verim değerleri ile duyarlıdır.

Aynı bozunmadan kaynaklanmayan (bir bozunmadan ortaya çıkan beta ve gama çiftinin çakışması olmayan) çakışmaların olma olasılığı (ε_c) da göz önünde bulundurulması gereken başka bir durumdur. Bu durum şöyle örneklendirilebilir: Bir gama ışını gama dedektöründe Compton saçılması yapabilir ve saçılan foton beta dedektörüne enerjisinin bir kısmını bıraktıktan sonra tekrar gama dedektöründe sayılabilir. Bu “yalancı çakışma” durumu sadece orijinal beta parçacığının beta dedektöründe sayılmadığı durumda mümkündür. Gerçek olmayan çakışmanın olabileceği bir başka durum da bir gama ışınının beta dedektöründe Compton saçılması yapması ve ardından saçılan fotonun gama dedektöründe sayılması ihtimalinin gerçekleşmesidir. Gama dedektörü az da olsa beta parçacıklarının beta dedektöründe sayılmasına eşlik eden Bremsstrahlung radyasyonuna da duyarlıdır.

ε_c parametresine katkıda bulunan tüm bu etkiler sadece gama kanalında bir enerji penceresi seçilerek yalnızca o enerji aralığındaki sinyallerin kabul edilmesiyle önemli ölçüde azaltılabilir. Bu enerji penceresinin çoğunlukla tam enerji fotopikleri içermesi en ideal seçimdir. Kararsız ürün radyonüklitin uyarılmış seviyeden gama ışınları yerine iç dönüşüm elektronları yayınladığı

durumda bu gerçek olmayan çakışma sayısı fazla olmaz çünkü iç dönüşüm elektronunun beta dedektöründen kaçma olasılığı genelde oldukça düşüktür.

Yukarıda bahsedilen tüm olasılıklar hesaba katıldığında aşağıdaki çakışma eşitlikleri seti elde edilir (ICRU, 1994):

$$\rho_{\beta} = A \left[\varepsilon_{\beta} + (1 - \varepsilon_{\beta}) \left[\left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \varepsilon_{ce} + \left(\frac{1}{1 + \alpha} \right) \varepsilon_{\beta\gamma} \right] \right] \quad (3.3)$$

$$\rho_{\gamma} = A \left[\left(\frac{1}{1 + \alpha} \right) \varepsilon_{\gamma} \right] \quad (3.4)$$

$$\rho_{\beta\gamma} = A \left[\left(\frac{1}{1 + \alpha} \right) \varepsilon_{\gamma} \varepsilon_{\beta} + (1 - \varepsilon_{\beta}) \varepsilon_c \right] \quad (3.5)$$

Yukarıdaki ρ_{β} ifadesindeki gama ışınları ve dönüşüm elektronlarından gelen katkı ve $\rho_{\beta\gamma}$ ifadesindeki gerçek olmayan çakışma katkısı sadece orijinal beta parçacığının dedektör tarafından sayılmadığı durumlarda geçerlidir. Beta parçacığı dedektör tarafından tespit edilirse gama ışınından ve dönüşüm elektronundan gelen katkı beta parçacığı sinyali ile toplanacağından tek bir sinyal kaydedilmiş gibi bir durum oluşacaktır.

Tipik bir beta dedektöründe sayım verimi yüksek olurken ($\varepsilon_{\beta} > 0,90$), ε_c terimi çok küçük olur. Bu durumda beta dedektörü verimini hesaplamak için düzeltilmiş çakışma sayım hızının düzeltilmiş gama sayım hızına oranı ($\varepsilon_{\beta} \approx \rho_{\beta\gamma} / \rho_{\gamma}$) iyi bir yaklaşım olur (ICRU, 1994; Keightley, 2008).

Karmaşık bozunma şemasına sahip radyonüklitler için n beta bozunma dalı sayısı ve a_n bozunma dalı oranı ($\sum a_n = 1$) olarak tanımlanırsa, Eşitlik 3.3, 3.4 ve 3.5 tüm beta bozunma dallarını kapsayacak şekilde aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir (ICRU, 1994):

$$\rho_{\beta} = A \sum_n a_n \left[\varepsilon_{\beta} + (1 - \varepsilon_{\beta}) \left(\frac{\alpha \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{\beta\gamma}}{1 + \alpha} \right) \right]_n \quad (3.6)$$

$$\rho_{\gamma} = A \sum_n a_n \left[\left(\frac{\varepsilon_{\gamma}}{1 + \alpha} \right) \right]_n \quad (3.7)$$

$$\rho_{\beta\gamma} = A \sum_n a_n \left[\left(\frac{\varepsilon_{\gamma} \varepsilon_{\beta}}{1 + \alpha} \right) + (1 - \varepsilon_{\beta}) \varepsilon_c \right]_n \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitlik seti aşağıdaki gibi tekrar düzenlendiğinde ileriki basamaklar için daha kullanışlı olacaktır (Keightly, 2008):

$$\rho_{\beta} = A \left[1 - \sum_n a_n (1 - \varepsilon_{\beta_n}) \left(\frac{(1 - \varepsilon_{\beta\gamma}) + \alpha (1 - \varepsilon_{ce})}{1 + \alpha} \right) \right]_n \quad (3.9)$$

$$1 - \varepsilon_{\beta} = 1 - \frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\gamma}} = \frac{\sum_n a_n (1 - \varepsilon_{\beta_n}) \left[(1 - \varepsilon_c) - \frac{1 - \varepsilon_{\gamma}}{1 + \alpha} - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right]_n}{\sum_n \left(\frac{\alpha \varepsilon_{\gamma}}{1 + \alpha} \right)_n} \quad (3.10)$$

Yukarıda ρ_{β} için verilen eşitlikte,

$$\frac{(1 - \varepsilon_{\beta\gamma}) + \alpha (1 - \varepsilon_{ce})}{1 + \alpha} = K \quad (3.11)$$

tanımlaması yapılırsa, ρ_{β} ρ_{γ} / $\rho_{\beta\gamma}$ için aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\rho_{\beta} = A \left[1 - K \left(1 - \frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\gamma}} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$\frac{\rho_{\beta}\rho_{\gamma}}{\rho_{\beta\gamma}} = A \left[1 + (1 - K) \left(\frac{1 - \frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\gamma}}}{\frac{\rho_{\beta\gamma}}{\rho_{\gamma}}} \right) \right] \quad (3.13)$$

4πβ dedektör kullanarak ve beta verimini değiştirerek ρ_β, ρ_γ ve ρ_{βγ} değerleri tekrar tekrar hesaplanır. (1- ε_β) / ε_β değerlerine karşılık (ρ_β ρ_γ / ρ_{βγ}) değerleri çizdirilip ε_β değeri 1'e dışadeğerlendiğinde elde edilen (ρ_β ρ_γ / ρ_{βγ}) değeri bozunma şeması parametrelerinden bağımsız olarak kaynağın aktivitesini (A) verecektir. Bu işleme verim dışadeğerleme yöntemi denir (Baerg, 1973a; Houtermans ve Miguel, 1962; Campion ver ark., 1960). Bu dışadeğerlemeye denk olarak (1- ε_β) değerlerine karşılık ρ_β değerleri çizdirilip ε_β değeri 1'e dışadeğerlendiğinde elde edilen ρ_β değeri de kaynağın aktivitesini verecektir. K değeri sabit olarak düşünüldüğünde verim dışadeğerleme işleminin doğrusal ya da düşük dereceli bir polinom ile yapılması beklenmektedir. Sabit bir K değeri elde etmek için ve doğrusal bir fit fonksiyonu ile dışadeğerleme yapabilmek için en önemli koşul uygun gama enerji aralıkları seçmek ve bu aralıklarda hesaplamaları yapmaktır. Genellikle ana beta bozunumu dalı ile ilişkili olan gama ışınına ait tam enerji pikini (fotopik) veya piklerini içeren enerji penceresi seçilir ve o bölgede hesaplamalar yapılır. Olası sistematik hataları da görmek ve kıyas yapmak açısından hesaplamalar için birden fazla gama enerji aralığı seçilebilir. Farklı gama enerji aralıklarında elde edilen veri setleri idealde yaklaşık olarak aynı dışadeğerleme değerini yani aynı aktiviteyi vermelidir (Baerg, 1973b).

Beta dedektörünün verimini değiştirmek için farklı yollar vardır. Ölçümü yapılacak olan kaynak ile beta dedektörü arasına değişik kalınlıklarda soğurucu plastik malzeme koymak (Bobin ve Bouchard, 2006), kaynak içerisindeki öz soğurma seviyelerini değiştirecek şekilde taşıyıcı eklemek (ICRU, 1994), dedektör kaynak geometrisini değiştirmek (Hwang ve ark., 2006) ve dijital çakışma sayımında olduğu gibi elde edilen beta spektrumunda alt enerji eşik değerlerini değiştirmek (Baerg, 1973b; Simpson ve Meyer, 1994) en çok kullanılan yöntemlerdir.

Birden fazla beta bozunumu dalı ve uyarılmış gama enerji seviyelerine sahip karmaşık bozunma şemalı radyonüklitlerin ölçümlerinde, bütün beta geçişleri için veya bozunum dalı için verim değerlerinin eş zamanlı olarak %100'e yaklaşması koşulunu sağlamak zor olabilir ve bu yüzden verim dışı değerlendirme fit eğrisi doğrusaldan sapıp yüksek dereceli bir polinom olabilir (Grigorescu ve ark., 1998; Sahagia, 2004).

3.2. Çakışmalı Yöntemde Sayım Hızlarına Uygulanan Düzeltmeler

Beta ve gama kanallarında gözlemlenen sayım hızları (R_β ve R_γ) kaybı genellikle *ölü zaman* varlığından ya da uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Bu konu ile ilgili literatür araştırmalarında, sıklıkla, BIPM'den Müller'in çalışmalarıyla karşılaşılmaktadır (Müller, 1970; ICRU, 1994; Keightley, 2008).

Çakışmalı yöntemde esas zorluk gerçek çakışma sayım hızını değişik sayım koşullarında doğru tespit etmektir. Ölü zamandan dolayı meydana gelen sayım kayıplarının ve istenmeyen (gerçek olmayan) çakışmalardan meydana gelen sayım artışlarının gerçek değere etkilerini tespit etmek ve değerlendirmektir. Yıllar içinde yapılan çalışmalar (Cox ve Isham, 1977; Müller, 1970; Smith, 1978; Smith, 1987), değişik koşullar altında yapılan ölçümler için kesinliği daha da artan düzeltme formüllerinin ortaya konulmasını sağlamıştır.

3.2.1. Tek Kanallara Uygulanan Düzeltmeler

Gözlemlenen sayım hızları, R_β ve R_γ , dedektör sayım verimine ek olarak sayımda meydana gelen başka kayıplardan da etkilenmiştir. Her bir kanal için farklı iki olayın meydana geliş zamanının ayırt edilemediği bir minimum zaman aralığı vardır. Bu zaman aralığına içsel ya da karakteristik ölü zaman denir. Sayımlarda meydana gelen kayıplar sayım sisteminde kullanılan bileşenlerin yeterli işlem hızına sahip olamaması, sinyal yığılması ve sinyal doygunluğu gibi çeşitli sebeplerden de kaynaklanabildiği için karakteristik ölü zaman tam olarak tanımlanamamıştır. Sinyal yığılması ve sinyal doygunluğu gibi nedenlerle meydana gelen kayıplar için düzeltmeler hali hazırda bulunmamaktadır. Spektrometrik ölçümlerde bu parametrelerden dolayı meydana gelen kayıplar kritik öneme sahip olabilir (Pomme, Fitzgerald ve Keightley, 2015).

Spektrometrik olmayan ölçümlerde, sayım kaybına neden olan bu problemleri aşmak için kayıt altına alınmış giriş sinyalleri dizisine iyi tanımlanmış yeterince geniş bir ölü zaman uygulamak en iyi yöntemdir. Karakteristik ölü zamandan çok daha büyük ve değeri önceden bilinen yapay bir ölü zaman uygulayarak ve bu uygulamanın düzeltmesini yaparak daha doğru bir gerçek sinyal sayım hızı elde edilebilir.

Nükleer parçalanma olayının Poisson dağılımına veya Poisson dağılımının çok iyi bir yaklaşımla uyduğu kabul edilmektedir. Dedektör sistemlerinde tespit edilen nükleer bozunma oranlarına veya yaygın bir ifadeyle sayım hızı değerlerine uygulanan uzayan ve uzamayan ölü zaman düzeltme formülleri, Poisson dağılımı göz önünde bulundurularak türetilmiştir.

Poisson dağılımına göre, sabit bir sayım hızına (ρ) sahip bir işlem için t zaman aralığında k tane olayın gözlemlenme olasılığı aşağıdaki gibidir:

$$P(k) = \frac{(\rho t)^k}{k!} e^{-\rho t}, \quad t > 0, \quad \rho > 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.14)$$

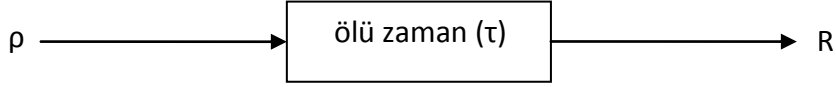
Δt zaman aralığında gerçekleşen olayların sayısına $N(t, t+\Delta t)$ denirse, bir sayım işlemi, aşağıdaki durumlar sağlandığında Poisson kuralına uygundur denilebilir (Parzen, 1962):

- $N(t, t+\Delta t)$ sayısı $N(0, t)$ değerinden bağımsızdır,
- $N(t, t+\Delta t) = 1$ olma olasılığı $\rho \Delta t + o(\Delta t)$ değerine eşittir,
- $N(t, t+\Delta t) > 1$ olma olasılığı $o(\Delta t)$ değerine eşittir.

Burada, ρ sayım hızı, $o(\Delta t)$ ise sıfıra Δt 'den daha hızlı yaklaşan bir fonksiyonu temsil eder. Bu koşullar, yeterince küçük bir zaman aralığında, Δt , en fazla tek bir olayın gerçekleşmesi durumunu garanti eder. Böylece, meydana gelen olaylar kümelenmemiş olur ve işlem aralıkları birbirinden bağımsız olur.

Nükleer bozunma ya da bir başka ifadeyle sayım sistemine girdi olarak gelen nükleer parçacık veya ışın büyük oranda Poisson dağılımına uymasına rağmen sayım sistemi tarafından kayıt altına alınan veriler bu dağılıma uymayabilir.

Sayım sisteminin bileşenlerinden kaynaklanan veya dışarıdan yapay olarak uygulanan ölü zamanın varlığı sayım sistemi tarafından tespit edilen sinyallerin zaman aralığı dağılımının Poisson dağılımına uyma eğilimini bozmaktadır.



Sayım sistemine giren gerçek sayım hızı ρ , sistemde okunan (gözlemlenen) sayım hızı R olduğunda, R değeri, ρ değerinden ölü zaman periyodunda kaybolan sayım hızları kadar eksiktir. Ölü zaman periyoduna giren sayım hızlarının Poisson dağılımına uyduğu düşünülürse, uzamayan ölü zaman modelinde beta ve gama kanalları için gözlemlenen sayım hızlarını gerçek sayım hızlarına dönüştüren düzeltme formülü aşağıdaki gibi olur (ICRU, 1994):

$$\rho_{\beta} = \frac{R_{\beta}}{1 - R_{\beta}\tau_{\beta}} \quad (3.15)$$

$$\rho_{\gamma} = \frac{R_{\gamma}}{1 - R_{\gamma}\tau_{\gamma}} \quad (3.16)$$

Uzayan ölü zaman modeli için ise beta ve gama kanallarının gözlemlenen sayım hızları ile gerçek sayım hızları arasında aşağıdaki gibi bir eşitlik bulunur (ICRU, 1994):

$$R_{\beta} = \rho_{\beta} e^{-\rho_{\beta}\tau_{\beta}} \quad (3.17)$$

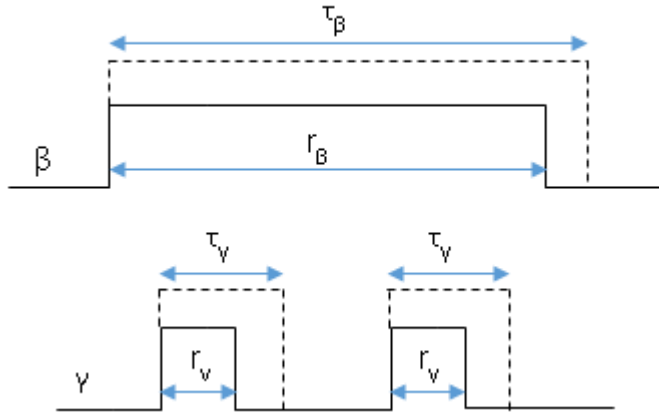
$$R_{\gamma} = \rho_{\gamma} e^{-\rho_{\gamma}\tau_{\gamma}} \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.17 ve 3.18 doğrudan çözülemez. Çözebilmek için ya iterasyon yapılması gerekir ya da üstel terimlere seri açılımı uygulanarak yaklaşık bir

ifade türetilmesi gerekmektedir. Özet olarak, ölçüm sisteminden elde edilen sayım hızı değerleri ve sistemde meydana gelen ölü zaman değeri bilinirse gerçek sayım hızı değerleri yani aktivite değerleri kolayca bulunabilir. Ancak, ölçüm sistemi birçok bileşenden oluştuğu için sistemde meydana gelen ölü zaman tipini ve değerini doğru belirlemek her zaman mümkün değildir. Bu yüzden, ölü zaman düzeltmesini doğru yapabilmek ve doğru aktivite değerini hesaplayabilmek için sayım sisteminden elde edilen verilere sistemde doğal olarak oluşabilecek toplam ölü zaman değerinden daha büyük bir ölü zaman değeri yapay olarak uygulanır.

3.2.2. Çakışma Kanalına Uygulanan Uzamayan Ölü Zaman Düzeltmeleri

Ölü zaman ve istenmeyen çakışmaların etkisini düzeltmek için çakışma kanalı sayım hızı değerine uygulanan formüller arasında geleneksel olarak en çok kullanılan formüller Champion, Hayward, Gandy ve Bryant tarafından ortaya çıkarılan ve daha sonra geliştirilen formüllerdir. Champion, Hayward ve Bryant tarafından türetilen orijinal formüller beta ve gama çözme zamanlarının eşit olduğu durumlar için geçerli olmasına rağmen sonradan geliştirilmiş ve eşit olmayan çözme zamanları için de uygulanabilir hale getirilmiştir. Gandy tarafından türetilen orijinal formül ise beta ve gama kanalları için eşit ölü zamanın uygulandığı durumlar ile sınırlı olmasına rağmen bu formül de daha sonra geliştirilmiş ve eşit olmayan ölü zaman durumları için de uygulanabilir hale getirilmiştir.



Şekil 3.2. Çakışmalı yöntemde ölü zaman ve ayırma zamanı değerlerinin belirlenmesinde doğru olmayan bir örnek.

Çakışmalı yöntemde ölü zaman ve çözümüleme zamanları ayarlamasında doğru olmayan bir örnek Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir. r_β zaman periyodu içinde gama kanalında ikinci bir gama sinyalinin varlığı $\tau_\gamma < r_\beta$ anlamına gelir ki bu da tek bir beta sinyali ile birden fazla gama sinyalinin çakışması olasılığını doğurur.

Çözümüleme zamanı değerlerinden büyük olanı $r_M = \text{maksimum}(r_\beta, r_\gamma)$, ölü zaman değerlerinden büyük olanı $\tau_M = \text{maksimum}(\tau_\beta, \tau_\gamma)$ ve küçük olanı $\tau_m = \text{minimum}(\tau_\beta, \tau_\gamma)$ tanımlamaları yapılırsa eğer, Champion, Hayward ve Gandy tarafından türetilen bu formüllerde $r_M \leq \tau_m$ yaklaşımı ve $(r_\beta + r_\gamma) \leq \tau_m$ yaklaşımı farz edilmiştir. Bunun nedeni bir sinyalin birden fazla çakışmaya sebep olmadığı durumu garanti altına almaktır. Bu formüller uzamayan ölü zaman düzeltmesi için türetilmiş olmalarına rağmen uzayan ölü zaman düzeltmesi için de aynı derecede uygulanabilir (ICRU, 1994).

3.2.2.1. Champion'un Yaklaşımı

Çakışma kanalına uygulanan ölü zaman düzeltmesi için Champion, 1959'da belirli bir formül vermemiştir ancak formülde yer alabilecek birçok terim çeşitli yöntemler kullanılarak türetilmiştir (ICRU, 1994). R_c gözlemlenen çakışma sayım hızı, $R_{\beta\gamma}$ gözlemlenen gerçek çakışma sayım hızı, R_t ise tesadüfi

çakışma sayım hızı olarak ifade edildiğinde, bu sayım hızları arasında aşağıdaki eşitlik vardır:

$$R_c = R_{\beta\gamma} + R_t$$

Bu eşitlikte,

$$R_t = (R_\beta - R_{\beta\gamma})r_\beta R_\gamma + (R_\gamma - R_{\beta\gamma})r_\gamma R_\beta$$

$$R_{\beta\gamma} = \rho_{\beta\gamma}(1 - R_\beta\tau_\beta - R_\gamma\tau_\gamma + R_c\tau_m)$$

olarak ifade edilir. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak çakışma kanalı için aşağıdaki düzeltme formülü elde edilir:

$$\rho_{\beta\gamma} = \frac{R_c - (r_\beta + r_\gamma)R_\beta R_\gamma}{(1 - R_\beta\tau_\beta - R_\gamma\tau_\gamma + R_c\tau_m)(1 - R_\beta\tau_\beta - R_\gamma r_\beta + R_\beta r_\gamma)} \quad (3.19)$$

Eşit olmayan beta ve gama ayırma zamanları durumu için genelleştirilmiş olan bu düzeltme formülü yaygın olarak kabul görmüş ve kullanılmıştır.

3.2.2.2. Hayward'ın Yaklaşımı

Eşit beta ve gama kanalı ölü zamanları ve çözme zamanları için türetilmiş olan formül (Hayward, 1961), daha sonra genelleştirilerek aşağıdaki forma dönüştürülmüştür (ICRU, 1994):

$$\rho_{\beta\gamma} = \frac{R_c(1 + \rho_\beta\tau_\beta + \rho_\gamma\tau_\gamma) - (r_\beta + r_\gamma)\rho_\beta\rho_\gamma + (\rho_{\beta\gamma} - R_c)[r_\beta(\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma}) + r_\gamma(\rho_\gamma - \rho_{\beta\gamma})]}{1 + R_c\tau_m - \rho_\gamma r_\beta - \rho_\beta r_\gamma} \quad (3.20)$$

Bu düzeltme formülü aşağıdaki eşitlikler kullanılarak türetilmiştir (ICRU, 1994):

$$R_c = R_{\beta\gamma} + R_t$$

$$R_t = (\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma})(r_\beta + r_\gamma)(\rho_\gamma - \rho_{\beta\gamma})$$

$$R_{\beta\gamma} = \rho_{\beta\gamma} - R_c[\rho_{\beta\gamma}\tau_m + (\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma})(\tau_\beta - r_\beta) + (\rho_\gamma - \rho_{\beta\gamma})(\tau_\gamma - r_\gamma)]$$

Hayward, yukarıdaki düzeltme formülünü türetirken, çakışma ayırma zamanı içinde gerçek çakışmaların ölü zamandan dolayı olan kayıplarını dikkate almamıştır. Bunun sebebini, gerçek çakışmalarda olan bu kayıpları tesadüfi çakışma olarak sayması ve dolayısıyla toplam çakışma sayısının değişmemesi olarak açıklamıştır (ICRU, 1994; Keightley, 2008).

3.2.2.3. Gandy'nin Yaklaşımı

Çakışma kanalının gerçek sayım hızını bulabilmek için Gandy tarafından türetilen düzeltme formülü aşağıda verilmiştir (Gandy, 1961, 1962):

$$\rho_{\beta\gamma} = \frac{R_c - (r_\beta + r_\gamma)R_\beta R_\gamma}{(1 - R_\beta\tau_\beta - R_\gamma\tau_\gamma + R_c\tau_m)(1 - R_\beta\tau_\beta - R_\gamma r_\beta + R_\beta r_\gamma)} \quad (3.21)$$

Bu formül aşağıdaki eşitlikler kullanılarak türetilmiştir (ICRU, 1994):

$$R_c = R_{\beta\gamma} + R_t$$

$$R_t = \frac{(\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma})r_\beta\rho_\gamma + (\rho_\gamma - \rho_{\beta\gamma})r_\gamma\rho_\beta}{(1 + \rho_\beta\tau_\beta)(1 + \rho_\gamma\tau_\gamma)}$$

$$R_{\beta\gamma} = p_{\beta\gamma}(g) \rho_{\beta\gamma}$$

$$\frac{1}{p_{\beta\gamma}(g)} = 1 + \rho_\beta\tau_\beta + \rho_\gamma\tau_\gamma - \rho_{\beta\gamma}\tau_m$$

Gandy, iki özel durum için $1/p_{\beta\gamma}(g)$ terimi için daha detaylı ifadeler vermiştir. Bu özel durumlardan ilki beta ve gama kanallarına eşit ölü zaman değerlerinin uygulandığı durum, ikincisi ise bir ölü zaman değerinin öteki ölü zaman değerinin iki katından fazla olmadığı durumdur. Her bir durum için $1/p_{\beta\gamma}(g)$ fonksiyonunun ifadesi farklıdır. Bu ifadelerin tamamına ICRU REPORT 52'de (ICRU, 1994) ulaşılabilir.

3.2.2.4. Champion, Hayward ve Gandy Tarafından Geliştirilen Yaklaşımların Değerlendirilmesi

Champion, Hayward ve Gandy tarafından türetilen ve daha sonra geliştirilen ve düzeltilen düzeltme formüllerinin hepsi düşük sayım hızlarında geçerli olan formüllerdir. Farklı sayım hızlarında, ölü zaman değerlerinde ve çözümüleme zamanı değerlerinde bu formüllerin birbirlerine bariz üstünlükleri yoktur. Aynı zamanda bu formüller birinci derece seri açılımı yaklaşımı için hemen hemen aynı sonuçları vermektedir (ICRU, 1994).

Günümüzde çakışma kanalına uygulanan uzamayan ölü zaman düzeltmesi için göreceli olarak daha basit ve yüksek derece seri açılımı yaklaşımlarını içeren düzeltme formülleri geliştirildiğinden artık tüm bu geleneksel formüllerin kullanılmasına ihtiyaç kalmamıştır. Uzayan ve uzamayan ölü zaman durumları için daha güncel olan bu formüller ileriki bölümlerde açıklanmıştır.

3.2.2.5. Cox-Isham ve Smith Uzamayan Ölü-Zaman Düzeltmesi

Çakışma sayım hızı üzerinde uzamayan ölü zaman ve rastgele olan (tesadüfi) çakışmaların etkilerinin düzeltmek için gerekli olan tam formül ve yüksek doğruluktaki yaklaşımlar Cox ve Isham tarafından ilk kez türetilmiştir (Cox ve Isham, 1977) ve Smith tarafından geliştirilmiştir (Smith, 1978; Smith, 1987). Tam formül bir ölü zamanın ötekinin bir tamsayı katı kadar olduğu durumlar için bilinmektedir. Yaklaşım formülü ise tam sayı olsun olmasın bütün ölü zaman değerleri için geçerlidir. Yalnız sayım hızı değeri ve küçük olan ölü zaman değerinin çarpımından elde edilen değer bire kıyasla önemliyse yaklaşım formülünün tam doğru çalışmadığı, hesaplanan değerdeki hatanın arttığı belirtilmiştir (ICRU,1994; Keightley, 2008). Tam formül ve yaklaşım formülü

aşağıdaki ifade sağlandığı müddetçe bütün çözüme zamanı değerleri için geçerlidir:

$$\max(r_\beta, r_\gamma) \leq \min(\tau_\beta, \tau_\gamma)$$

Ancak, beta ve gama kanalları arasında sabit bir gecikmenin (beta ve gama sinyallerinin arasında sabit bir zaman farkının) ve/veya zaman seçirmesinin olduğu durumlar için yukarıdaki ifade yeniden düzenlenmiştir. Beta ve gama sinyalleri arasındaki zaman farkından dolayı gerçek çakışmaların kaybolmadığının garanti edilmesi ile çözüme zamanlarının minimuma ayarlandığı durumda düzeltme formüllerinin geçerli olduğu ifade aşağıdaki gibi olur:

$$r_\beta + r_\gamma \leq \min(\tau_\beta, \tau_\gamma)$$

Çakışma sayım hızı düzeltmesi için geliştirilen açık çözüm formülü (Smith, 1978; Smith, 1987) aşağıda verilmiştir:

$$\rho_{\beta\gamma} = \frac{R_c - (r_\beta + r_\gamma)R_\beta R_\gamma}{(1 - R_\beta \tau_\beta)(1 - R_\gamma \tau_\gamma)X(\rho, \tau, r) + R_c \tau_{\min} Y(\rho, \tau)} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki formülde R_c gözlemlenen çakışma sayım hızını ifade eder. Gözlemlenen çakışma sayım hızı hem gerçek çakışma sayım hızını hem de rastgele olan ve istenmeyen çakışma sayım hızını içerir. Dolayısıyla;

$$R_c = R_{\beta\gamma} + R_t$$

yazılabilir. $R_{\beta\gamma}$ gerçek çakışma sayım hızını, R_t ise tesadüfi çakışma sayım hızını ifade eder. Düzeltme yapılırken $R_{\beta\gamma}$ ve R_t değerleri ayrı ayrı formüle girilmeyeceğinden bu değerlerin açık ρ , τ ve r parametrelerinin fonksiyonları olan açık ifadelerinin burada yazılmasına gerek duyulmamıştır.

Beta ve gama kanallarına eşit ölü zaman değerleri uygulandığında (Cox ve Isham, 1977; ICRU, 1994);

$$Y(\tau) = L(\tau)/\tau \quad (3.23)$$

$$X(r_\beta, r_\gamma) = M(\tau, r_\beta, r_\gamma) - (r_\beta + r_\gamma)\rho_\beta\rho_\gamma L(\tau) \quad (3.24)$$

$$L(\tau) = \frac{e^{\rho_\beta\tau} - e^{\rho_\gamma\tau}}{\rho_\beta e^{\rho_\beta\tau} - \rho_\gamma e^{\rho_\gamma\tau}} \quad (3.25)$$

$$M(\tau, r_\beta, r_\gamma) = \frac{\rho_\beta e^{\rho_\beta\tau} e^{[(\rho_\gamma - \rho_\beta)r_\gamma]} - \rho_\gamma e^{\rho_\gamma\tau} e^{[(\rho_\beta - \rho_\gamma)r_\beta]}}{\rho_\beta e^{\rho_\beta\tau} - \rho_\gamma e^{\rho_\gamma\tau}} \quad (3.26)$$

Bu durumda doğru çakışma sayım hızı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\rho_{\beta\gamma} = \frac{R_c - (r_\beta + r_\gamma)R_\beta R_\gamma}{(1 - R_\beta\tau_\beta)(1 - R_\gamma\tau_\gamma)M(\tau, r_\beta, r_\gamma) + [R_c(r_\beta + r_\gamma)R_\beta R_\gamma]L(\tau)} \quad (3.27)$$

3.2.3. Çakışma Kanalına Uygulanan Uzayan Ölü-Zaman Düzeltmesi

4πβ-γ çakışma sayım yönteminde sinyal serisine uzayan ölü zaman uygulandığında doğru çakışma sayım hızını bulabilmek için literatürde çok fazla düzeltme formülü bulunmamakla birlikte BIPM raporlarında gerçek ve tesadüfi çakışma sayım hızları için Müller tarafından geliştirilmiş olan ifadeler yer almaktadır (Müller, 1977b). Detayları ICRU Rapor 52'de (ICRU, 1994) verilen aşağıdaki eşitlik iterasyon yöntemi ile çözümlenerek doğru çakışma sayım hızı, $\rho_{\beta\gamma}$, bulunabilir (Smith, 2003):

$$\begin{aligned} R_c = & \frac{R_\beta(\rho_\gamma - \rho_{\beta\gamma})}{\rho_{\beta\gamma}} e^{-\rho_\gamma\tau_\gamma + \rho_{\beta\gamma}\tau_\beta(1 - e^{-\rho_{\beta\gamma}\tau_\gamma})} \\ & + \frac{R_\gamma(\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma})}{\rho_{\beta\gamma}} e^{-(\rho_\beta - \rho_{\beta\gamma})\tau_\beta} \left\{ \rho_{\beta\gamma} [r_\beta - (r_\beta - \tau_\gamma + \tau_\beta)] + 1 - e^{\rho_{\beta\gamma}(r_\beta - \tau_\gamma + \tau_\beta)} \right\} \\ & + \rho_{\beta\gamma} e^{-\rho_\beta\tau_\beta - \rho_\gamma\tau_\gamma + \rho_{\beta\gamma}\tau_\beta} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Bu eşitlik gama kanalına uygulanan ölü zaman değerinin beta kanalına uygulanan ölü zaman değerinden büyük veya eşit olduğu durumlarda ($\tau_\gamma \geq \tau_\beta$) geçerlidir. $\tau_\gamma < \tau_\beta$ olduğu durumda β ve γ alt indisleri yer değiştirilerek aynı eşitlik kullanılabilir.

3.3. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Çakışma Yönteminin Diğer Türevleri

3.3.1. Çakışmasız Yöntem

Bir beta bozunması sonucu geçiş yapılmış olan ürün radyonüklitin uyarılmış seviyesinin gama salınımı yarı ömrü, çakışma zaman aralığı seviyesinde ise veya daha büyük ise gerçek beta-gama çakışma sayısında önemli bir kayıp meydana gelir. Çakışma zaman aralığını çok fazla uzun tutmak ise kazara olan ve istenmeyen çakışmaların sayısında önemli bir artışa yol açacaktır. Bu nedenle, uyarılmış seviyede gama salınımı yarı ömrünün uzun (100 ns'den büyük) olduğu bozunmalarda aktivite hesaplamak için doğrudan çakışmalı yöntemi kullanmak önemli hatalara yol açabilir (Bryant, 1962; Bryant, 1967; ICRU, 1994). Ürün radyonüklitin uyarılmış enerji seviyesinden gecikmeli gama salınımının yapıldığı bozunmalara sahip radyonüklitlerin aktivitelerini hesaplamak için çakışmasız yöntem daha kullanışlı olacaktır. Bu yöntemde istenmeyen çakışmalar olmayacağı için sadece ölü-zamandan dolayı meydana gelen kayıpların düzeltilmesi yeterli olacaktır.

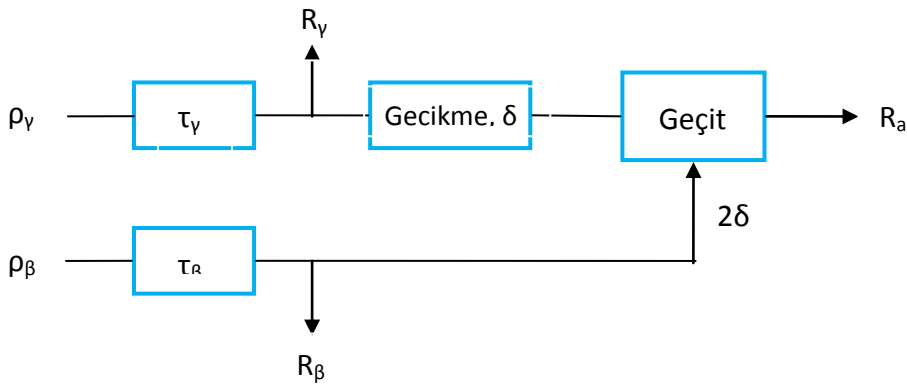
Çakışmasız yöntem ilk kez 1962 yılında Bryant tarafından, uyarılmış seviyede gecikmeli olmayan beta-gama bozunması için çakışmalı yöntemine bir alternatif olarak önerilmiştir (Bryant, 1962). 1967 yılında ise Bryant bu yöntemi gecikmeli beta-gama bozunması durumu için uygulamıştır (Bryant, 1967).

Çakışmasız yöntemde, beta ve gama dedektörlerinden alınan sayım hızları ile birlikte herhangi bir beta ile aynı bozunmaya ait olmayan veya çift olmayan gama sayıları da kaydedilir. Bu açıdan, çakışmasız yöntem çakışmalı yöntemin tamamlayıcısıdır ve temelde farklı değildir. Bu yöntemde çakışma sayısı, çakışma yapmayanların belirlenmesi sonucu hesaplanır. Toplam gama sayım hızı ρ_γ , çakışmayan gama sayım hızı ρ_a olarak tanımlandığında, çakışma sayım hızı $\rho_{\beta\gamma}$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho_{\beta\gamma} = \rho_{\gamma} - \rho_{\alpha}$$

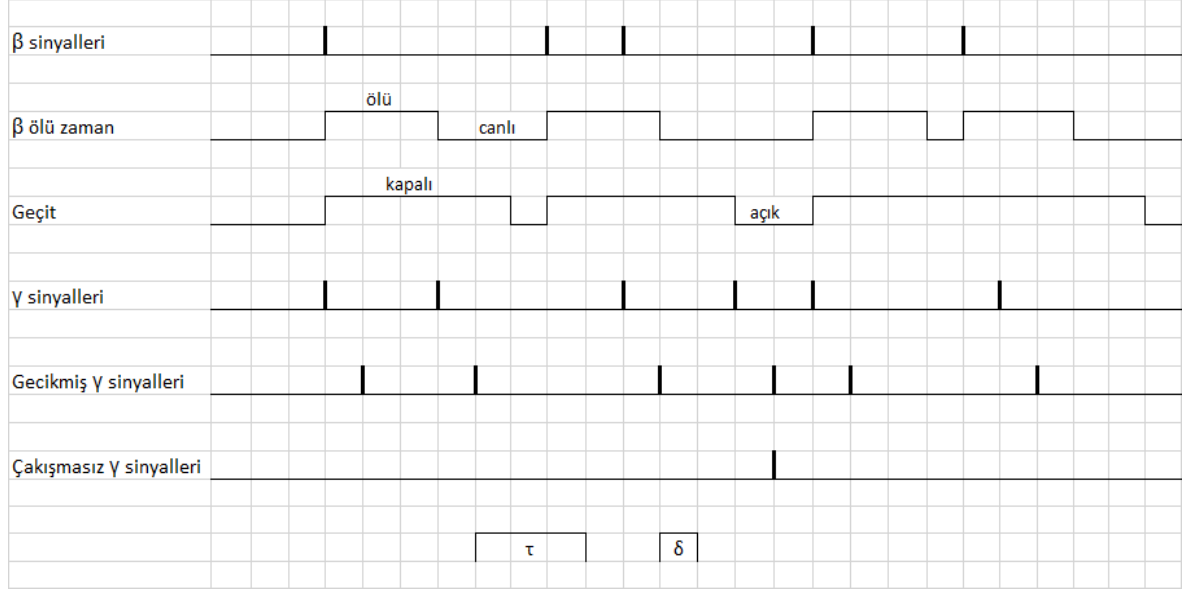
Çakışma yapan beta gama sayısının hızı bu şekilde belirlendikten sonra, ölçülen kaynağın aktivite değeri çakışmalı yöntemde olduğu gibi seçilen bir gama enerji aralığında verim dışıdeğerleme yöntemi kullanılarak hesaplanır.

Çakışmasız yöntemde, beta ve gama sinyallerine önce uzayan ölü zaman modeli uygulanır. Daha sonra gama sinyallerine bir δ süresi kadar gecikme uygulanır. Öncesinde ölü zaman ve gecikme uygulanmış gama sinyalleri ile sadece ölü zaman uygulanmış beta sinyalleri geçit görevini gören bir modüle girer. Bu modülde, beta sinyalleri geçidi açma/kapatma işini yürütür. Gama sinyallerinin δ süresi kadar geciktirilirse, ve geçide ulaşan her beta sinyalinden sonra geçit, ölü zamanın ve 2δ süresinin toplamı kadar kapatılırsa, geçitten geçip sonrasında kaydedilen gama sinyalleri çakışmasız sinyaller olarak kabul edilir. δ süresi sinyaller kayıt edime zamanları ve bu zaman değerlerindeki dalgalanma göz önüne alınarak belirlenir. δ gecikme zamanının beta ve gama sinyalleri arasındaki en büyük farktan büyük olması gerekir. Uygun δ süresi seçildiğinde bir beta sinyalinin eşleniği olan yani o beta sinyali ile aynı bozunmaya ait olan gama sinyali geçit modülünde engellemek ve sadece çakışma yapmayan gama sinyallerini kaydetmek mümkündür (Bryant, 1962). Çakışmasız yöntemin çalışma prensibi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çakışmasız yöntemin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

Beta ve gama sinyalleri, ölü zaman uygulaması, geçit sinyalleri ve çakışmasız sinyaller arasındaki ilişkiler şematik olarak Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çakışmasız yöntemde çakışma yapmayan gama sinyalinin belirlenmesinin şematik gösterimi.

Çakışmalı yöntemde beta sinyallerindeki ölü zaman kayıplarının düzeltilmesi ile çakışma yapan sinyallerdeki ölü zaman kayıplarının düzeltilmesi belli bir dereceye kadar birbirlerini telafi ederler. Ancak çakışmasız yöntemde böyle bir durum söz konusu olmadığı için, bu yöntem ölü zaman değerine karşı daha hassastır ve ölü zaman düzeltilmesi oldukça önemlidir (Bryant, 1962). Bu durum çakışmasız yöntemin bir dezavantajıdır.

3.3.1.1. Sayım Hızlarına Uygulanan Düzeltmeler

Çakışmasız yöntemde beta ve gama sayım hızlarına uygulanan ölü-zaman düzeltmeleri çakışmalı yöntemde uygulanan düzeltmeler ile aynıdır. Bu yöntemde beta ve gama sinyallerine uzamayan ölü-zaman uygulandığı için düzeltmeler aşağıdaki gibi yapılır:

$$\rho_{\beta} = \frac{R_{\beta}}{1 - R_{\beta}\tau_{\beta}} \quad (3.29)$$

$$\rho_{\gamma} = \frac{R_{\gamma}}{1 - R_{\gamma}\tau_{\gamma}} \quad (3.30)$$

Bu yöntemde çakışmasız sayım hızına uygulanan ölü-zaman düzeltmesi oldukça kritik bir öneme sahiptir. Gerçek çakışma yapmayan gama sayım hızını bulmak için gözlemlenen çakışma yapmayan gama sayım hızına Bryant tarafından yaklaşımlar yapılarak elde edilen aşağıdaki formül uygulanır (Bryant, 1962):

$$\rho_a \approx \frac{R_a}{1 - R_{\beta}(\tau_{\beta} + 2\delta)} - R_{a\beta} \quad (3.31)$$

Bu formülde, R_a gözlemlenen (düzeltme yapılmamış) çakışmasız gama sayım hızı, R_{β} gözlemlenen beta sayım hızı, $R_{a\beta}$ gözlemlenen çakışmasız doğal fon sayım hızını ifade eder.

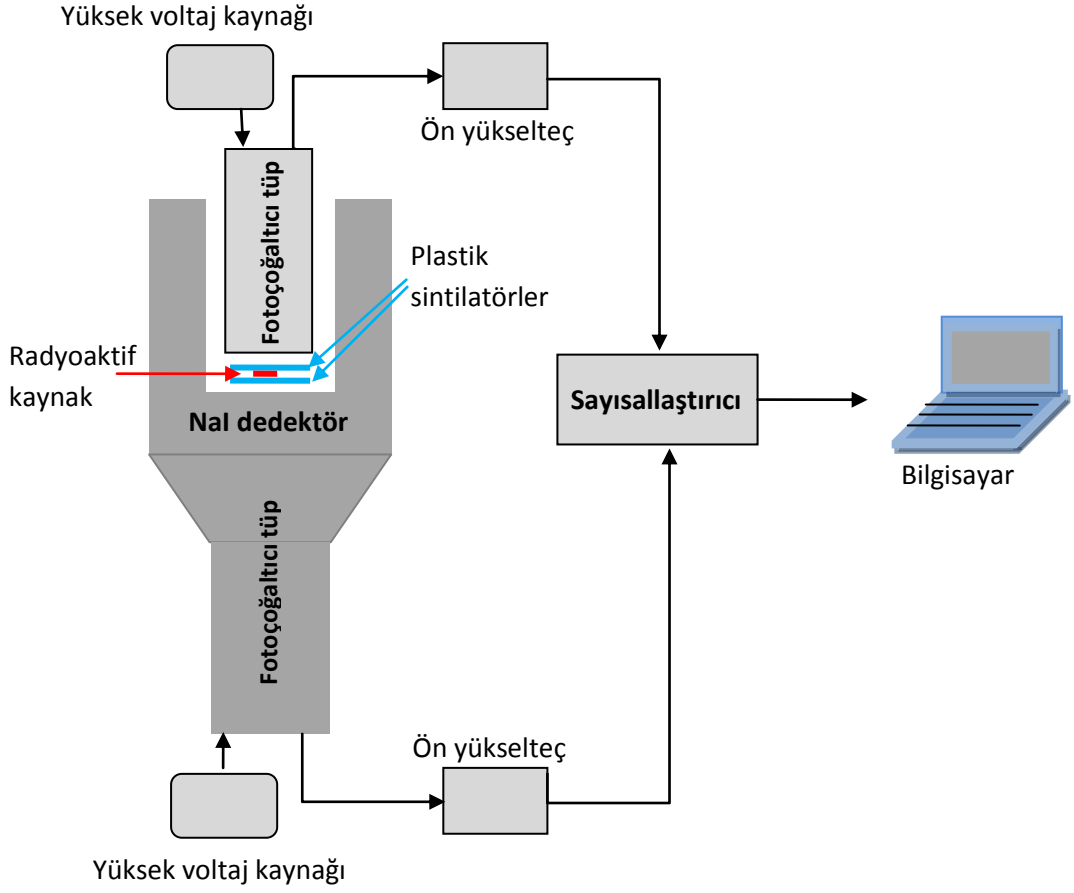
4. SAYIM SİSTEMİ ve MONTE CARLO SİMÜLASYONLARI

4.1. Sayım Sistemi ve Geometri

Bu çalışmada kullanılan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sistemi kuyu tipi sodyum iyodür (NaI) dedektör, plastik sintilatörler, fotoçoğaltıcı tüp, ön yükselteçler ve sayısallaştırıcıdan oluşmaktadır. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sistemi bir TAEK projesi kapsamında kurulmuş olup, sistemin kurulumu ben ve diğer proje çalışanı tarafından yapılmıştır. Gama sayımı, 20 x 20 cm kristal boyutlarında, kuyu derinliği 15 cm ve kuyu çapı 5,2 cm olan NaI dedektör ile yapılmıştır. NaI dedektörün kristali ince alüminyum malzeme ile kaplanmıştır. Kuyunun iç kısımlarında alüminyum kalınlığı yaklaşık 1 mm, dış kısımlarında ise yaklaşık 2 mm'dir. NaI dedektörün enerji çözünürlüğü 661,6 keV için yaklaşık %8'dir (NaI, 2018). Dedektör, yaklaşık 13,3 cm dış çapa, 11.5 cm aktif (ışığa duyarlı) çapa sahip bir fotoçoğaltıcı tüpe entegre edilmiştir. Fotoçoğaltıcı tüpün spektral tepkisi 300-630 nm arasında olup en duyarlı olduğu ışık dalgaboyu 380 nm değeridir. Fotoçoğaltıcı tüpün fotokatot kısmı bialkali malzemedan yapılmıştır (ETEnterprises, 2014). Beta dedektörü olarak Hamamatsu marka R580 model fotoçoğaltıcı tüpe optik gres ile yapıştırılmış BC400 plastik sintilatörler kullanılmıştır. R580 model fotoçoğaltıcı tüpün spektral tepkisi 300-650 nm arasında olup en duyarlı olduğu ışık dalgaboyu 420 nm değeridir. Fotoçoğaltıcı tüpün fotokatot kısmı bialkali malzemedan, penceresi ise borosilikat camdan yapılmıştır (Hamamatsu, 2016). BC400 plastik sintilatör alfa, beta ve gama radyasyonunun ölçümünde yaygın olarak kullanılan organik bir sintilatördür. Poliviniltoluen (PVT) malzemedan yapılan bu sintilatörün yoğunluğu 1,023 g/cm³tür. PVT sintilatör malzemenin ışık üretimi 13000 foton/Mev'dir. PVT sintilatörde elde edilen sinyalin oluşma süresi 2,4 ns, sinyal çıkış süresi 0,9 ns, ve sinyalin yarı yükseklikteki tam genişliği ise 2,7 ns'dir. Sintilatörde oluşan ışığın maksimum dalga boyu 423 nm olup kullanılan R580 model fotoçoğaltıcı tüp ile uyumludur (Saint-Gobain, 2018). Beta ve gama dedektörleri Canberra model 2005 ön yükselteçlere, ön yükselteçler de CAEN marka DT5730B model sayısallaştırıcıya bağlanmıştır. Model 2005 ön yükselteç yüke duyarlı bir ön yükselteç tipi olup sintilatörden veya fotoçoğaltıcı tüpten çıkan yük atmasını toplayarak pozitif polaritede voltaj sinyali oluşturur. Oluşturduğu sinyalin

yükselme zamanı 15 ns'den daha küçük olması itibariyle oldukça hızlıdır ve bu çalışma için uygun bir ön yükselteçtir. Sinyal düşüş zamanı sabiti ise 50 μ s'dir (Mirion, 2019). DT5730B model sayısallaştırıcı, sabit kesir zamanlaması ile sinyal biçimlendirme diskriminasyonu ve sinyal yüksekliği analizi yöntemleri ile dijital sinyal işlenmesi amacıyla kullanılan dalga tipi bir sayısallaştırıcıdır. Yüke duyarlı ön yükselteçler ile uyumlu 14-bit çözünürlüğe ve 500 Ms/s örnekleme hızına sahip bir analogdan dijitale çevirici vasıtasıyla veri okumaktadır. Birbirinden bağımsız sekiz adet okuma kanalına sahiptir. Dijital sinyal işleme modunda sinyal zamanları ve sinyal yükseklikleri liste modunda kaydedilmektedir. Sinyal kaydetme işlemleri CoMPASS ve MC² arayüz yazılımları tarafından kontrol edilmektedir (CAEN, 2016; CoMPASS, 2018). Sayısallaştırıcıdan alınan veriler bir bilgisayarda depolanmıştır. Bu sistemin şematik gösterimi ve elektronik bileşenleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

Kaynak hazırlanması işleminde, iki parça dairesel plastik sintilatörden birinin merkezine radyoaktif kaynak damlatılıp kurutulduktan sonra öteki sintilatör ile sandviç şeklinde birleştirilerek yapıştırılmıştır. Kaynak hazırlama işleminin detayları ileriki alt başlıkta anlatılmıştır. Tek parça haline gelmiş bu sintilatörler fotoçoğaltıcı tüpün penceresine optik gres ile yapıştırılmıştır. Plastik sintilatörler ve dolayısıyla kaynak altta kalacak şekilde fotoçoğaltıcı tüp NaI dedektörün kuyusuna yerleştirilmiştir. Kaynak kuyunun dibinde olacağı için gama ışınları ile dedektör aktif bölgeleri tam katı açığa yakın bir geometride etkileşime gireceklerdir. Bu çalışmada kullanılan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sistemine ait fotoğraflar Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Bu çalışmada kullanılan dijital $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 4.2. Bu çalışmada kullanılan dijital $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sistemi.

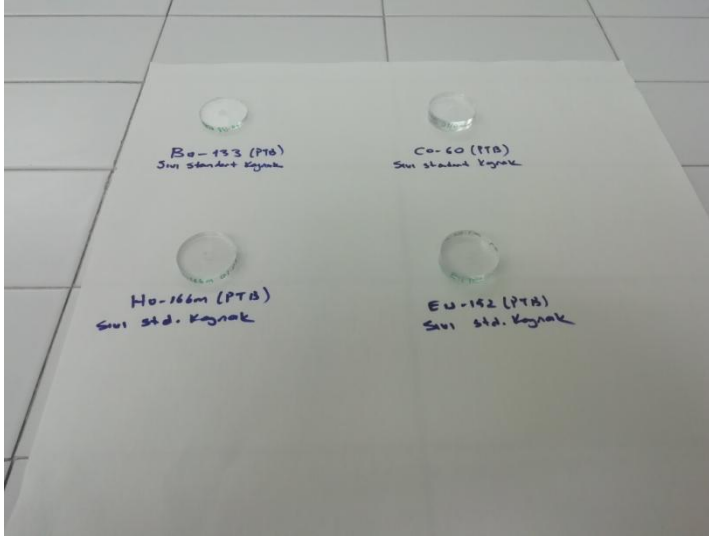
4.2. Kaynakların Hazırlanması

4 $\pi\beta$ - γ çakışma sayım sisteminde ölçümü yapılmak üzere beta ve gama yayınlayan ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyoizotopları seçilmiştir. Bu radyoizotoplar ölçülerek elde edilen sayım sonuçları, bu tez kapsamında geliştirilen veri analiz yazılımında işlenerek aktiviteleri belirlenecektir. Böylece yazılımın doğrulaması yapılmış olacaktır. ^{60}Co basit bir bozunma şemasına sahipken, ^{133}Ba radyoizotopu ^{60}Co 'a nazaran biraz daha karmaşık bir bozunma şemasına sahiptir. ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyoizotopları ise oldukça karmaşık bozunma şemalarına sahiptirler. Çeşitli karmaşıklık derecesinde bozunma şemalarına sahip radyoizotoplar seçilerek hesaplama yönteminin geçerliliği araştırılacaktır. Sayım sisteminde ölçümü yapılmış olan kaynaklara ait fotoğraflar Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

^{60}Co aktivite ölçümü için PTB'den temin edilmiş ve ölçüm tarihindeki tarihindeki spesifik aktivitesi $39,19 \pm 0,27$ kBq/g olan sıvı standart referans kaynaktan pipet marifetiyle $31,180 \pm 0,014$ mg radyoaktif çözelti alınmıştır. Bu çözelti, 5 mm kalınlığında 4,8 cm çapındaki plastik sintilatörün merkezinde daha önceden açılan 0,5 cm çapında, 0,1 cm derinliğindeki oyuğa damlatılmıştır ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Damlatılan sıvının ölçüm tarihindeki aktivite değeri gravimetrik yöntemle $1221,9 \pm 8,4$ Bq olarak hesaplanmıştır. Plastik sintilatör üzerindeki çözelti tamamen kuruduktan sonra aynı boyutlarda ve kalınlıkta bir başka plastik sintilatör ile üst üste birleştirilerek kenarlarından yapıştırılmıştır ve ölçüme hazır hale getirilmiştir. Böylece, plastik sintilatör parçaları hem kaynak olarak hem de beta dedektörü olarak kullanılmıştır.

^{133}Ba ölçümü için kaynak hazırlanmasında PTB'den alınmış olan ve 1 Ocak 2013 referans tarihinde $31,7 \pm 0,3$ kBq/g aktivite derişimine sahip sıvı standart çözelti kullanılmıştır. Bu çözülden alınan $50,200 \pm 0,014$ mg sıvı, 2 mm kalınlığında 4,8 cm çapındaki plastik sintilatörün merkezinde daha önceden açılan 0,5 cm çapında, 0,1 cm derinliğindeki oyuğa damlatılmıştır ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Damlatılan sıvının aktivite değeri ölçüm tarihinde $1061,2 \pm 10,0$ Bq olarak hesaplanmıştır. Plastik sintilatör üzerindeki çözelti tamamen kuruduktan sonra aynı boyutlarda ve kalınlıkta bir başka plastik

sintilatör ile üst üste birleştirilerek kenarlarından yapıştırılmıştır ve ölçüme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.3. Ölçüm yapılmak üzere hazırlanmış kaynaklar. Sıvı kaynak çözeltiler çeşitli kalınlıkta dairesel plastik sintilatöre damlatılmış, kurutulduktan sonra üzeri başka bir plastik sintilatör ile kapatılmıştır.

^{166m}Ho ölçümü için kaynak hazırlanmasında PTB'den alınmış olan ve 6 Şubat 2006 referans tarihinde $19,3 \pm 0,3$ kBq/g, aktivite derişimine sahip sıvı standart çözelti kullanılmıştır. Bu çözeltiden alınan $85,000 \pm 0,014$ mg sıvı, 3 mm kalınlığında 4,8 cm çapındaki plastik sintilatörün merkezinde daha önceden açılan 0,5 cm çapında, 0,1 cm derinliğindeki oyuğa damlatılmıştır ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Damlatılan sıvının aktivite değeri ölçüm tarihinde gravimetrik yöntemle $1627,4 \pm 25,3$ Bq olarak hesaplanmıştır. Plastik sintilatör üzerindeki çözelti tamamen kuruduktan sonra aynı boyutlarda ve kalınlıkta bir başka plastik sintilatör ile üst üste birleştirilerek kenarlarından yapıştırılmıştır ve ölçüme hazır hale getirilmiştir.

^{152}Eu ölçümü için kaynak hazırlanmasında PTB'den alınmış olan ve 10 Temmuz 2014 referans tarihinde $31,1 \pm 0,5$ kBq/g aktivite derişimine sahip sıvı standart çözelti kullanılmıştır. Bu çözeltiden pipet vasıtasıyla alınan $18,500 \pm 0,014$ mg

sıvı, 5 mm kalınlığında 4,8 cm çapındaki plastik sintilatörün merkezinde daha önceden açılan 0,5 cm çapında, 0,1 cm derinliğindeki oyuğa damlatılmıştır ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Damlatılan sıvının ölçüm tarihindeki aktivite değeri gravimetrik yöntemle $456,0 \pm 7,3$ Bq hesaplanmıştır. Plastik sintilatör üzerindeki çözelti tamamen kuruduktan sonra aynı boyutlarda ve kalınlıkta bir başka plastik sintilatör ile üst üste birleştirilerek kenarlarından yapıştırılmıştır ve ölçüme hazır hale getirilmiştir.

4.3. Monte-Carlo Simülasyonları ile Sistemin Optimizasyonu

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminin geometrik optimizasyonunu ve simülasyonunu yapmak için EGS4 (Electron Gama Shower) kodu kullanılmıştır. EGS4, Monte-Carlo yöntemini kullanarak herhangi bir ortamda elektronların ve fotonların hareketlerinin simülasyonunu yapabilmek için Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi'nde (SLAC) geliştirilmiş Mortran3 programlama dili tabanlı bir bilgisayar programıdır (Nelson, Hirayama ve Rogers, 1985).

Bu çalışmada, deneysel ölçümlerin yanı sıra, Monte-Carlo yöntemi kullanılarak beta dedektörü olarak kullanılan plastik sintilatörün ve gama dedektörü olarak kullanılan Nal sintilatörün beta ve gama radyasyonuna karşı tepkileri belirlenmiştir. Plastik sintilatörler, uygun kalınlıklarda kullanıldığında hem beta parçacığı hem de gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılabilir. Ancak, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminde yapılan ölçümler için çakışmalı yöntemin kullanılmasında her bir dedektörün sadece kendi sayacağı radyasyon tipine duyarlı olması en ideal durumdur. Fakat bu ideal duruma hiçbir zaman tam olarak ulaşmak mümkün değildir, ideale maksimum seviyede yaklaşılmaya çalışılır. Özellikle beta dedektörü olarak kullanılan plastik sintilatörün gama ışınlarına da duyarlı olması bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır ve bu durum göz önüne alınarak bir düzeltmeye ihtiyaç vardır. Bu düzeltmeler bu tezin ilgili bölümlerinde anlatılmıştır. Gama ışınlarının plastik sintilatörde enerjilerini bırakmadan, bir başka ifadeyle plastik sintilatör tarafından tespit edilmeden, ortamı terk etmeleri önemlidir. Gama ışınlarının plastik sintilatör malzemesi ile etkileşimlerini en düşük seviyede tutmak için ise bu sintilatör malzemelerin mümkün olduğunca ince olmaları gerekir. Bu yüzden beta ölçümlerinde kullanılacak plastik

sintilatörlerin çeşitli kalınlıklarda gama ışınları ile olan etkileşimlerinin simülasyonları yapılarak gama ışınlarının sintilatör malzemede ne kadar enerji bıraktıkları Monte-Carlo metoduyla belirlenmiştir. Bu sintilatörlerin gama ışınlarına duyarsız olmaları ile birlikte beta parçacıklarına da maksimum seviyede duyarlı olmaları ve dolayısıyla beta verimlerinin yüksek olmaları da önemlidir. Bu nedenle, Monte-Carlo simülasyonları ile beta parçacıklarının plastik sintilatör malzemedeki davranışları da analiz edilmiştir. Plastik sintilatör diskler ve aralarına damlatılan kaynak şematik olarak Şekil 4.4(a)'da gösterilmiştir. Beta ve gama radyasyonlarının plastik sintilatör malzeme içerisinde etkileşimlerini modellemek için Şekil 4.4(b)'de gösterilen geometri kullanılmıştır. Sintilatör malzemenin dışında beta parçacıklarının veya gama ışınlarının yol aldığı ortam vakum olarak tanımlanmıştır ki sintilatör malzemeye ulaşmadan herhangi bir enerji kaybı yaşanmasın.

Yapılan modellemelerde, plastik sintilatör malzemenin kalınlığı 1, 2, 3 ve 5 mm alınmıştır. Deneysel ölçümlerde kullanılan kaynaklar ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ olduğu için, modellemelerde bu radyonüklitlerin bozunması sonucu ortaya çıkan beta parçacıkları, elektronlar ve gama ışınlarının enerjilerini temsil eden enerjiler kullanılmıştır.

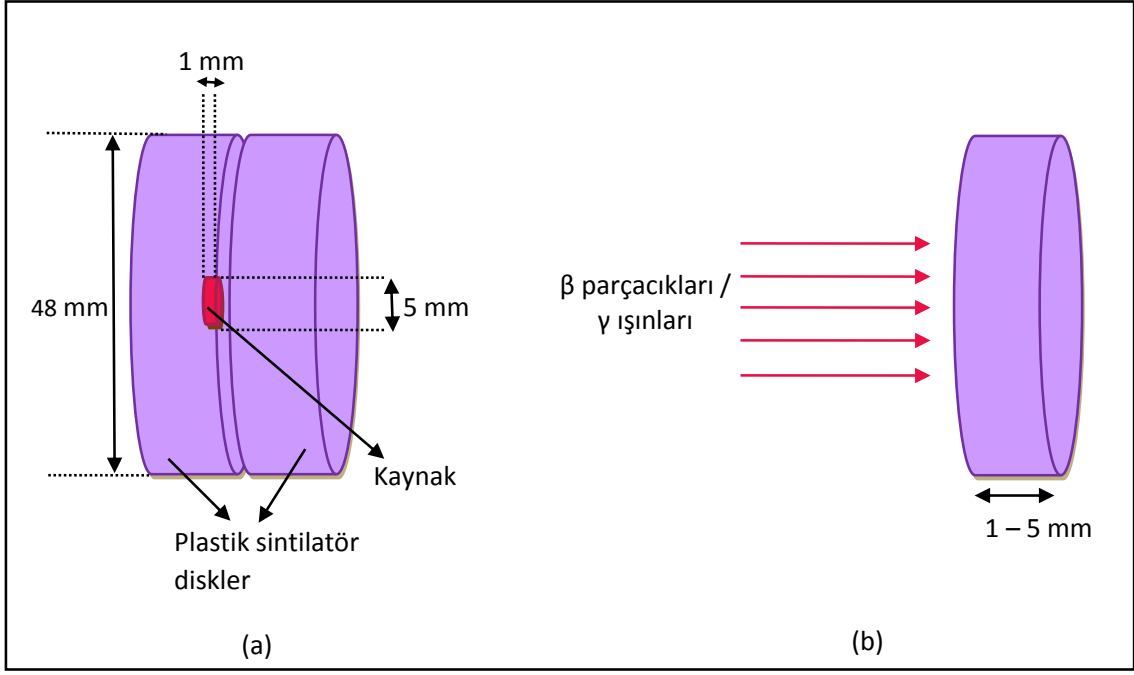
^{60}Co radyonüklitinin beta⁻ bozunması sonucu %99,88 olasılıkla maksimum enerjisi 317 keV, ortalama enerjisi 96 keV olan beta parçacıkları, %0,12 olasılıkla ise maksimum enerjisi 1490 keV, ortalama enerjisi 626 keV olan beta parçacıkları yayınlanır. Gama enerjileri ise 1173,2 keV ve 1332,5 keV değerlerindedir. Dolayısıyla, ^{60}Co için yapılan hesaplamalarda beta enerjisi için en yüksek değer olan 1490 keV, gama enerjisi için ise en düşük değer olan 1173,2 keV enerji değerleri göz önüne alınarak beta ve gamaların 5 mm kalınlıktaki sintilatör malzeme ile olan etkileşimleri incelenmiştir.

$^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitinin beta⁻ bozunması sonucu %74,8 olasılıkla maksimum enerjisi 73,5 keV, ortalama enerjisi 18,6 keV olan beta parçacıkları, %17,2 olasılıkla maksimum enerjisi 32,9 keV, ortalama enerjisi 8,2 keV olan beta parçacıkları, %3,4 olasılıkla ise maksimum enerjisi 1315,1 keV, ortalama enerjisi 674,6 keV olan beta parçacıkları yayınlanır. Yayınlanma olasılığı en yüksek olan gama enerjileri ise 80,57 keV, 184,41 keV, 264,98 keV, 410,95 keV, 711,69 keV, 752,28 keV ve 810,28 keV değerlerindedir ($^{166\text{m}}\text{Ho}$ bozunma

şeması Ek 2’de verilmiştir). Monte Carlo simülasyonları ile beta ve gama enerjilerinin 3 mm kalınlıktaki sintilatör malzeme ile olan etkileşimleri incelenmiştir.

¹⁵²Eu radyonüklitinin bozunmasında %27,9 olasılıkla beta⁻ bozunması, %72,1 olasılıkla elektron yakalama olayı gerçekleşmektedir. Beta bozunması sonucu %13,73 olasılıkla maksimum enerjisi 695,6 keV, ortalama enerjisi 221,7 keV olan beta parçacıkları, %8,24 olasılıkla ise maksimum enerjisi 1474,6 keV, ortalama enerjisi 535,49 keV olan beta parçacıkları yayınlanır. Elektron yakalaması olayında ise değişik olasılıklarda yaklaşık 33 keV ile 50 keV arasında Auger elektronlar, 74,9 keV ile 120,1 keV arasında iç dönüşüm elektronları yayınlanır. Yayınlanma olasılığı en yüksek olan gama enerjileri ise 121,78 keV, 244,69 keV, 344,29 keV, 778,90 keV, 867,38 keV, 964,08 keV, 1085,84 keV, 1112,07 keV ve 1408,01 keV değerlerindedir (¹⁵²Eu bozunma şeması Ek 1’de verilmiştir). Çeşitli beta ve gama enerjilerinin 5 mm kalınlıktaki sintilatör malzeme içinde depolanma oranları belirlenmiştir.

¹³³Ba radyonükliti ise tamamen elektron yakalaması sonucu bozunur. Bozunma sonucunda farklı yayınlanma olasılıklarında yaklaşık 25 keV ile 277 keV arasında elektronlar yayınlanır. Yayınlanma olasılığı en yüksek olan gamalar ise 80,998 keV, 302,85 keV, 356,01 keV ve 383,85 keV enerjilerine sahiptir (¹³³Ba bozunma şeması Şekil 6.14’te verilmiştir). Elektron ve fotonların 2 mm kalınlıktaki sintilatör malzemede meydana gelen etkileşimleri incelenmiştir.



Şekil 4.4. Beta ve gama radyasyonunun plastik sintilatör malzeme içerisindeki etkileşimlerinin incelenmesi amacıyla yapılan Monte Carlo modelinin şematik gösterimi.

Plastik sintilatör kullanılarak yapılan çalışmaların ardından, EGS4 kodu kullanılarak NaI dedektörünün belirlenen geometride çeşitli radyoizotoplar için tepki fonksiyonları, bir başka deyişle enerji spektrumları elde edilerek deneysel olarak elde edilen spektrumlarla karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, elde edilen tepki fonksiyonları kullanılarak değişik enerji aralıklarında her bir radyoizotop için dedektörün toplam verimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için sayım sisteminin EGS4 kodunda kullanılan modeli Şekil 4.5'te gösterilmiştir. 10 keV enerji değerinden başlayarak 10 keV 'lik artışlarla 3 MeV'e kadar *enerjiye* karşılık *sayım* değerlerini veren gama spektrumu elde edilmiştir. Enerji spektrumları elde edilen bütün radyoizotoplar (^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$) için 1 milyon foton kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Bu foton sayısı etki fonksiyonları belirlenen bütün radyoizotoplar için tam enerji piklerinde %0,4'ün altında yeteri derecede düşük bir istatistiksel belirsizlik değeri vermektedir.

EGS4 kodu kullanılarak elde edilen toplam dedektör verimi ve deneysel ölçümden elde edilen toplam sayım değeri kullanılarak ölçümü yapılan kaynağın

aktivitesi hesaplanabilir. Bu çalışmada Monte-Carlo yöntemi ile hesaplanan aktivite değerleri, deneysel olarak ölçümü yapılan ve dijital çakışma sayımı için geliştirilen yazılım ile hesaplanan aktivite değerleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem ile de elde edilen enerji spektrumları ile aktivite değerleri ve bunların karşılaştırması Bölüm 6'da verilecektir.

5. DİJİTAL ÇAKIŞMA SAYIMI YAZILIMI ve UYGULAMASI

5.1. Dijital Çakışma Sayımı Veri Analiz Yazılımına Genel Bakış

Radyonüklit metrolojisi alanında, özellikle de $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemlerinde kullanılan veri alma ve işleme cihazları (sayısallaştırıcılar) ya farklı formatlarda farklı parametreleri çıktı olarak verdiği için ya da kullanıcıların kendileri tarafından geliştirildiği için ticari olarak kullanılabilen bir veri analiz yazılımı temin etmek oldukça zordur veya pahalıdır. Bu yüzden sayım sisteminde kullanılan sayısallaştırıcıya özel bir veri analiz yazılımının geliştirilmesi gereklidir. Bu çalışmada geliştirilen veri analiz yazılımı ve bu yazılım kullanılarak çeşitli radyoizotopların aktivite değerlerinin belirlenmesi bu tezin ana çıktılarından biridir.

Dijital çakışma sistemi (DÇS) veri analiz yazılımını oluşturan alt programlar C++ programlama dilinde oluşturulmuştur ve derlenmiştir. Yazılımı test etme kolaylığı ve kullanıcıya alt program seçme şansı vermesi açısından modüler alt programlar şeklinde tasarlanmıştır. Bu modüler alt programların sırasıyla çalıştırılarak sonucun elde edildiği versiyonuna ek olarak alt programların tek bir ana programda birleştirildiği bir diğer versiyon da geliştirilmiştir.

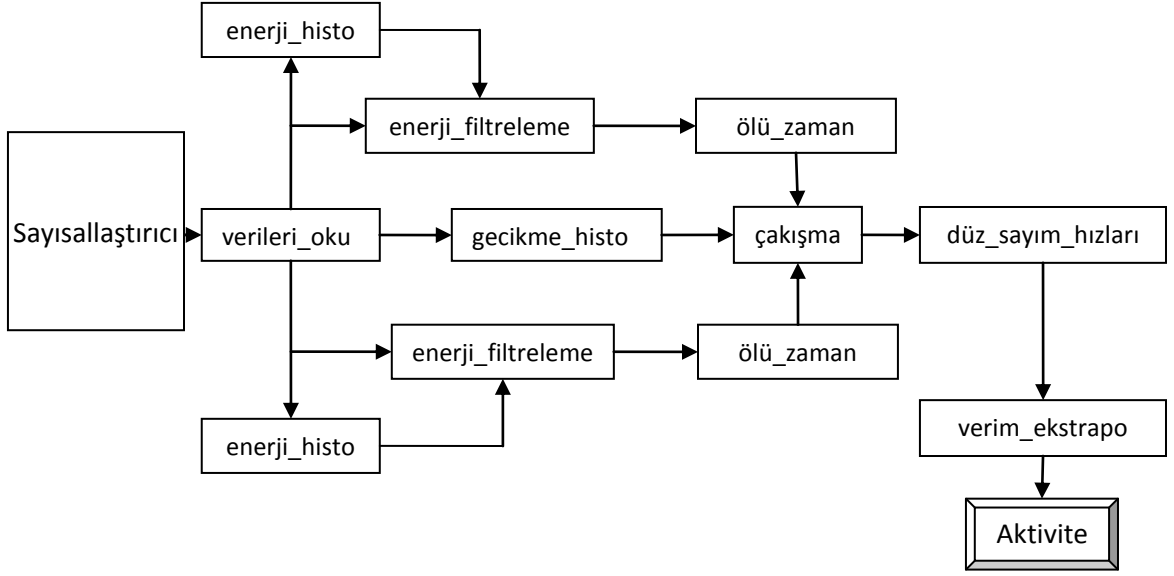
Yazılımın parçaları olan modüller ve kısa açıklamaları Çizelge 5.1'de listelenmiştir.

Çizelge 5.1. Yazılımı oluşturan program modülleri ve kısa açıklamaları.

Modülün adı	Açıklama
ham_veri_oku_yaz.	Sayısallaştırıcının beta ve gama kanallarından liste modunda alınan verileri okur ve liste modundaki her bir parametreye ait değerleri ayrı dosyalara yazar.
enerji_spek	Beta ve gama için enerji histogramlarını çizer
sinyal_gecikmesi	Beta ve gama sinyallerine ait kayıt zamanı değerleri arasındaki farkı hesaplar, zaman-gecikmesi histogramını çizer.
enerji_filtreleme	Tek kanallı analizör gibi çalışır. Enerji filtrelemesi

	uygulayarak beta ve gama için enerji penceresi seçimini yapar.
uzayan_ölü_zaman	Beta ve gama kanallarının her biri için uzayan ölü zaman uygular.
uzamayan_ölü_zaman	Beta ve gama kanallarının her biri için uzamayan ölü zaman uygular.
zaman_araligi	Beta ve gama kanalları için zaman aralığı değerlerini hesaplar ve zaman aralığı histogramını çizer.
cakisma	Çakışma birimi gibi çalışır. Çakışma yapan beta ve gama kayıt zamanlarını bulur, çakışma yapan beta ve gama sayısını verir.
aktivite_hesabi	Beta, gama ve çakışma sayısına düzeltme formüllerini uygular; aktivite ve beta verimi değerlerini hesaplar.

CAEN sayısallaştırıcıdan verilerin alınmasından aktivitenin bulunmasına kadar olan hesaplamalarda kullanılan modüllerin çalışma sıralamasını gösteren şematik çizim Şekil 5.1’de verilmiştir. Her bir modülün çalışma prensibi ve girdi-çıkı dosyaları ile ilgili bilgiler sonraki alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

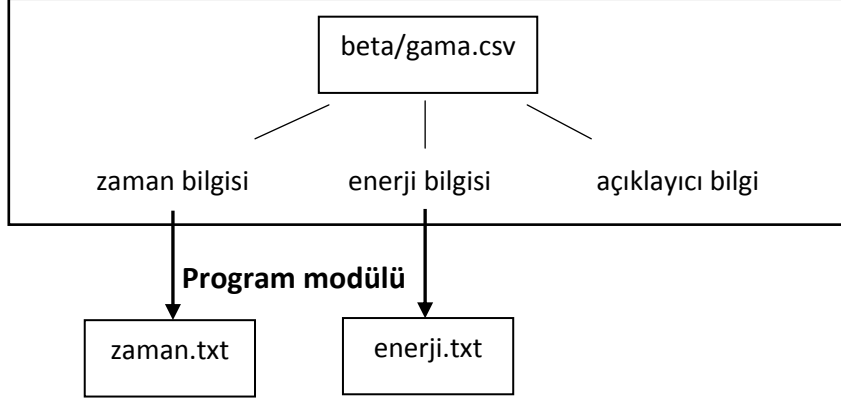


Şekil 5.1. Program modüllerinin çalışma sıralaması.

5.2. Çakışmalı Yöntemin Program Modülleri

5.2.1. Ham Verinin Derlenmesi

Ham verilerin derlenmesi amacıyla oluşturulan 'ham_veri_oku_yaz' modülü, beta ve gama kanallarının her biri için sayısallaştırcıdan liste modunda (list mode) alınan ve bilgisayara depolanan verileri okuyup sıradaki program modülünün işleyebileceği şekilde yeniden yazan programdır. Kaynak ölçümünün sona ermesinden sonra sayısallaştırcı ve ilgili arayüz yazılımı verileri liste modunda csv uzantılı bir dosyaya yazar. Bu dosya beta ve gama kanalları için ayrı ayrı oluşturulur. Dosyanın içeriğinde beta veya gama sinyalinin kayıt edildiği zaman *pikosaniye (ps)* olarak, sinyalin yüksekliği (genliği) *volt (V)* olarak, sinyal hakkındaki bilgi de semboller kullanılarak yazılmıştır. Bu program modülü kullanılarak beta ve gama kanalları için sinyallerin zaman ve sinyal yüksekliği bilgilerini içeren ayrı *txt* uzantılı dosyalar oluşturulur (Şekil 5.2). Tüm bu işlemler beta ve gama kanallarına ait doğal radyasyon sayımı dosyaları için de yapılır.



Şekil 5.2. Ham_veri_oku_yaz modülünün işleyişi.

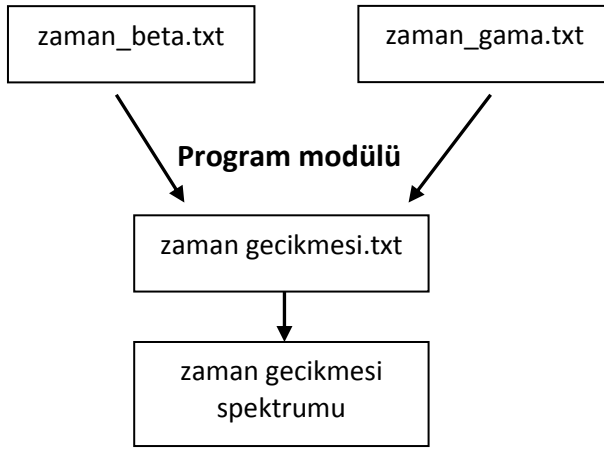
5.2.2. Enerji Spektrumlarının Oluşturulması

Beta ve gama enerji spektrumları 'enerji_spek' modülü kullanılarak oluşturulur. Beta ve gama sinyallerine ait sinyal yüksekliği bilgileri ham_veri_oku_yaz modülünün çıktısı olarak txt dosyası formatında alınır ve bu modülde girdi olarak kullanılır. Beta sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosyada sayımda elde edilen beta sayısı kadar, gama sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosyada gama sayısı kadar sinyal yüksekliği değeri vardır. Bir enerji spektrumu oluşturabilmek için yüzbinlerce olan bu sinyal yüksekliği değerlerinin 1024 kanala yerleştirilmesi gerekmektedir. Kanal sayısı isteğe bağlı olarak değiştirilebilir, ancak en iyi enerji çözünürlüğü 1024 kanalda elde edilir. Dolayısıyla, bu modül, spektrometrik sistemlerde kullanılan bir elektronik bileşen olan çok kanallı analizör görevini yapmış olur. 1024 kanala yerleştirilen sinyal yüksekliği değerlerinin her değerinin frekansına karşı histogramı çizilerek enerji spektrumu elde edilmiş olur.

5.2.3. Sinyal Gecikmesinin Belirlenmesi

Beta ve gama sinyalleri arasındaki zaman farkını belirlemek amacıyla oluşturulan 'sinyal_gecikmesi' modülde, ham_veri_oku_yaz modülünün çıktısı olan ve beta ve gama sinyallerine ait zaman bilgilerini içeren dosyalar girdi olarak kullanılarak her beta sinyali ve onu takip eden gama sinyalinin varış zamanları arasındaki farklar hesaplanır ve bu değerler bir dosyada depolanır

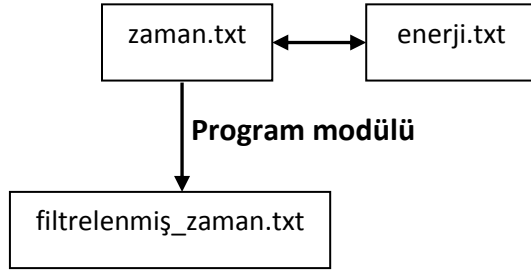
(Şekil 5.3). Daha sonra zaman farklarının histogramı çizilerek β - γ zaman gecikmesi spektrumu oluşturulmuştur. Bu spektruma ait parametreler çakışan beta ve gama sinyallerinin sayısı belirlenirken kullanılacaktır. Zaman gecikmesi spektrumunda elde edilen pikin tepe noktasının eşleştiği zaman farkı değeri beta ve gama sinyalleri arasındaki olasılığı en yüksek olan gecikme değerini vermektedir. Spektrumda elde edilen pikin taban genişliği ise yaklaşık olarak çakışma penceresinin genişliği olarak alınır. Dolayısıyla çakışan beta-gama sinyallerini bulmadan önce her beta sinyaline ne kadar gecikme uygulanması gerektiği belirlenmiş olur.



Şekil 5.3. Sinyal_gecikmesi modülünün işleyişi.

5.2.4. Enerjinin Filtrelemesi

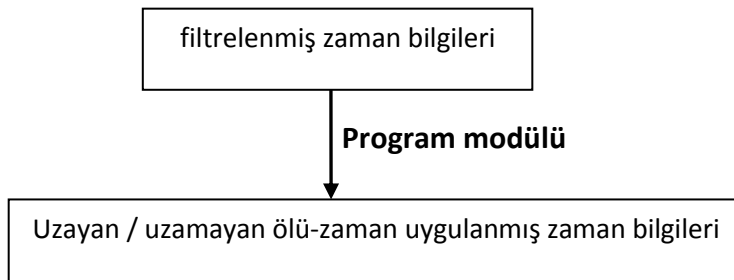
Enerji aralıklarının belirlenmesi amacıyla oluşturulan 'enerji_filtreleme' modülünde, ham_veri_oku_yaz modülünün çıktısı olan ve beta ve gama sinyallerine ait zaman ve sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dört adet dosya girdi olarak kullanılır. Beta ve gama sinyalleri için ayrı ayrı sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosyalara enerji filtrelemesi uygulanarak çalışılmak istenen enerji aralıkları elde edilir. Bu modülün tek kanallı analizör gibi çalıştığını söyleyebiliriz. Üzerinde çalışılmak istenilen beta ve gama enerji aralıkları seçildikten sonra, o enerji aralıklarında kalan ve asıl ihtiyaç duyulan zaman bilgileri alınır ve başka bir dosyaya yazdırılır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Enerji_filtreleme modülünün işleyişi.

5.2.5. Ölü Zaman Uygulanması

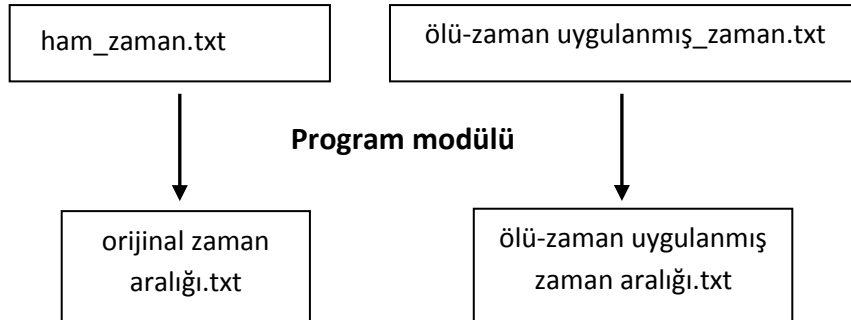
Beta ve gama sinyallerinin enerji filtrelemesi uygulanmış zaman bilgilerine, 'uzamayan_ölü_zaman' modülünde uzamayan ölü-zaman yaklaşımı uygulanır. Sayım sistemini oluşturan dedektörler, ön yükselteçler ve sayısallaştırıcı birimlerinde ne kadar bir ölü-zaman bulunduğu tam olarak bilinmediğinden, bir başka ifadeyle, ölü-zamandan dolayı ne kadar sinyal kaybı olduğu belirsiz olduğundan, tüm bu birimlerde meydana gelebilecek ölü-zaman değerinden daha büyük bir ölü-zaman değeri verilere yapay olarak uygulanır. Bu işlemin amacı, dışarıdan yapay olarak kullanıcı tarafından uygulanan ölü-zaman değeri tam olarak bilindiği için, bu değerın ölü-zaman düzeltme formüllerinde kullanılmasıyla gerçek beta ve gama sinyal sayısına ulaşılmasıdır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Uzayan_ölü_zaman ve uzamayan_ölü_zaman modüllerinin işleyişleri.

5.2.6. Sinyal Zaman Aralıklarının Belirlenmesi

Gama ve beta kanallarının her biri için, sinyaller arasındaki zaman farkını hesaplamak amacıyla oluşturulan 'zaman_araligi' modülünde, beta ve gama sinyallerine ait ham durumdaki zaman bilgileri kullanılarak, ardışık beta sinyalleri ve ardışık gama sinyalleri arasındaki zaman farkları belirlenir. Bu zaman farkları, beta ve gama sinyalleri için ayrı ayrı dosyalara yazılır ve histogramları çizilir (Şekil 5.6). Böylece, zaman aralığı dağılımlarının Poisson dağılımına uyup uymadıkları kontrol edilerek sistemde doğal olarak bulunan ölü zaman değeri hakkında değerlendirme yapılabilir. Aynı işlemler, yapay olarak ölü zaman uygulanmış beta ve gama sinyalleri için tekrar yapılır ve zaman aralığı histogramları çizilir. Yapay olarak uygulanan ölü zaman değerlerinin Poisson dağılımına etkisinin olup olmadığı, istenen ölü zaman değerinin programda uygulanıp uygulanmadığı incelenir.



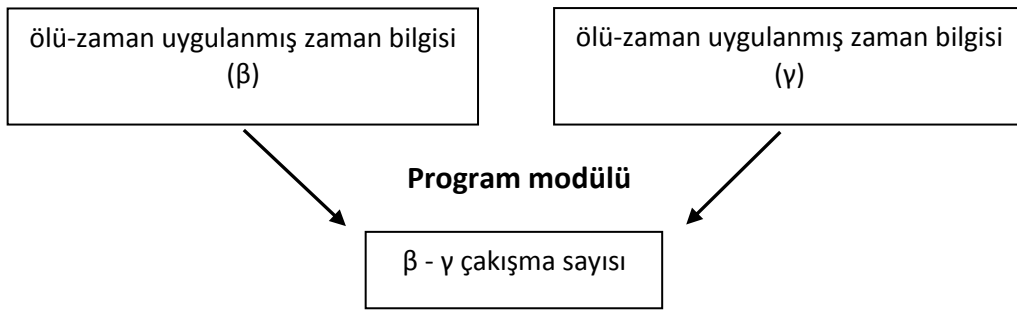
Şekil 5.6. Zaman_araligi modülünün işleyişi.

5.2.7. Çakışma Yapan Sinyallerin Belirlenmesi

Çakışma yapan beta ve gama sinyallerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan 'cakisma' modülünde, daha önceden belirlenen bir enerji aralığında ölü-zaman uygulanmış beta ve gama sinyallerinin zaman bilgileri kullanılarak çakışma yapan beta ve gama sinyallerinin sayısı bulunur. Çakışma yapan beta ve gama sinyalleri demek aynı bozunmaya ait beta ve gama sinyalleri demektir. Farklı dedektörlerde tespit edilen ve farklı yolları takip eden beta ve gama sinyalleri arasında bir zaman farkı vardır. Plastik sintilatör dedektörün sinyal oluşturma

zamanı Nal dedektöre göre daha hızlı olduğundan aynı bozunmaya ait gama sinyali ve beta sinyali arasında bir zaman farkı oluşmaktadır. Gama sinyalleri beta sinyallerini gecikmeli olarak takip eder. Dolayısıyla, çakışma yapan beta ve gama sinyallerini tespit edebilmek için hem beta sinyallerine bir gecikme uygulanmasına hem de çakışma penceresi denilen bir zaman aralığına ihtiyaç vardır.

Daha önceden oluşturulan zaman gecikmesi spektrumunun analiz edilmesi sonucu elde edilen beta-gama arasındaki zaman farkı ve çakışma penceresi değerleri bu modülde kullanılarak çakışma yapan beta ve gama sinyalleri tespit edilir. Bu sinyallere ait zaman bilgisi bir dosyaya yazdırılır ve çakışma sayısı hesaplanır (Şekil 5.7).

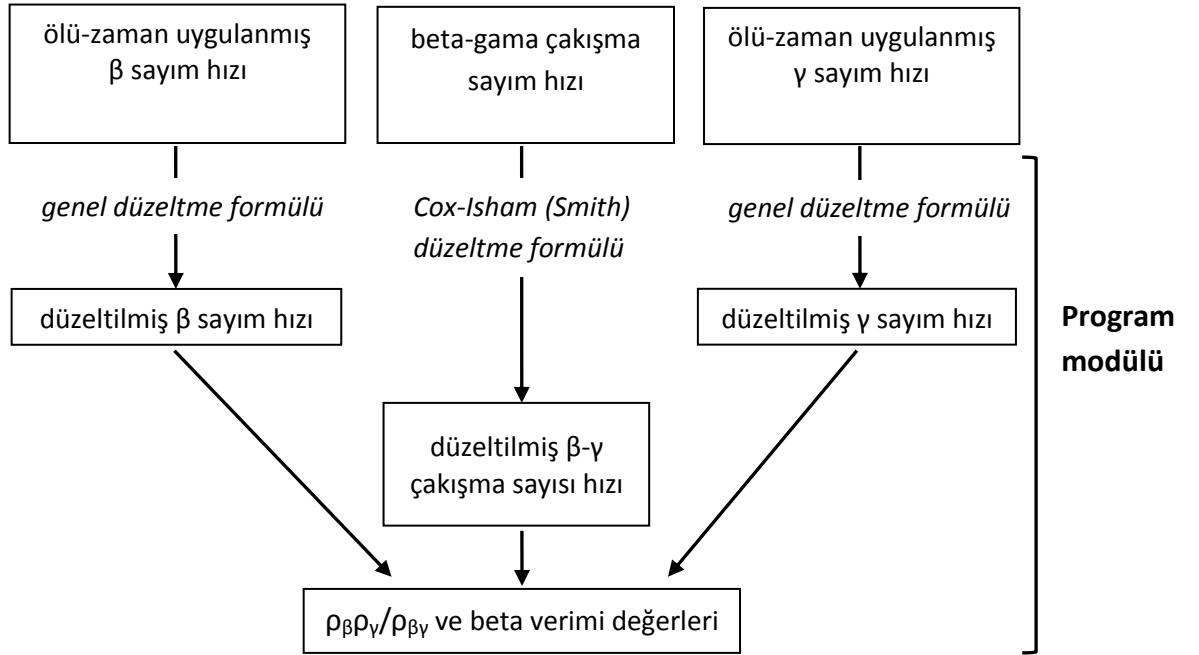


Şekil 5.7. Çakışma modülünün işleyişi.

5.2.8. Aktivitenin Belirlenmesi

Düzeltilme formüllerinin uygulanması ve aktivite hesaplanması amacıyla oluşturulan 'aktivite_hesabi' modülünde, daha önceden belirlenmiş olan ölü-zaman uygulanmış beta ve gama sayım hızları ile çakışma sayım hızı değerleri kullanılarak beta dedektörü verimi ve $(\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma})$ değerleri hesaplanır. Öncelikle, daha önceki bölümlerde anlatılmış olan beta ve gama kanallarına uygulanan genel ölü-zaman düzeltme formülleri kullanılarak düzeltilmiş beta ve gama sayım hızları hesaplanır. Cox-Isham (Smith) formülü kullanılarak da düzeltilmiş beta-gama çakışma sayısı hızı elde edilir. Daha sonra, düzeltilmiş sayım hızları kullanılarak $(\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma})$ ve beta dedektör verimi değerleri hesaplanır. Bu

hesaplamlarda kullanılan beta ve gama kanallarına ait bütün sayım hızı değerleri, çakışma sayım hızı değerleri, verim değeri ve $(\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma})$ değeri program çıktısı olarak bir dosyaya yazdırılır. Şekil 5.8’de bu modülün yaptığı iş şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 5.8. Aktivite_hesabi modülünün işleyişi.

5.2.9. Verim Dışadeğerleme Yöntemi

Bu yöntemde, belirlenen bir gama enerji aralığında her beta enerjisi diskriminasyonu (ayırımı) için, daha önceden hesaplanmış olan $(\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma})_c$ değerlerine karşılık beta dedektörü verimi kullanılarak hesaplanan $(1-\varepsilon_{\beta})/\varepsilon_{\beta}$ değerlerinin grafiği çizilir. Grafikte elde edilen dağılıma doğrusal bir fit ya da düşük dereceli bir polinom fiti uygulanır. Dışdeğerleme sonucunda beta veriminin 100% olduğu yani $(1-\varepsilon_{\beta})/\varepsilon_{\beta}$ değerinin sıfır olduğu $(\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma})$ değeri ölçümü yapılan kaynağın aktivitesini verir.

5.3. akışmasız Yöntemin Program Modülleri

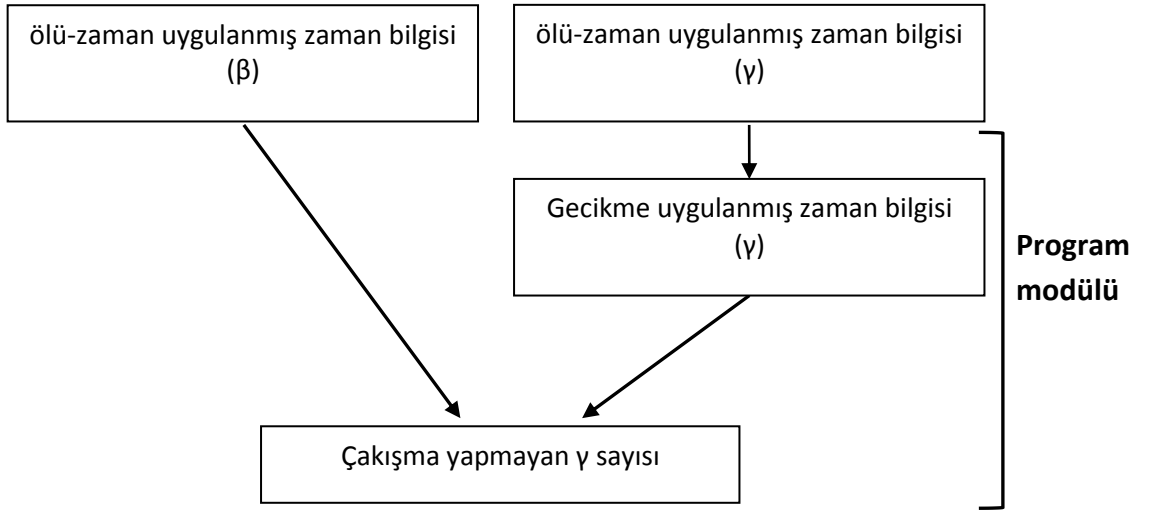
akışmasız yöntemin çalışma prensipleri bu tezin önceki bölümlerinde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bu yöntemin programlanmasının çakışmalı yöntemden farklarından biri, çakışmalı yöntemin aksine bu yöntemde çakışma yapmayan gama sinyallerinin tespit edilmesidir. akışmalı yöntemde kullanılan ham verileri işleme, enerji filtrelemesi, uzayan ölü zaman uygulanması modülleri bu yöntemde de aynen kullanılır. Çakışma yapmayan sinyallerin tespiti farklı bir algoritma ile yapıldığı için 'Çakışma' modülünün yerine bu yöntemde 'Çakışmasız' modülü kullanılır. akışmasız yöntemin çakışmalı yöntemden farklı bir diğer modülü de çakışma yapmayan gama sinyallerinin belirlendiği modüldür. Bu yöntemde çakışma yapmayan sinyallere uygulanan ölü zaman düzeltilmesi ve sonrasında çakışma yapan sinyallerin sayım hızını hesaplama biçimi çakışmalı yöntemden farklı olmaktadır. Dolayısıyla, aktivite hesabının yapıldığı bu modül de diğer yöntemdekinden farklıdır. Beta, gama ve çakışmasız kanallarına ölü zaman düzeltilmesi yapıldıktan sonra elde edilen beta, gama, çakışma yapmayan ve çakışma yapan sayım hızları verim dışı değerlendirme yönteminde kullanılarak aktivite değeri belirlenir. Verim dışı değerlendirme yöntemi çakışmalı yöntem ile aynı algoritmaya dayanır.

akışmasız yöntemde, çakışmalı yöntemden farklı algoritmalara sahip olan iki modülün detayı aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

5.3.1. Çakışma Yapmayan Sinyallerin Belirlenmesi

Çakışma yapmayan sinyallerin belirlenmesi amacıyla 'çakışmasız' modülü oluşturulmuştur. Bu modülde, daha önceden belirlenen gama ve beta enerji aralıklarında ölü-zaman uygulanmış beta ve gama sinyallerinin zaman bilgileri kullanılarak çakışma yapmayan beta ve gama sinyallerinin sayısı bulunur. Çakışma yapmayan beta ve gama sinyalleri aynı bozunmaya ait olmayan beta ve gama sinyalleridir. akışmasız yöntemin çalışma prensibi gereği, daha önce ölü zaman uygulanmış gama sinyallerinin zaman bilgilerini içeren dosya okutularak gama sinyallerinin her birinin kaydedilme zamanlarına bir δ süresi ilave edilir. Böylece her bir gama sinyali δ süresi kadar geciktirilmiş olur. Daha sonra, ölü zaman uygulanmış beta sinyallerinin zaman bilgilerini içeren dosya

okutulur ve her bir beta sinyaline ölü zaman (τ) ve 2δ sürelerinin toplamı kadar bir süre eklenir. Bu beta sinyalleri geçiti açıp/kapama işlevini yapacaktır. Her beta sinyali geçide ulaştığında geçit $\tau+2\delta$ süresi kadar kapalı kalacaktır. Bu durum algoritması, bir beta sinyalinin kaydedilme zamanı ile o kaydedilme zamanının $\tau+2\delta$ fazlası arasındaki zaman dilimine bir gama sinyali düşerse, o gama sinyalinin silinmesi, kalan gama sinyallerinin kaydedilme zamanlarının ise bir dosyaya yazılması şeklinde oluşturulmuştur. Algoritmada silinmeden kalan bu gama sinyalleri bir beta sinyali ile çakışma yapmayan gama sinyalleridir. Bu modülün işleyişi Şekil 5.9'da şematik olarak gösterilmiştir.



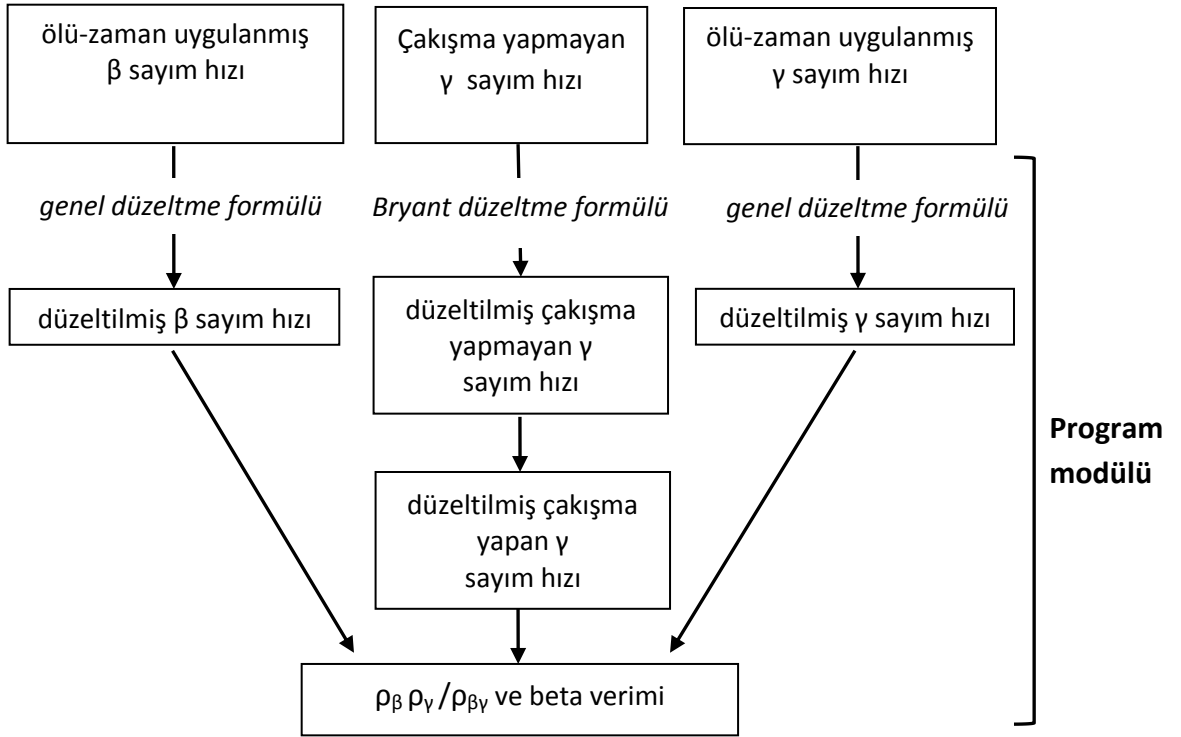
Şekil 5.9. Çakışmasız modülün işleyişi.

Gama sinyallerine uygulanan gecikme, δ süresi, daha önceden oluşturulan zaman gecikmesi spektrumunun analiz edilmesi sonucu elde edilen beta-gama arasındaki zaman farkları göz önüne alınarak belirlenir. δ süresinin beta ve gama sinyalleri arasındaki maksimum zaman farkına eşit veya o zaman farkından büyük olması genelde tavsiye edilen durumdur (Baerg, 1981; ICRU, 1994; Williams ve Campion, 1965).

5.3.2. Çakışmasız Yöntem ile Aktivite Hesabı

Düzeltilme formüllerinin uygulanması ve aktivite hesabının yapılması amacıyla 'cakismasiz_aktivite_hesabi' modülü oluşturulmuştur. Bu modülde, gözlemlenen beta, gama ve çakışma yapmayan gama sinyallerinin sayım hızı kullanılarak düzeltilmiş beta, gama ve çakışma yapmayan gama sayım hızları hesaplanır. Gözlemlenen sayım hızlarına uzamayan ölü zaman ve doğal fon düzeltmeleri uygulanır. Öncelikle, daha önceki bölümlerde açıklanmış olan beta ve gama kanallarına uygulanan genel uzamayan ölü-zaman düzeltme formülleri kullanılarak düzeltilmiş beta ve gama sayım hızları (ρ_β ve ρ_γ) hesaplanır. Eşitlik 3.2.1.1'de verilen Bryant formülü kullanılarak da düzeltilmiş çakışma yapmayan gama sayım hızı (ρ_a) elde edilir. Bu düzeltme formülünde yer alan gözlemlenen çakışmasız doğal fon sayım hızı ($R_{a\beta}$) değeri hesaplanırken kaynak sayarken uygulanan işlemlerin aynısının uygulanması tavsiye edilir (Bryant, 1962; ICRU, 1994). Laboratuvarda yapılan 1000 saniye süreli doğal radyasyon sayımlarında, gama sayım hızı 136,9 sayım/zaman, beta sayım hızı ise 1,5 sayım/zaman olarak belirlenmiştir. Doğal fona ait beta ve gama sinyallerinin çakışmadığı varsayımında bulunularak doğal fon çakışmasız sayım hızının, doğal fon gama sayım hızına eşit olduğu yaklaşımı yapılmıştır.

Düzeltilmiş düzeltilmiş gama ve çakışmasız gama sayım hızları arasındaki fark bulunarak düzeltilmiş çakışma yapan gama sayım hızı ($\rho_{\beta\gamma}$) elde edilir. Daha sonra $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ ve beta dedektör verimi (ϵ_β) değerleri hesaplanır. Bu hesaplamalarda kullanılan beta ve gama kanallarına ait gözlemlenen ve düzeltilmiş sayım hızı değerleri, gözlemlenen ve düzeltilmiş çakışmasız sayım hızı değerleri, gözlemlenen ve düzeltilmiş çakışma sayım hızı değerleri, verim değerleri ve $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerleri program çıktısı olarak bir dosyaya yazdırılır. Bu modülün çalışma prensibi Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Cakismasiz_aktivite_hesabi modülünün işleyişi.

5.4. Yazılımın Özeti

Geliştirilmiş olan yazılımda yapılan işlemlerin özeti aşağıda verilmiştir:

1. Sayısallaştırıcıdan ayrı ayrı alınan beta ve gama sinyallerine ait zaman ve sinyal yüksekliği bilgilerini içeren ham veri işlenerek hem beta hem de gama kanalı için zaman ve sinyal yüksekliği bilgileri ayrı dosyalara yazılır.
2. Beta ve gama kanalları için zaman bilgilerini içeren dosyaları kullanarak zaman gecikmesi spektrumu oluşturulur. Bu spektrumdan yararlanarak ileriki basamaklarda yapılacak çakışma hesabında kullanılmak üzere beta-gama sinyal farkı ve çakışma zaman aralığı belirlenir.
3. Sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosyalar kullanılarak beta ve gama spektrumları oluşturulur.
4. Gama sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosya kullanılarak hesaplamalar yapılacak gama enerji aralığı seçilir. Bu aralık, zaman bilgilerini içeren dosyaya da uygulanır ve böylece enerji filtrelemesi uygulanmış zaman bilgileri yeni bir

dosyaya yazdırılır. Aynı gama enerji aralığı için, beta sinyal yüksekliği bilgilerini içeren dosya kullanılarak beta sinyallerine değişik seviyelerde enerji diskriminasyonu uygulanır ve filtrelenmiş beta zaman bilgileri yeni bir dosyaya yazdırılır.

5. Enerji filtrelemesi uygulanmış gama sinyallerine zaman bilgilerini içeren dosya vasıtasıyla yapay ölü zaman uygulanır ve ölü zaman uygulamasından geriye kalan sinyallerin zaman bilgileri yeni bir dosyaya yazdırılır. Enerji filtrelemesi uygulanmış beta sinyallerine zaman bilgilerini içeren dosya vasıtasıyla yapay ölü zaman uygulanır ve ölü zaman uygulamasından geriye kalan sinyallerin zaman bilgileri yeni bir dosyaya yazdırılır.

6. Beta ve gama kanallarına ait ölü zaman uygulanmış zaman bilgilerini içeren dosyalar kullanılarak çakışma yapan beta ve gama sinyalleri belirlenir ve bir dosyaya yazdırılır. Çakışmasız yöntemde ise gama sinyallerine önce belli bir gecikme uygulanır, daha sonra çakışma yapmayan gama sinyalleri belirlenir ve bir dosyaya yazdırılır.

7. Ölü zaman uygulanmış gama ve beta sinyallerine ölü zaman düzeltmesi yapılarak düzeltilmiş gama ve beta sayım hızları hesaplanır. Bu işlem, tek bir gama enerji aralığı için beta kanallarının her diskriminasyon seviyesi için ayrı ayrı yapılır. Her beta diskriminasyon seviyesi için çakışma yapan sinyallere ölü zaman ve ayırma zamanı (sinyal genişliği) düzeltmesi yapılarak düzeltilmiş çakışma sayım hızı bulunur. Çakışmasız yöntemde ise, çakışma yapmayan gama sayım hızına ölü zaman düzeltmesi uygulanarak düzeltilmiş çakışma yapmayan gama sayımı bulunur. Düzeltilmiş gama sayım hızından düzeltilmiş çakışma yapmayan gama sayım hızı çıkarılarak düzeltilmiş çakışma sayım hızı hesaplanır.

8. Düzeltilmiş beta, gama ve çakışma sayım hızları kullanılarak verim dışı değerlendirme yönteminde kullanılmak üzere beta dedektör verimi (ϵ_β), $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_c$ değerleri her beta diskriminasyon seviyesi için hesaplanır. Bu değerlerin ve önceki adımlarda hesaplanan düzeltilmiş ve düzeltilmemiş tüm sayım hızı değerleri çıktı olarak bir metin dosyasına yazdırılır.

9. $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık gelen $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_c$ değerlerinin grafiği çizilir ve verilere uyan bir fit yapılır. Beta verim değerinin %100 olduğu yani $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta = 0$ olduğundaki $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_c$ değeri aktiviteyi verir.

10. Enerji filtreleme basamağında yeni bir gama enerji aralığı seçilir. Bu aralık için, önceki gama enerji aralığında belirlenen beta diskriminasyon seviyeleri tekrar belirlenir.
11. Sonraki işlemler, yukarıdaki adımlarda kaldığı yerden devam ettirilir.
12. Farklı gama enerji aralıklarında hesaplanan aktivite değerinin aritmetik ortalaması alınarak nihai aktivite değeri belirlenmiş olur.

6. AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLAR

6.1. Monte Carlo Modellemelerinin Sonuçları

6.1.1. Elektron – Plastik Sintilatör Etkileşimleri

Beta parçacıklarının, dönüşüm elektronların ve Auger elektronların plastik sintilatör malzeme içerisinde enerjilerini maksimum seviyede bırakmaları, dedektör veriminin yüksek olması açısından önemlidir. Bu durumda dedektör verimini belirleyen iki parametre beta veya elektron enerjisi ve plastik sintilatörün kalınlığıdır. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin beta veya elektron enerjileri birbirinden farklı olduğu için maksimum verimi elde edebilmek amacıyla, her bir radyonüklit için farklı kalınlıkta sintilatör kullanılması daha uygundur. Deneysel ölçümlerde, göreceli olarak yüksek beta enerjisine sahip ^{60}Co ve ^{152}Eu için 5mm kalınlığında plastik sintilatörler kullanılmıştır. Daha düşük enerjili beta parçacıkları yayınlayan $^{166\text{m}}\text{Ho}$ ölçümü için 3 mm kalınlıkta plastik sintilatörler kullanılmıştır. Sadece elektron yakalama olayı sonucu bozulan ve düşük enerjilerde Auger ve iç dönüşüm elektronları yayınlayan ^{133}Ba için ise 2 mm kalınlığında sintilatör kullanılmıştır. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ beta enerjilerinin kullanılan sintilatör malzemeler içerisinde ne oranda bırakıldığı EGS4 kodu ile hesaplanmıştır ve Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin bozunması sonucu ortaya çıkan beta parçacığı, iç dönüşüm elektronları ve Auger elektronları enerjilerinin plastik sintilatör malzemedeki davranışlarının Monte Carlo yöntemi ile belirlenmesi (Enerji değerleri Nucleide, 2019'dan alınmıştır).

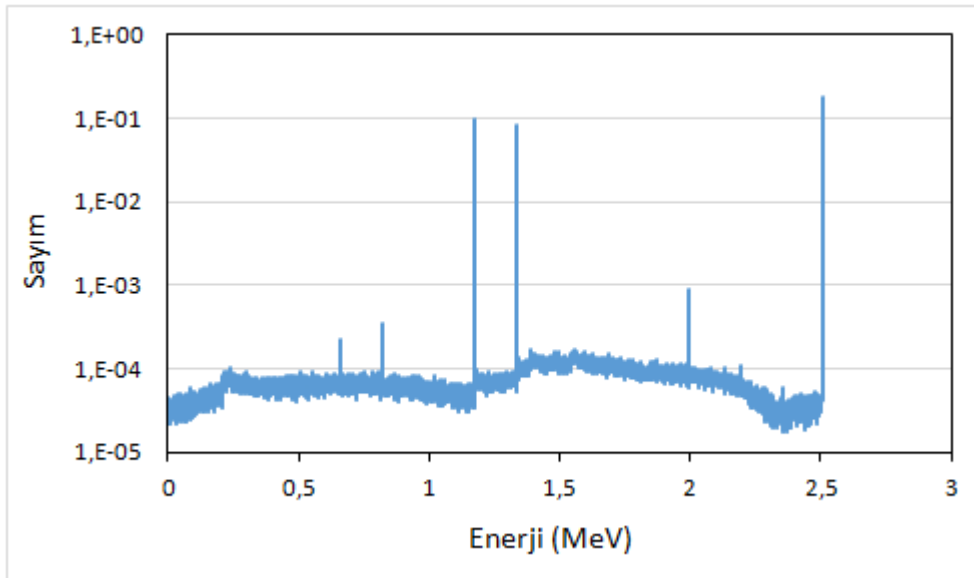
Radyonüklit	Beta (β) / Elektron (e) enerjisi (keV)	Yayınlanma olasılığı (%)	Geri yansıyan enerji (%)	Bırakılan enerji (%)	Geçen enerji (%)
^{60}Co	β 317	99,88	0,22	99,78	0
	β 1490	0,12	0,30	97,51	2,19
^{133}Ba	e 45,0	47,7	0,56	99,44	0
	e 75,3	7,2	0,47	99,57	0,01
^{152}Eu	β 695,7	13,73	0,34	99,52	0,14
	β 1474,6	8,24	0,15	97,81	2,04
	e 74,9	19,3	0,50	99,5	0
	e 114,0	10,56	0,36	99,61	0,03
	e 50,2	6,58	0,63	99,37	0
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	β 73,5	74,8	0,62	99,8	0
	β 32,9	17,2	0,59	99,41	0
	β 644,5	2,3	0,20	99,67	0,13
	β 1315,1	3,4	0,12	70,43	29,45

Çizelge 6.1'de görüleceği üzere, beta parçacıkları veya elektronlar enerjilerinin çok büyük kısmını plastik sintilatör malzeme içerisinde bırakmışlardır. Dolayısıyla, deneysel ölçümlerde kullanılan sintilatörlerin amaca uygun olduğu ve yüksek bir beta dedektör veriminin elde edilmesine yardımcı olacağı söylenebilir.

6.1.2. Gama Işını – Nal Etkileşimleri

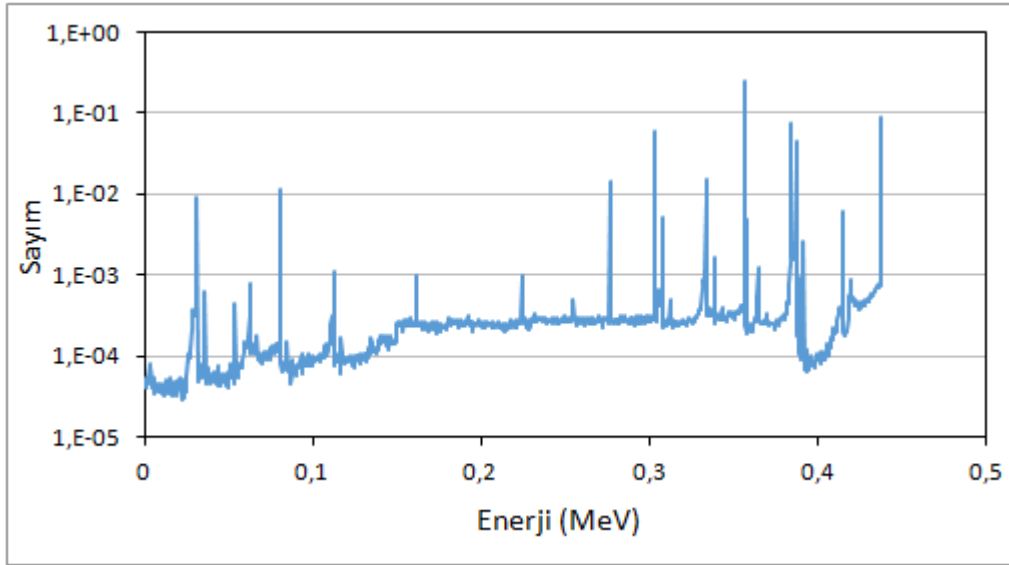
$4\pi\beta\text{-}\gamma$ sayım sisteminin Bölüm 4.3'te detayları verilen Monte Carlo modellemesi kullanılarak ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin belirlenen geometrideki toplam Nal dedektör verimleri hesaplanmıştır. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitleri için Monte Carlo simülasyonları sonucu elde edilen gama enerji spektrumları, sırasıyla Şekil 6.1, 6.2 6.3 ve 6.4'te verilmiştir. İleriki bölümlerde görüleceği üzere, Nal dedektörünün enerji çözünürlüğü düşük olduğu için, Nal dedektör ile elde edilen deneysel spektrumlarda özellikle enerjileri birbirine yakın olan pikler iç içe geçmiş vaziyette, neredeyse tek pikmiş gibi görünür. Ancak, EGS4 kodu kullanılarak yapılan Monte Carlo simülasyonunda kanal başına 0,3 keV enerji alındığı için enerji çözünürlüğü problemi görülmez. Şekil 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4'te de görüldüğü gibi pikler, enerjileri yakın bile olsa net olarak ayırt edilebilir.

Monte Carlo simülasyonu sonucu elde edilen ^{60}Co gama enerji spektrumu Şekil 6.1'de verilmiştir. Yayınlanma olasılıkları en yüksek olan 1173,2 keV ve 1332,5 keV pikleri ve bu iki pikin toplanması sonucu oluşan 2505,7 keV toplam piki spektrumda görülmektedir.



Şekil 6.1. EGS4 kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{60}Co gama spektrumu.

Monte Carlo sümülasyonu sonucu elde edilen ^{133}Ba gama enerji spektrumu Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Yayınlanma olasılığı yüksek olan 53,16 keV, 79,6 keV, 80,99 keV, 160,6 keV, 276,39 keV, 302,85 keV, 356,01 keV ve 383,85 keV gama enerji pikleri ile birlikte 30,6 keV, 30,9 keV, 34,9 keV ve 35,8 keV enerjide x-ışını pikleri spektrumda görülmektedir. γ - γ ve γ -x ışını gerçek çakışmalarından kaynaklı oluşan toplam pikler de spektrumda yer almaktadır.

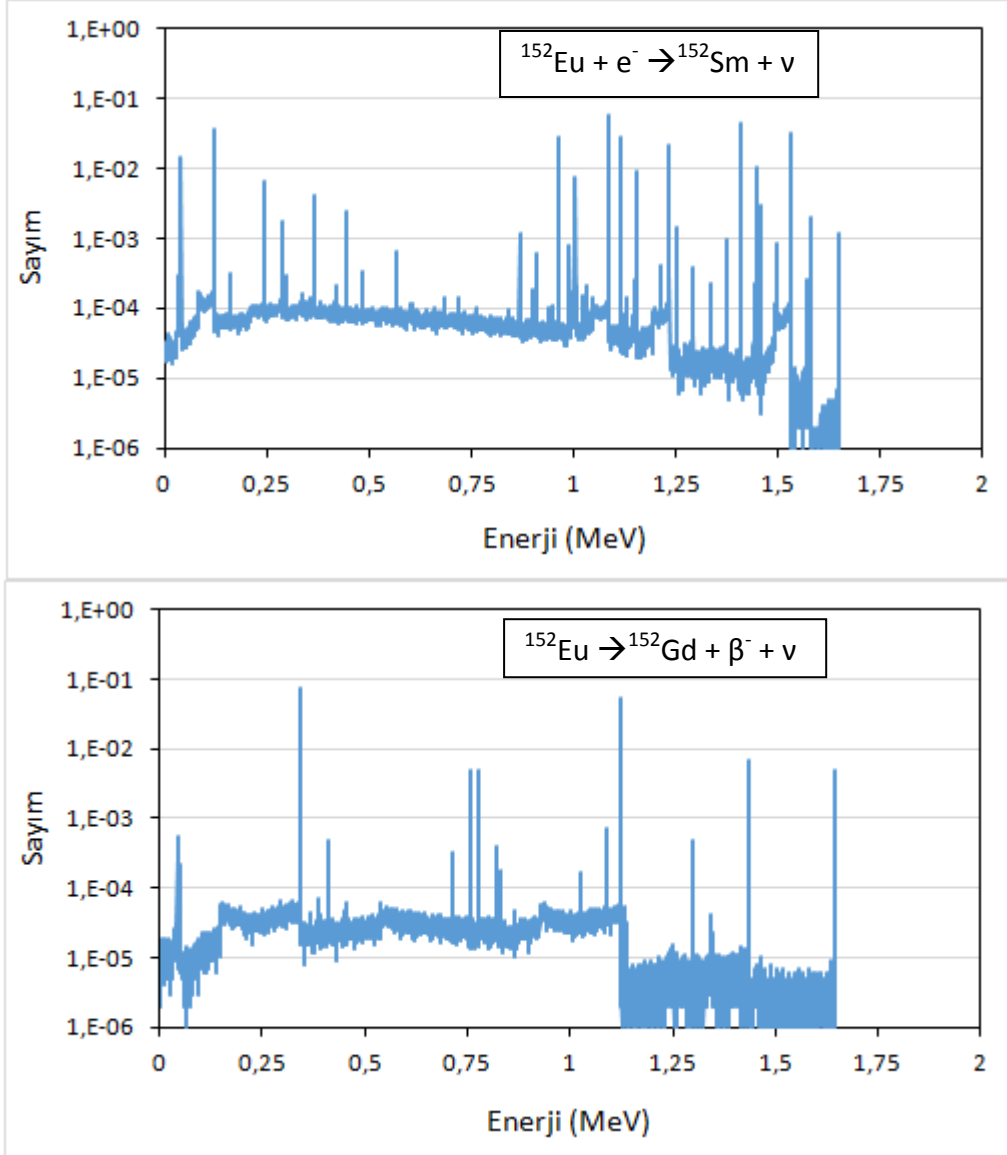


Şekil 6.2. EGS4 kodu kullanılarak yapılan sümülasyon ile elde edilen ^{133}Ba gama spektrumu.

Monte Carlo sümülasyonu sonucu elde edilen ^{152}Eu radyonüklidine ait gama enerji spektrumları Şekil 6.3'te verilmiştir. Üstteki spektrum ^{152}Eu radyonüklidinin elektron yakalaması olayı ile ^{152}Sm radyonüklidine bozunması sonucu yayınlanan gama ve x-ışını enerjilerini göstermektedir. Alttaki spektrum ise ^{152}Eu radyonüklidinin β^- bozunması ile ^{152}Gd radyonüklidine dönüşmesi sonucu yayınlanan gama ve x-ışını enerjilerini göstermektedir. ^{152}Eu bozunma şeması Ek 1'de verilmiştir.

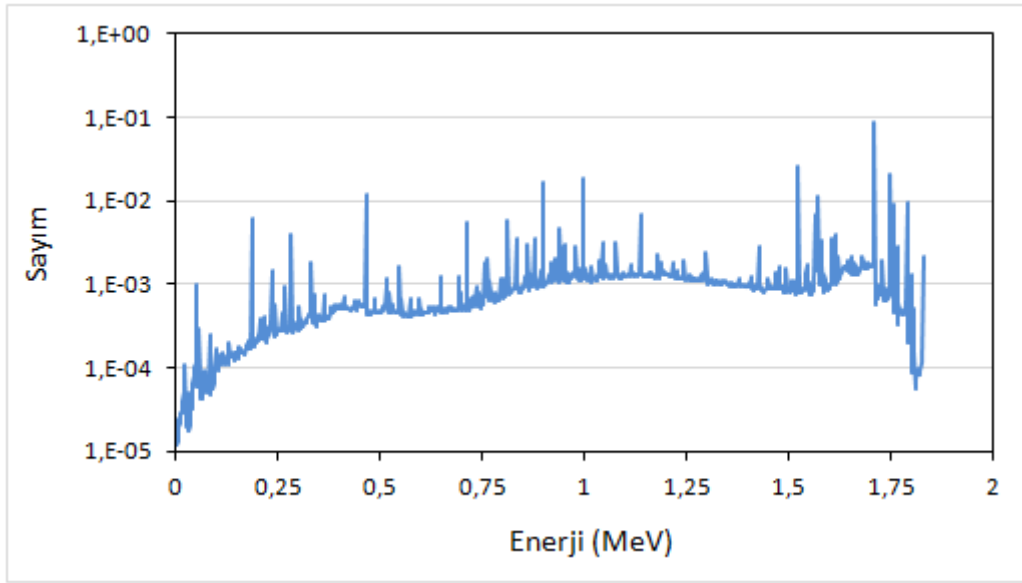
^{152}Eu bozunma şemasına göre, elektron yakalama sonucu yayınlanma olasılığı en yüksek olan gama enerjileri 121,78 keV, 244,69 keV, 295,94 keV, 443,96 keV, 688,67 keV, 719,35 keV, 810,45 keV, 867,38 keV, 964,08 keV, 1085,84 keV, 1112,07 keV, 1408,01 keV, 1457,64 keV, 1528,10 keV değerlerindedir.

Ayrıca yaklaşık 40 keV ile 47 keV enerji aralığında x-ışınları da yayınlanmaktadır. ^{152}Eu 'nun β^- bozunması sonucu yayınlanma olasılığı en yüksek olan gama enerjileri ise 344,28 keV, 367,79 keV, 411,12 keV, 503,47 keV, 678,62 keV, 778,90 keV, 1089,73 keV, ve 1299,14 keV değerlerindedir. Ayrıca, yaklaşık 42 keV ile 50 keV arasında çeşitli enerjilerde x-ışınları da yayınlanmaktadır. Gama ve x-ışını piklerinin yanı sıra, $\gamma\text{-}\gamma$ ve $\gamma\text{-x}$ ışını gerçek çakışmalarından kaynaklı oluşan toplam pikler de spektrumda yer almaktadır.



Şekil 6.3. EGS4 kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{152}Eu gama spektrumu. Üstteki spektrum elektron yakalama olayı sonucu yayınlanan gama enerjilerini, alttaki spektrum ise beta bozunması sonucu yayınlanan gama enerjilerini göstermektedir.

Monte Carlo simülasyonu sonucu elde edilen ^{166m}Ho radyonüklidine ait gama enerji spektrumu Şekil 6.4'de gösterilmiştir. ^{166m}Ho farklı yayınlanma olasılıklarında 80,57 keV ile 1562,31 keV enerjileri arasında çok sayıda gama yayınlamaktadır. Yayınlanma olasılıkları en yüksek olan gama enerjilerinden bazıları şunlardır: 80,57 keV, 184,41 keV, 264,98 keV, 365,76 keV, 410,95 keV, 451,54 keV, 594,46 keV, 611,56 keV, 670,51 keV, 711,69 keV, 752,28 keV, 778,84 keV, 810,28 keV, 830,59 keV, 875,65 keV, 950,96 keV, 1241,5 keV, 1400,77 keV, 1427,23 keV (^{166m}Ho bozunma şeması Ek 2'de verilmiştir). Ayrıca ^{166m}Ho bozunma şemasında yer alan 48,2 keV, 49,13 keV, 55,67 keV ve 57,14 keV enerjilerinde x-ışınları ile birlikte γ - γ ve γ -x ışını gerçek çakışmalarından kaynaklı oluşan toplam pikler de spektrumda yer almaktadır.



Şekil 6.4. EGSnrc kodu kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen ^{166m}Ho gama spektrumu.

Deneysel olarak Nal dedektörden elde edilen gama sayım hızı ve Monte Carlo yöntemiyle elde edilen dedektör verimi kullanılarak aktivite bulma yöntemine $4\pi\gamma$ toplam sayım yöntemi denir. Bu yöntemde, bu çalışmada olduğu gibi, geniş hacimli kuyu tipi Nal dedektör kullanılması %100'e yakın toplam gama verimi elde edilmesine olanak sağlar. Kuyu tipi dedektörlerde γ - γ gerçek çakışmaları

oldukça baskın bir hale gelmektedir. Farklı enerjilerde iki gama sayımı, bu enerjilerin toplamı kadar enerjide tek bir gama sayımı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, yapılan Monte Carlo modellemesinde γ - γ gerçek çakışması düzeltilmesinin yapılması önemlidir. Bu çalışmada, EGS4 modellemeleri vasıtasıyla verim değerlerinin belirlenmesinde γ - γ gerçek çakışma düzeltmeleri yapılmıştır. Bu modellemeler sonucu elde edilen toplam verim değerleri ve hesaplanan aktivite değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Aktivite değerinin belirsizliği hesaplanırken verim ve sayım hızı değerlerinin belirsizlikleri hesaba katılmıştır.

Sayım istatistiğinden kaynaklanan belirsizlik hesaplanırken radyoaktif bozunmanın Poisson dağılımına uyma prensibi kullanılmıştır. Yüksek sayım değerlerinde ise Poisson dağılımı Gaussian dağılımına doğru bir yaklaşım göstermektedir. Tek bir ölçümde elde edilen sayım değeri (N) ortalamaya, ortalama da varyansa eşit olacağından ($\sigma^2 = N$), standart sapma, sayım değerinin kareköküne ($\sigma = N^{1/2}$) eşit olacaktır (MacDonald, 2011). Dolayısıyla sayımdan kaynaklı belirsizlik değerleri gama toplam sayım değerinin standart sapması hesaplanarak belirlenmiştir. Bu hesaplama ait açıklama ve formüller Ek 4'te verilmiştir. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitleri için hesaplanan toplam sayım hızı ve belirsizlik değerleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Verim değerinin belirsizliğini hesaplamak için ise hassasiyet yöntemi kullanılmıştır. Yapılan Monte Carlo modellemesinde çeşitli parametreler değiştirilerek her bir değişiklik için yeni bir verim değeri hesaplanmıştır. Değiştirilen bu parametreler, simülasyon yapılan γ ışını sayısı, dedektör – kaynak mesafesi ve dedektör dış alüminyum koruma kalınlığı değerleridir. Özellikle düşük enerjili γ ışınları için alüminyum kalınlığı değeri hassas bir parametredir ve gama verimi üzerinde etkili olabilmektedir. Değiştirilen her bir parametre için yeni bir verim değeri elde edilmiştir ve bu verim değerlerinin standart sapması hesaplanarak verim değerinin belirsizliği olarak alınmıştır. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitleri için hesaplanan verim ve belirsizlik değerleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitleri için Nal dedektörünün EGS4 ile elde edilen toplam verim değerleri, deneysel olarak belirlenen sayım hızları ve hesaplanan aktivite değerleri (aktivite değerinde toplam belirsizlik $k=2$ için hesaplanmıştır).

Radyonüklit	Verim	Net sayım hızı (sayım/s)	Aktivite (Bq)
^{60}Co	$0,954256 \pm 0,000635$	$1158,2 \pm 1,1$	$1213,7 \pm 2,9$
^{133}Ba	$0,963872 \pm 0,00331$	$1005,3 \pm 1,0$	$1042,9 \pm 9,2$
^{152}Eu	$0,920398 \pm 0,002730$	$429,1 \pm 0,6$	$466,3 \pm 3,1$
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	$0,998180 \pm 0,002493$	$1602,2 \pm 1,3$	$1605,4 \pm 8,4$

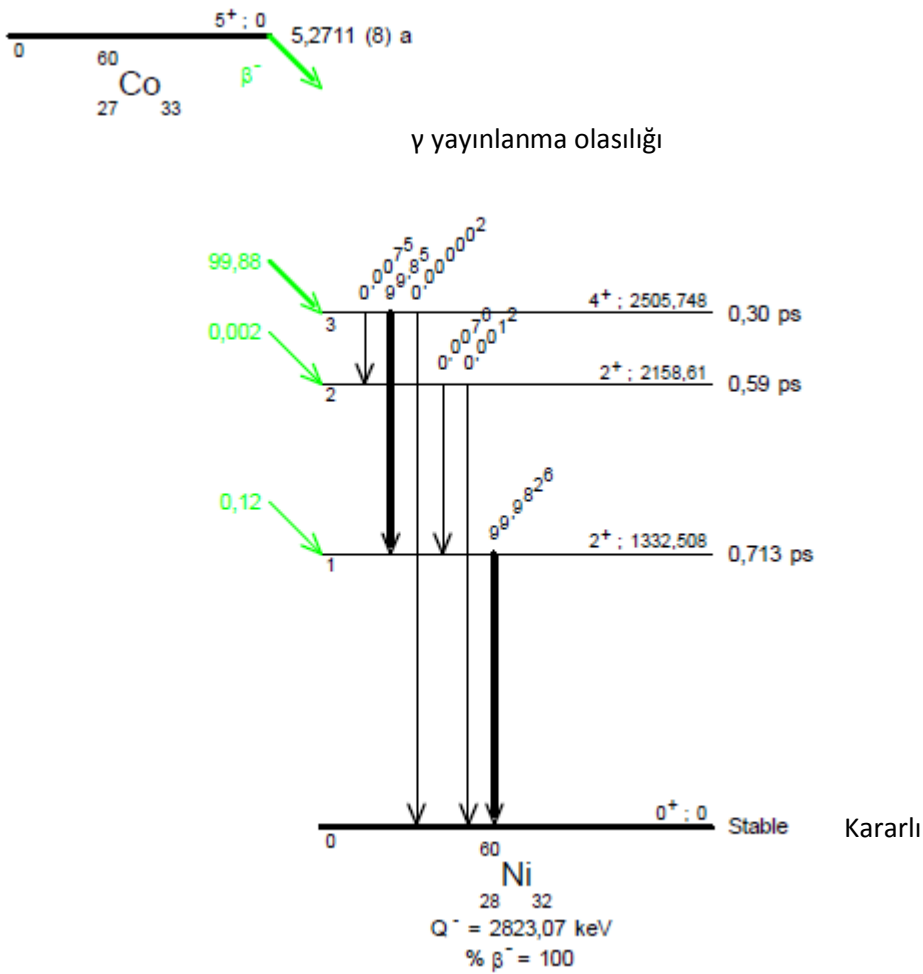
6.2. Çakışmalı Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan veri analizi yazılımının validasyonu için aktivitesi bilinen standart referans kaynaklar kullanılarak $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde ölçümler yapılmıştır. Bu referans kaynaklar ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyoizotoplarını ayrı ayrı içeren sıvı standart çözeltilerdir. Sayım sisteminde ölçümler tamamlandıktan sonra veriler bilgisayar diskinde depolanmıştır ve çakışmalı yöntem için geliştirilen yazılım kullanılarak aktiviteleri hesaplanmıştır.

6.2.1. ^{60}Co Ölçümünün Sonuçları

İlk olarak basit bir bozunma şemasına sahip ^{60}Co radyoizotopunun ölçümü yapılarak hazırlanan kaynağın aktivitesi hesaplanmıştır. ^{60}Co radyoizotopunun bozunma şeması Şekil 6.5'de gösterilmiştir. ^{60}Co çeşitli enerjilerde ve olasılıklarda beta parçacığı yayınlamak ^{60}Ni radyoizotopuna dönüşür. Her beta bozunmasını takiben ^{60}Ni 'in uyarılmış enerji seviyelerinden farklı enerjilerde gama ışınları yayınlanarak ^{60}Ni 'in taban enerji seviyesine geçiş yapılmış olur. Gerçekleşme olasılığı en yüksek olan beta bozunmasında 99,88% yayınlanma olasılığı ile 317 keV maksimum enerjide beta parçacığı yayınlanır ve ^{60}Ni 'in

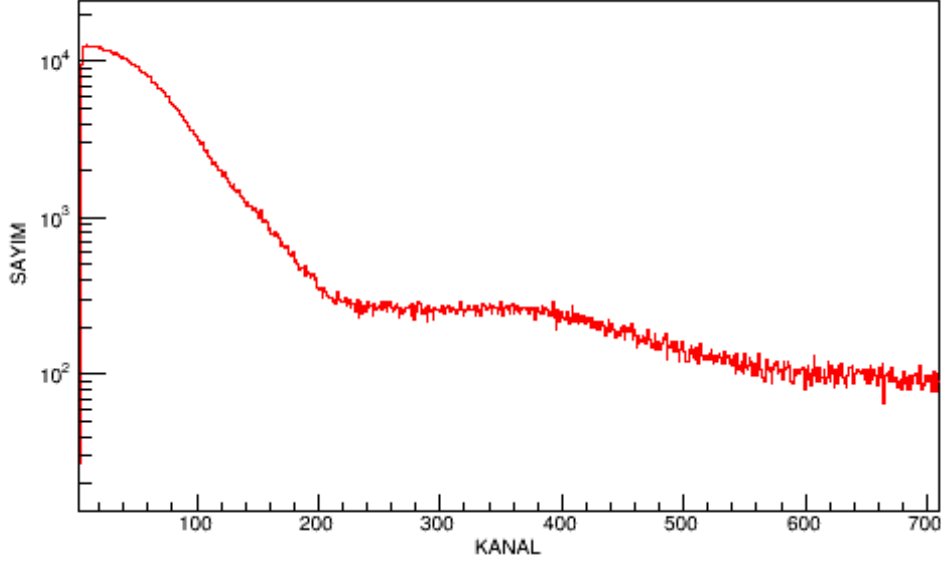
2505,75 keV uyarılmış enerji seviyesine geçiş olur. ^{60}Ni 'in bu uyarılmış seviyesi 99,85% olasılıkla 1173,2 keV enerjiye sahip gama vasıtasıyla 1332,5 keV uyarılmış seviyesine enerjisini salmış olur. Bu seviyeden de %99,98 olasılıkla 1332,5 keV enerjide gama yayınlanarak taban seviyeye geçiş tamamlanır. Bozunma şeması incelendiğinde görülmektedir ki gerçekleşme olasılığı en yüksek olan geçişler 1173,2 keV ve 1332,5 keV enerjilerinde gama salınımlarını içeren geçişlerdir.



Şekil 6.5. ^{60}Co bozunma şeması (Nucleide, 2019).

^{60}Co sıvı standart kaynağının ölçümü sonucunda elde edilen beta enerjisi değerleri 1024 kanal sayısına yerleştirilerek beta enerji spektrumu oluşturulmuştur. Bu beta spektrumu Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Beta parçacıkları

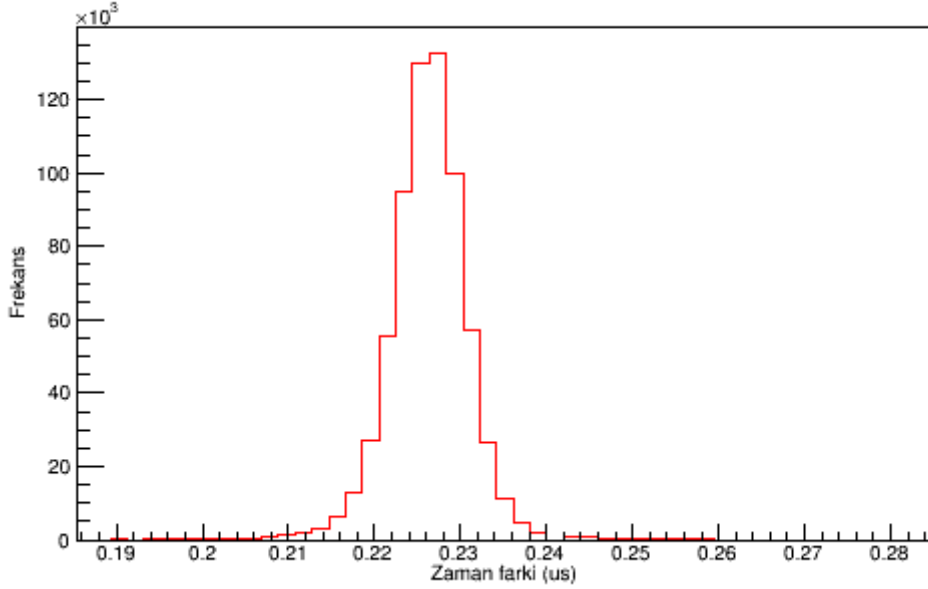
%99,88 olasılıkla 317 keV enerjide, %0,12 olasılıkla da 1490 keV enerjide yayınlanmaktadır.



Şekil 6.6. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ⁶⁰Co beta enerji spektrumu.

Çakışma yapan beta-gama sinyallerinin bulunmasında önemli parametreler olan çakışma zaman aralığı ve beta ile gama sinyalleri arasındaki zaman farkı değerlerini belirlemek için β - γ zaman gecikmesi spektrumuna ihtiyaç vardır. Bu nedenle, her beta sinyali ve onu takip eden gama sinyalinin varış zamanları arasındaki farklar hesaplanmıştır ve bu farkların histogramı çizilerek β - γ zaman gecikmesi spektrumu oluşturulmuştur. Bu spektrum Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Zaman gecikmesi spektrumunda yer alan pikin tepe noktasının eşleştiği zaman farkı değeri beta ve gama sinyalleri arasındaki olasılığı en yüksek olan gecikme değerini vermektedir. Çakışma penceresinin genişliğinin seçimi de β - γ zaman gecikmesi spektrumu kullanılarak belirlenir. Spektrumda elde edilen pikin taban genişliği yaklaşık olarak çakışma penceresinin genişliği olarak alınır. Şekil 6.7’de ki spektrum incelendiğinde beta ve gama sinyalleri arasındaki gecikme farkı 228 ns olarak bulunur. Dolayısıyla çakışan beta-gama sinyallerini bulmadan önce her beta sinyaline 228 ns gecikme uygulanması gerekmektedir.

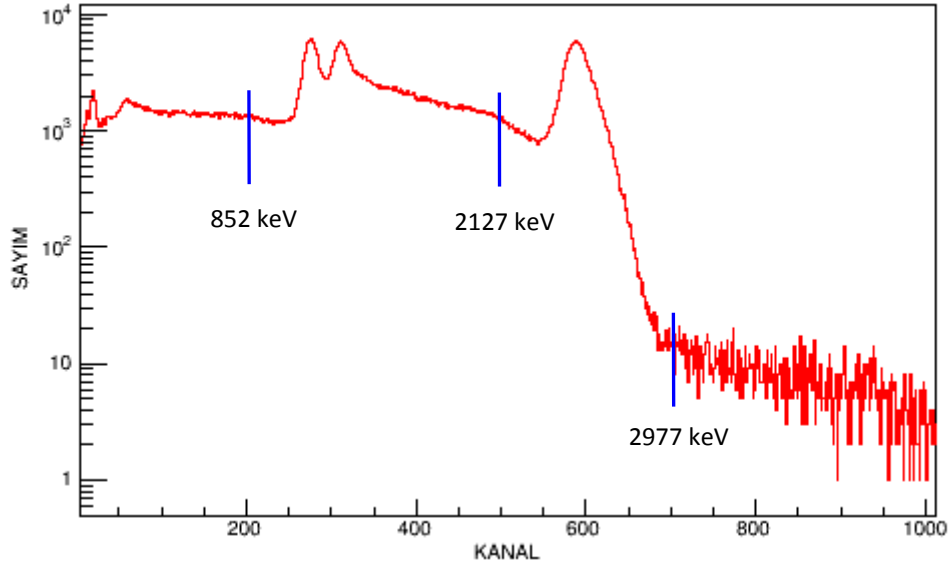
Çakışma penceresinin genişliği ise pikin taban genişliği olan yaklaşık 34 ns değerine eşit olmaktadır.



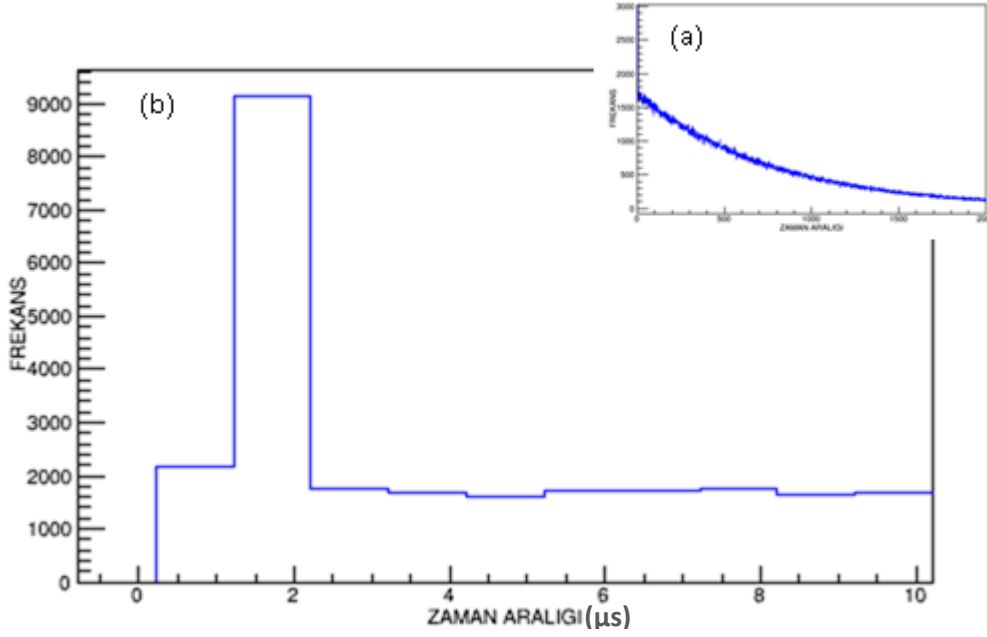
Şekil 6.7. ^{60}Co ölçümü sonucunda elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.

^{60}Co radyonüklitine ait gama enerji spektrumu ve hesaplamalar için seçilen enerji aralıkları Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Bu spektrum $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde yapılan ^{60}Co sıvı standart kaynağının ölçümü sonucunda elde edilen enerji değerleri, enerji histogramı modülünde 1024 kanal sayısına yerleştirilerek oluşturulmuştur.

Aktivite hesabı yaparken, verim dışıdeğerleme yönteminde gama enerjisi için pencere seçimi önceki bölümlerde açıklanmıştır. ^{60}Co analizi iki farklı enerji penceresi seçilmiştir. Bunlar, ana pikler olan 1173,2 keV ve 1332,5 keV piklerinin ikisini de aynı anda içeren bir enerji aralığı (852 keV – 2127 keV) ve 1173,2 keV, 1332,5 keV ve bu iki pikin toplamı olan 2505,7 keV piklerinin tümünü içeren geniş bir enerji aralığıdır (852 keV – 2977 keV).



Şekil 6.8. ^{60}Co gama enerji spektrumu. Mavi çizgiler arasında kalan bölgeler hesaplama yapmak için seçilen gama enerji aralıklarını göstermektedir.



Şekil 6.9. ^{60}Co ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.

^{60}Co kaynağının ölçümü sonucu elde edilen gama sinyalleri arasındaki zaman aralığı değerlerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 6.8'de verilmiştir. Şekil 6.9 (a)'da tüm zaman aralığı değerleri için elde edilen üstel davranış gösterilirken, Şekil 6.9 (b)'de ise zaman aralığının sadece sıfıra yakın olduğu bölge büyütülmüş olarak gösterilmiştir. Zaman aralığı değerinin sıfıra yakın olan bölgesi incelendiğinde, en küçük zaman aralığı değerinin sıfırdan değil de yaklaşık olarak $0,4 \mu\text{s}$ 'den başladığı görülmektedir. Bu davranış ölçüm sisteminde yaklaşık $0,4 \mu\text{s}$ değerinde ölü zaman olduğunu ifade etmektedir.

Ölçüm sonuçlarının analizi ve aktivite değerinin belirlenmesi için farklı ölü zaman değerleri kullanılmıştır. Farklı ölü zaman değerlerinin kullanılmasındaki amaç, geliştirilmiş olan analiz programlarının bu değerlere olan tepkisini belirlemek ve ölü zaman değerlerinin aktivite üzerine etkisini incelemektir. Programın ölü zaman uygulamasının ve düzeltilmesinin doğru ve kararlı çalışması durumunda yaklaşık $5 \mu\text{s}$ ile $100 \mu\text{s}$ arasında uygulanan herhangi bir ölü zaman değeri için yaklaşık aynı aktivite değerini vermesi beklenir (Nedjati,

2019). ^{60}Co aktivite hesabı için 5, 10, 30, 50, 100, 200 ve 400 μs ölü zaman değerleri uygulanmıştır ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ölü zaman:5 μs

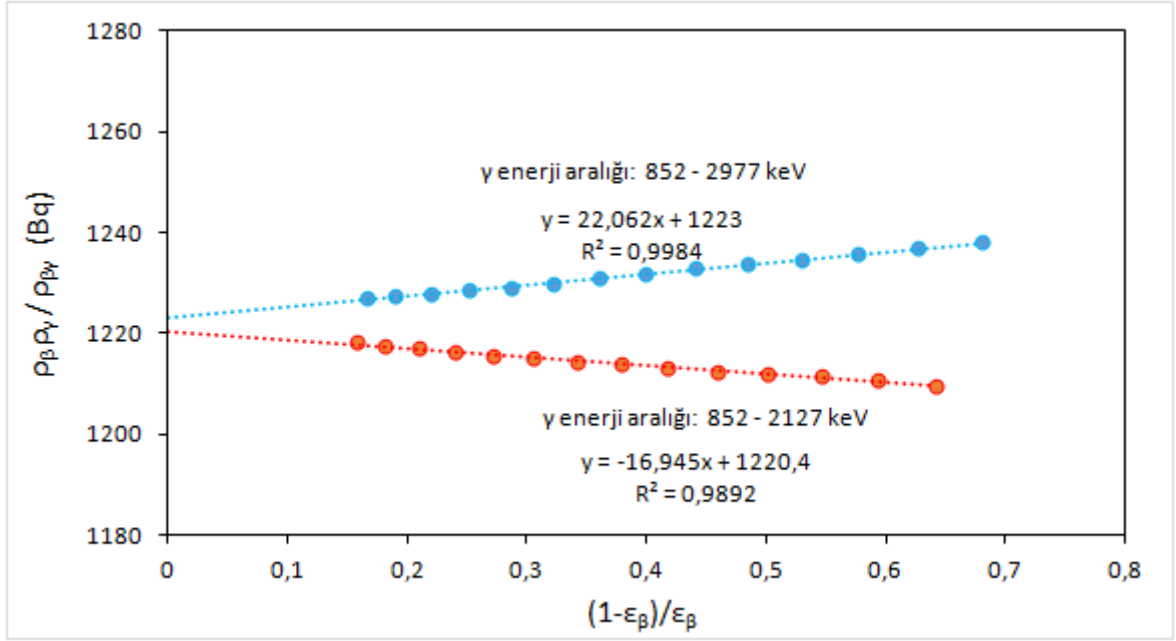
Ölçüm yapılarak elde edilen verilere geliştirilen yazılımın yapay ölü zaman modülünde 5 μs uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Çakışma yapan beta-gama sinyallerini belirlemek için beta sinyallerine 228 ns gecikme uygulanmış ve çakışma penceresi 34 ns olarak seçilmiştir. Ölü zaman uygulaması yapılmadan önce enerji filtreleme modülünde iki farklı gama enerji aralığı belirlenmiştir. Her bir gama enerji aralığında ya da penceresinde verim dışı değerlendirme yöntemi için beta enerjileri, farklı enerji alt limit değerleri kullanılarak filtrelenmiştir. Seçilen enerji penceresindeki gama sinyallerine ve beta sinyallerinin her filtrelenmesinde 5 μs ölü zaman uygulanmıştır. Her beta enerjisi filtreleme değeri için bir beta verimi ve bir aktivite değeri hesaplanmıştır. Her gama enerjisi aralığı için beta enerjisi alt limit filtreleme değerleri (beta enerji diskriminasyonu), beta verimleri (ϵ_β), $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerleri Çizelge 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. ^{60}Co aktivite hesabı için 5 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman=5 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,863403	0,158207	1218,22	4
0,846398	0,181477	1217,6	6
0,826406	0,210058	1216,98	8
0,806012	0,240676	1216,27	10
0,785777	0,272625	1215,54	12
0,765453	0,306415	1215,0	14
0,745078	0,34214	1214,34	16
0,724964	0,379378	1213,8	18
0,704942	0,418556	1213,13	20
0,685261	0,459297	1212,23	22
0,666014	0,501469	1211,86	24
0,646723	0,546257	1211,46	26
0,627586	0,593407	1210,73	28
0,608896	0,642316	1209,66	30

Çizelge 6.4. ^{60}Co aktivite hesabı için 5 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,857237	0,166539	1226,99	4
0,839614	0,191023	1227,43	6
0,819044	0,220936	1227,92	8
0,798002	0,253130	1228,48	10
0,777122	0,286799	1229,08	12
0,756142	0,322503	1229,96	14
0,735021	0,360505	1230,96	16
0,714318	0,399937	1231,89	18
0,693662	0,441624	1232,86	20
0,673356	0,485099	1233,67	22
0,653691	0,529775	1234,7	24
0,634004	0,577277	1235,76	26
0,614271	0,627946	1236,97	28
0,594884	0,681000	1238,15	30



Şekil 6.10. 5 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ⁶⁰Co verim dışıdeğerleme fonksiyonları.

İki farklı enerji aralığı için $(1-\epsilon_{\beta})/\epsilon_{\beta}$ değerlerine karşılık $\rho_{\beta}\rho_{\gamma}/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafikleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Her bir gama enerji aralığında verim dışıdeğerleme yöntemi uygulanmıştır. 852 keV – 2127 keV enerji aralığında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu ($\epsilon_{\beta} = 1$ olduğu, $(1-\epsilon_{\beta})/\epsilon_{\beta} = 0$) noktada aktivite değeri 1220,4 Bq olarak hesaplanmıştır. 852 keV – 2977 keV aralığında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1223,0 Bq olarak hesaplanmıştır. İki gama enerji penceresi için hesaplanan aktivite değerleri birbirlerinden yaklaşık %0,2 bir göreceli farkla ayrılmaktadır. Dolayısıyla, aktivite değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları, seçilen enerji pencereslerinin uygun olduğu ve hesaplanan aktivite değerlerinin ise doğruluk derecelerinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Enerji penceresi seçimleri yapılırken, her pencerede ⁶⁰Co spektrumunda görülen üç ana pikten en az ikisinin bulunmasına dikkat edildiğinden, farklı pencereler için yakın aktivite değerlerinin bulunması beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. İki farklı enerji penceresinde hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması alındığında aktivite değeri 1221,7 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 10 μ s

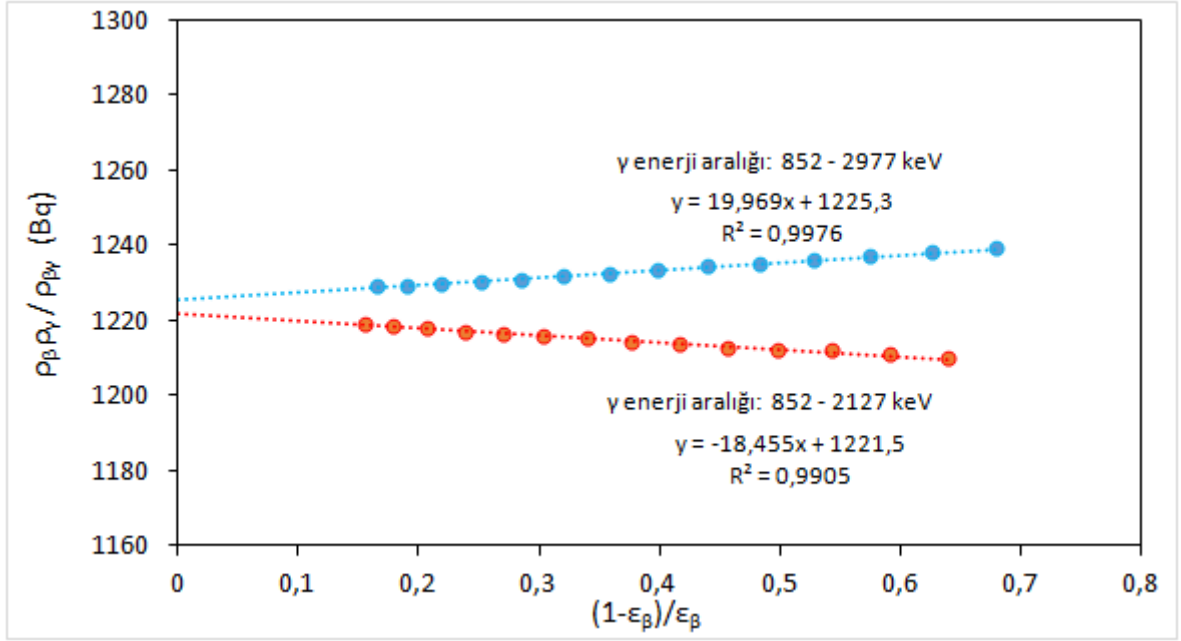
Ölçüm yapılarak elde edilen verilere 10 μ s uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Çakışma yapan beta-gama sinyallerini belirlemek için beta sinyallerine 228 ns gecikme uygulanmıştır ve çakışma penceresi 34 ns olarak seçilmiştir. Her gama enerjisi aralığı için beta enerji diskriminasyonu değerleri, beta verimleri ve aktivite değerleri Çizelge 6.5 ve 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5. ^{60}Co aktivite hesabı için 10 μ s ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μ s			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,864983	0,156092	1219,12	4
0,847911	0,179369	1218,47	6
0,827838	0,207966	1217,81	8
0,807392	0,238556	1217,05	10
0,787091	0,270501	1216,25	12
0,766699	0,304293	1215,65	14
0,746252	0,340030	1214,94	16
0,726082	0,377255	1214,35	18
0,705994	0,416443	1213,64	20
0,686256	0,457182	1212,67	22
0,666954	0,499354	1212,24	24
0,647615	0,544127	1211,79	26
0,628450	0,591216	1210,96	28
0,609720	0,640097	1209,83	30

Çizelge 6.6. ^{60}Co aktivite hesabı için 10 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,858085	0,165386	1228,92	4
0,840425	0,189874	1229,32	6
0,819818	0,219783	1229,73	8
0,798756	0,251947	1230,21	10
0,777837	0,285616	1230,72	12
0,756838	0,321287	1231,49	14
0,735675	0,359296	1232,41	16
0,714946	0,398707	1233,27	18
0,694253	0,440397	1234,17	20
0,673913	0,483871	1234,88	22
0,654228	0,528519	1235,82	24
0,634514	0,576009	1236,81	26
0,614765	0,626638	1237,92	28
0,595355	0,679670	1239,02	30



Şekil 6.11. 10 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Seçilen enerji aralıkları için $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_\beta$ değerlerinin grafikleri Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Verim dışadeğerleme yöntemi sonucunda, 852 keV – 2127 keV enerji aralığında doğrusal fit sonucu beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1221,5 Bq olarak hesaplanmıştır. 852 keV – 2977 keV aralığında doğrusal fit yapıldığında ise beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1225,3 Bq olarak hesaplanmıştır. İki gama enerji penceresi için bulunan aktivite değerleri birbirlerinden yaklaşık %0,3 kadar bir göreceli farkla ayrılmaktadır. İki pencere göz önünde bulundurularak ortalama aktivite değeri 1223,4 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 30 µs

İki farklı gama enerji aralığında 30 µs uzamayan ölü zaman uygulanması sonucunda elde edilen beta verimi ve düzeltilmiş beta, gama ve çakışma sayım hızları Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8'de verilmiştir.

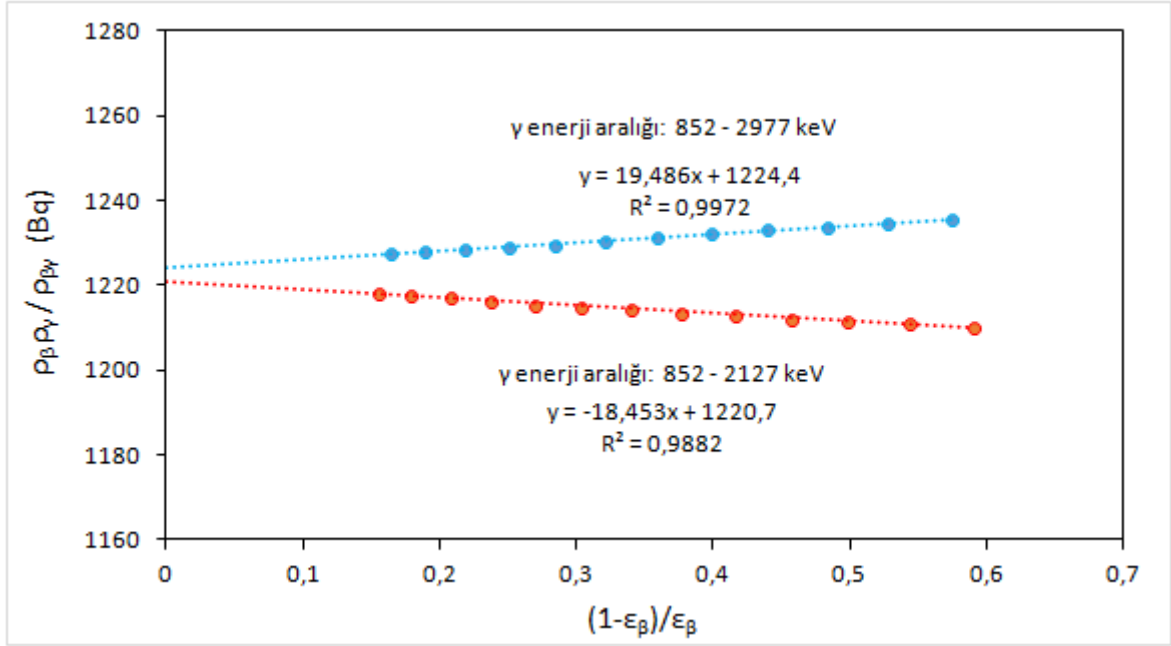
Verim dışadeğerleme yöntemi ile $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_c$ değerlerinin dağılımı ve bu dağılımlara uygulanan fit fonksiyonları Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7. ^{60}Co aktivite hesabı için 30 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,865710	0,155121	1218,34	4
0,848656	0,178334	1217,67	6
0,828556	0,206919	1217	8
0,808068	0,237520	1216,26	10
0,787703	0,269514	1215,52	12
0,767267	0,303327	1214,93	14
0,746776	0,339090	1214,2	16
0,726585	0,376301	1213,61	18
0,706447	0,415534	1212,89	20
0,686718	0,456202	1211,9	22
0,667382	0,498392	1211,5	24
0,648025	0,543150	1211,05	26
0,628832	0,590250	1210,26	28

Çizelge 6.8. ^{60}Co aktivite hesabı için 30 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,859049	0,164078	1227,79	4
0,841413	0,188477	1228,15	6
0,820739	0,218414	1228,6	8
0,799638	0,250566	1229,08	10
0,778649	0,284276	1229,65	12
0,757596	0,319965	1230,44	14
0,736390	0,357976	1231,32	16
0,715627	0,397376	1232,2	18
0,694888	0,439081	1233,04	20
0,674584	0,482395	1233,7	22
0,654881	0,526995	1234,62	24
0,635133	0,574473	1235,63	26



Şekil 6.12. 30 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ⁶⁰Co verim dışıdeğerleme fonksiyonları.

852 keV – 2127 keV ve 852 keV – 2977 keV enerji aralıklarında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri, sırasıyla, 1220,7 Bq ve 1224,4 Bq olarak hesaplanmıştır. İki aktivite değerleri birbirlerinden %0,3 göreceli farkla ayrılmaktadır. İki farklı enerji penceresinde hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması alındığında aktivite değeri 1222,6 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 50 µs

İki farklı gama enerji aralığında 50 µs uzamayan ölü zaman uygulanması sonucunda elde edilen beta verimi ve düzeltilmiş beta, gama ve çakışma sayım hızları Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10'da verilmiştir.

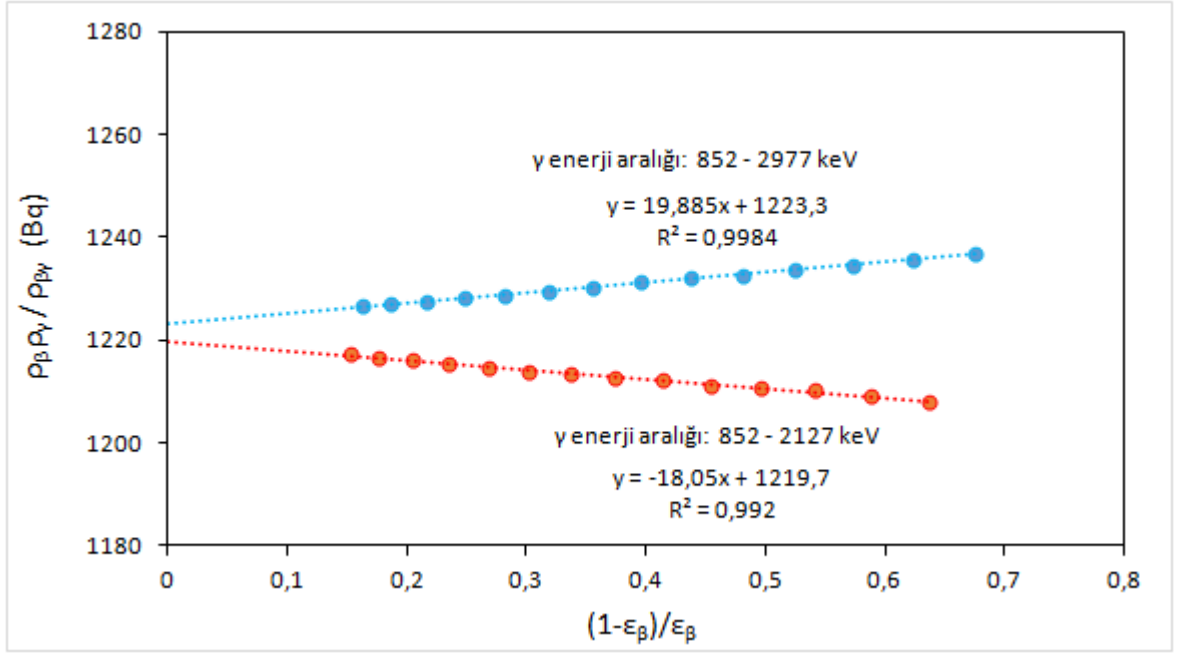
Verim dışıdeğerleme yöntemi ile $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin dağılımı ve bu dağılımlara uygulanan fit fonksiyonları Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. ^{60}Co aktivite hesabı için 50 μs ölü zaman değeri için 852 - 2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 50 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,866505	0,154061	1217,38	4
0,849476	0,177196	1216,69	6
0,829368	0,205737	1216,03	8
0,808845	0,236331	1215,31	10
0,788433	0,268339	1214,6	12
0,767955	0,302160	1214,05	14
0,747396	0,337979	1213,32	16
0,727161	0,375211	1212,8	18
0,707020	0,414387	1212,11	20
0,687239	0,455098	1211,1	22
0,667865	0,497309	1210,7	24
0,648481	0,542065	1210,26	26
0,629318	0,589022	1209,38	28
0,610636	0,637637	1208,16	30

Çizelge 6.10. ^{60}Co aktivite hesabı için 50 μs ölü zaman değeri için 852 - 2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 50 μs			
çakışma penceresi = 34 ns			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,859900	0,162926	1226,73	4
0,842259	0,187283	1227,11	6
0,821567	0,217186	1227,57	8
0,800417	0,249349	1228,11	10
0,779407	0,283027	1228,67	12
0,758317	0,318710	1229,48	14
0,737054	0,356753	1230,34	16
0,716273	0,396116	1231,24	18
0,695544	0,437724	1232,11	20
0,675191	0,481062	1232,71	22
0,655469	0,525625	1233,6	24
0,635687	0,573101	1234,62	26
0,615909	0,623616	1235,71	28
0,596466	0,676541	1236,86	30



Şekil 6.13. 50 μ s ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{60}Co verim dışadeğerleme fonksiyonları.

852 keV – 2127 keV ve 852 keV – 2977 keV enerji aralıklarında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri, sırasıyla, 1219,7 Bq ve 1223,3 Bq olarak hesaplanmıştır. İki aktivite değerleri birbirlerinden %0,3 göreceli farkla ayrılmaktadır. İki farklı enerji penceresinde hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması alındığında aktivite değeri 1221,5 Bq olarak hesaplanmıştır.

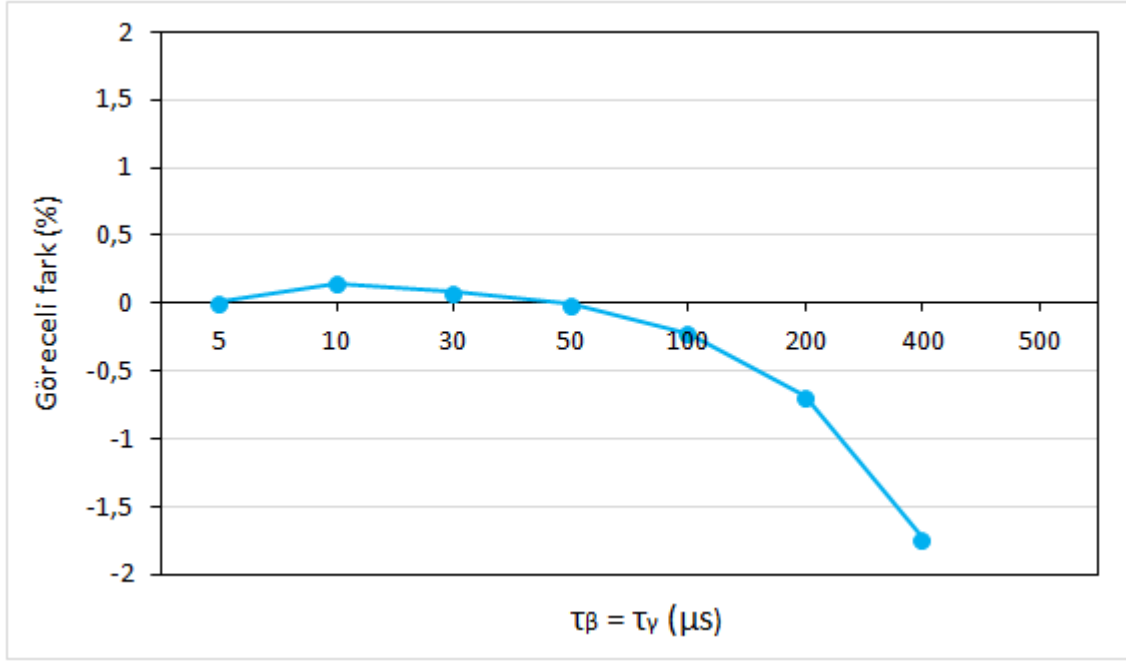
Yukarıda yer alan hesaplamalara ek olarak, 852 keV – 2127 keV ve 852 keV – 2977 keV enerji aralıklarında 100 μ s, 200 μ s ve 400 μ s uzamayan ölü zaman değerleri için aktivite hesaplamaları yapılmıştır. Çizelge 6.11’de uygulanan ölü zaman değeri, bulunan aktivite değeri ve bu değerlerin ortalaması referans alınarak bulunan göreceli farklar verilmiştir.

Çizelge 6.11. 5, 10, 30, 50, 100, 200 ve 400 µs uzamayan ölü zaman değerleri için hesaplanan ⁶⁰Co aktivite değerleri.

Ölü zaman (µs)	Aktivite (Bq)	Göreceli fark (%)
5	1221,7	0,007
10	1223,4	0,145
30	1222,6	0,080
50	1221,5	-0,010
100	1218,9	-0,223
200	1213,2	-0,689
400	1200,4	-1,737
Ortalama	1221,6	

Veri analizi için geliştirilen yazılımın farklı ölü zaman değerlerinin uygulanmasında göstereceği tepki incelenmiştir. Yukarıdaki tabloda da görüleceği üzere 5 -100 µs arasındaki ölü zaman değerleri için bulunan aktivite değerleri birbirlerine oldukça yakındır. 200 µs için aktivite değeri ortalama değerden biraz uzaklaşmasına rağmen yine de ortalama değer ile aralarında sadece 0.689% göreceli fark bulunması oldukça kabul edilebilir bir değer olarak değerlendirilmektedir. 400 µs ölü zaman değeri uygulandığında bulunan aktivite değerinin ortalama aktivite değeri ile arasında %1,7 göreceli fark bulunmaktadır. 5, 10, 30, 50 ve 100 µs ölü zaman değerleri göz önüne alındığında ⁶⁰Co aktivitesi ortalama 1221,6 Bq olarak hesaplanmıştır.

Uygulanan ölü zaman değerine karşılık göreceli fark davranışı Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Uygulanan uzamayan ölü zaman değerine karşılık hesaplanan ^{60}Co aktivite değerlerinin değişimi.

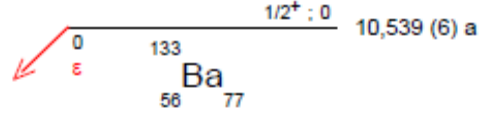
Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, dijital çakışma yönteminde, yapay olarak uygulanan ölü zaman değeri sinyal kayıplarına yol açar gözlemlenen sayım hızlarında azalma olur. Uygun düzeltme formülleri kullanılarak beta, gama ve çakışma kanallarının her biri için ölü zaman düzeltmesi yapılmış gerçek sayım hızları hesaplanır. İdeal durumda, uygulanan ölü zaman değerinden bağımsız olarak aynı veya yakın aktivite değerlerinin elde edilmesi beklenir. Bu çalışmada, ^{60}Co ölçümü için 100 μs , hatta 200 μs ölü zaman değerine kadar birbirine çok yakın aktivite değerlerinin bulunuyor olması yazılımda bir kararsızlık olmadığını gösteren bir durumdur. 200 μs 'nin üstündeki değerlerde ortalama değerden sapmanın büyümesinin, çakışma kanalı için düzeltme formülü olarak kullanılan Cox-Isham-Smith formülünden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. ICRU'nun 52 numaralı raporunda (ICRU, 1994) ve Keightly'nin yaptığı tez çalışmasında (Keightly, 2008), Cox-Isham-Smith düzeltme formülünün, kaynağın bozunma oranı (sayım hızı) ve uygulanan ölü zaman değerlerinin çarpımının 1'e doğru yaklaştığı durumlarda ($\rho\tau \rightarrow 1$) yeterli doğrulukta düzeltme yapamadığı ve gerçek değerden sapmanın arttığı ortaya

konulmuştur. Bu çalışmada ortaya koyulan ve Şekil 6.14'te gösterilen sonuç da bu yaklaşımı doğrulamaktadır.

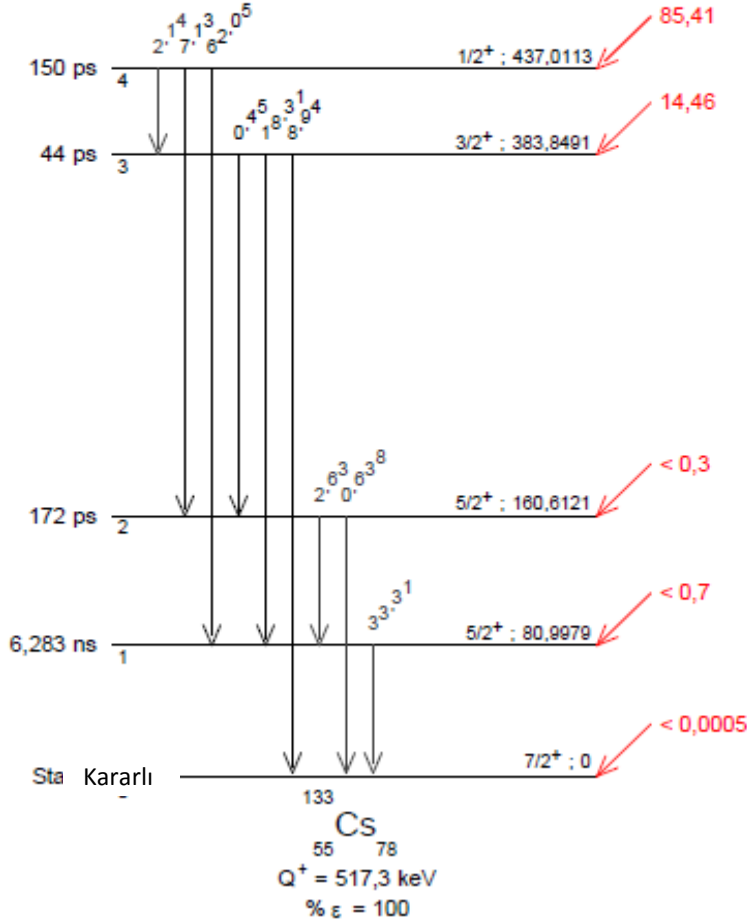
6.2.2. ¹³³Ba Ölçümünün Sonuçları

Ölçüm sisteminin ve geliştirilen çakışma sayım sistemi yazılımının kontrolü ve validasyonu için ikinci ölçüm ¹³³Ba radyoizotopu kullanılarak yapılmıştır. ⁶⁰Co radyoizotopuna göre biraz daha karmaşık bir bozunma şemasına sahip olan ¹³³Ba elektron yakalama yoluyla ¹³³Cs radyoizotopunun uyarılmış enerji seviyelerine bozunur. Bu uyarılmış seviyelerden bazıları da gama ışınları yayarak fazla enerjilerini atarlar ve nihayetinde taban seviyesine inerler. ¹³³Ba radyoizotopuna ait bozunma şeması Şekil 6.15'te gösterilmiştir.

¹³³Ba radyoizotopu elektron yakalama olayı sonucunda ¹³³Cs radyoizotopuna dönüşür (Şekil 6.15). Elektron yakalanmasını takiben ¹³³Cs'ün uyarılmış enerji seviyelerinden farklı enerjilerde gama ışınları yayınlanarak ¹³³Cs'ün taban enerji seviyesine geçiş yapılmış olur. Elektron yakalama sonucu %85,41 olasılıkla ¹³³Cs'ün 437,01 keV uyarılmış enerji seviyesine, %14,46 olasılıkla da 383,85 keV uyarılmış enerji seviyesine bozunma gerçekleşir. 80,99 keV ve 160,61 keV uyarılmış seviyelere olan bozunma olasılığı oldukça düşüktür. 437,01 keV uyarılmış seviye %62,05 olasılıkla 356,01 keV enerjili gama salarak 80,99 keV uyarılmış seviyesine geçiş olur. Bu seviyeden de %33,31 olasılıkla 80,99 keV enerjili foton salınımı ile taban seviyeye ulaşım tamamlanmış olur. Yine 437,01 keV uyarılmış seviye %7,13 olasılıkla 276,39 keV enerjili gama salarak 160,61 keV uyarılmış seviyesine geçiş olur. Bu seviyeden de düşük yayınlanma olasılıkları ile taban seviyeye geçişler olur. 383,85 keV uyarılmış seviye %8,94 olasılıkla 383,85 keV enerjide gama salınımı yaparak taban seviyeye geçiş tamamlanırken, %18,31 olasılıkla 302,85 keV enerjili gama salınımı yaparak 80,99 keV seviyesine, oradan da taban seviyesine geçişler olur. Dolayısıyla, gerçekleşme olasılığı en yüksek olan geçişler 383,85 keV, 356,85 keV, 302,85 keV, 276,39 keV ve 80,99 keV enerjilerinde gama salınımlarını içeren geçişlerdir.

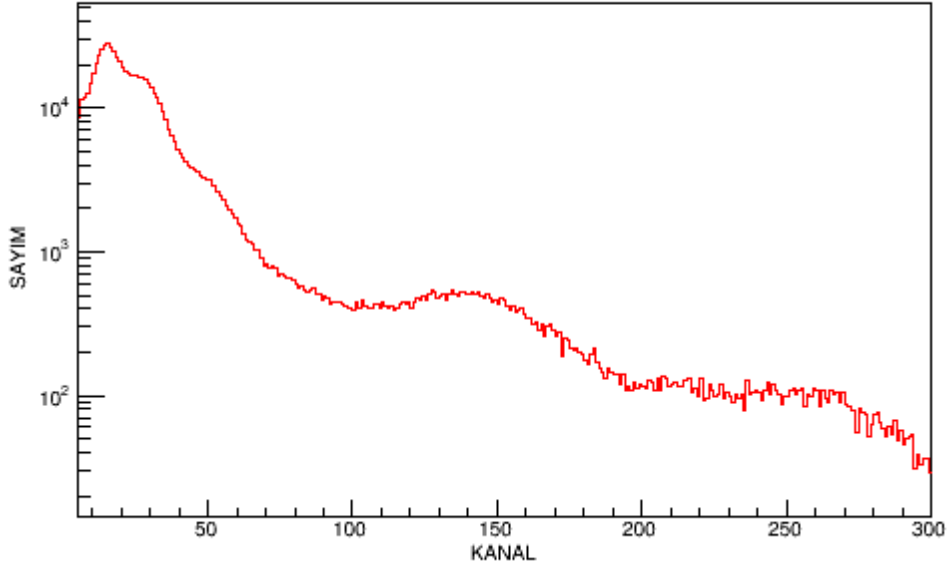


γ yayınlama olasılığı



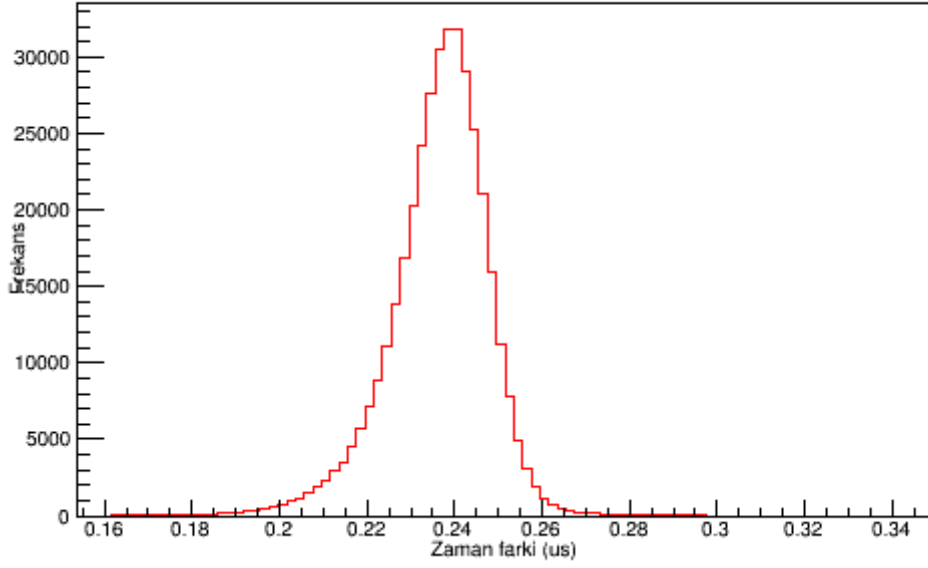
Şekil 6.15. ^{133}Ba bozunma şeması (Nucleide, 2019).

^{133}Ba radyoizotopunun elektron yakalaması olayı sonucu yayınlanan iç dönüşüm elektronlarının ve Auger elektronlarının enerji dağılımını gösteren spektrum Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Bu spektrum, aktivitesi 1061,2 Bq olan ^{133}Ba sıvı standart kaynağının ölçümü sonucunda elde edilen enerji değerleri 1024 kanal sayısına yerleştirilerek oluşturulmuştur.



Şekil 6.16. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{133}Ba elektron enerjisi spektrumu.

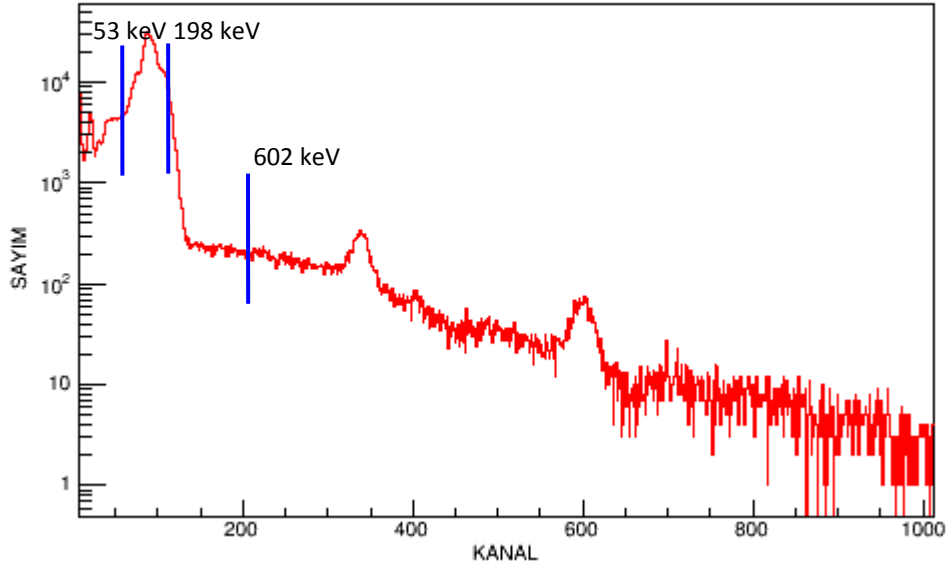
Şekil 6.17'de verilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu incelendiğinde beta ve gama sinyalleri arasındaki gecikme farkı 240 ns olarak bulunur. Dolayısıyla çakışan beta-gama sinyallerini bulmadan önce her beta sinyaline 240 ns gecikme uygulanması gerekmektedir. Çakışma penceresinin genişliği ise pikin taban genişliği olan yaklaşık 90 ns değerine eşit olmaktadır.



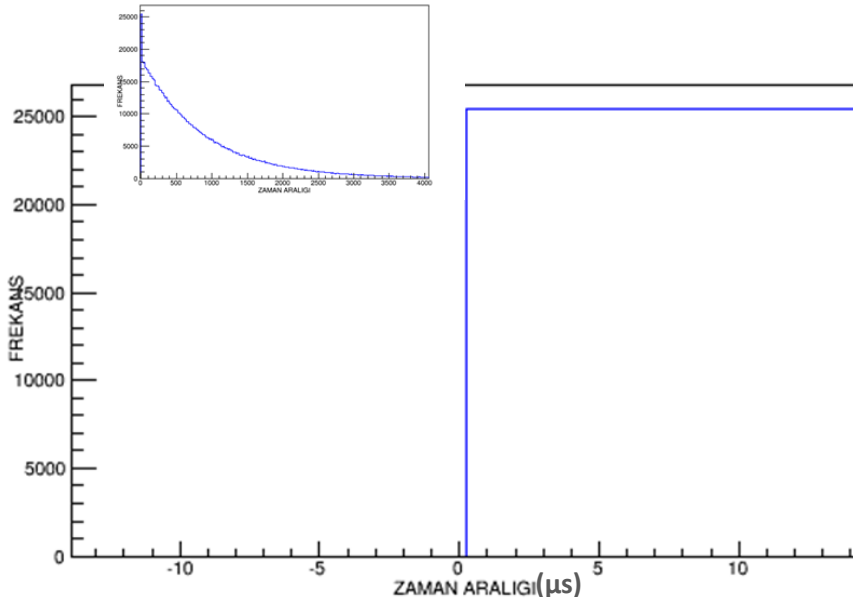
Şekil 6.17. ^{133}Ba ölçümüne ait beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.

^{133}Ba radyonüklitine ait gama enerji spektrumu Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Bu spektrum $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde yapılan ^{133}Ba sıvı standart kaynağının ölçümü sonucunda elde edilen enerji değerleri 1024 kanal sayısına yerleştirilerek oluşturulmuştur.

^{133}Ba ölçüm sonucunun analizi iki farklı enerji penceresi seçilmiştir. İlk enerji penceresi 276,39 keV, 302,85 keV, 356,01 keV ve 383,85 keV piklerini içeren bir enerji aralığı (198 keV – 602 keV) olarak seçilmiştir. İkinci pencere ise yukarıdaki piklere ek olarak 80,99 keV pikini de içine alan (53 keV – 602 keV) aralığı olarak seçilmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. ^{133}Ba gama enerji spektrumu. Mavi çizgilerin arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarıdır.



Şekil 6.19. ^{133}Ba ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.

¹³³Ba kaynağının ölçümü sonucu elde edilen gama sinyalleri arasındaki zaman aralığı değerlerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekil 6.19 (b)'de zaman aralığı değerinin sifıra yakın olan bölgesi incelendiğinde, en küçük zaman aralığı değerinin yaklaşık olarak 0,3 µs'den başladığı görülmektedir. Bu davranış ölçüm sisteminde yaklaşık 0,3 µs değerinde ölü zaman olduğunu ifade etmektedir.

¹³³Ba aktivitesi, uygulanan iki farklı ölü zaman değeri için hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonuçları aşağıda detaylandırılmıştır.

Ölü zaman: 10 µs

53 – 602 keV ve 198 – 602 keV gama enerji aralıklarında, her bir beta enerji diskriminasyonu için elde edilen ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerleri Çizelge 6.12 ve 6.13'de verilmiştir. Hesaplamalarda, beta sinyallerine 240 ns gecikme uygulanmıştır ve çakışma penceresi 90 ns olarak alınmıştır.

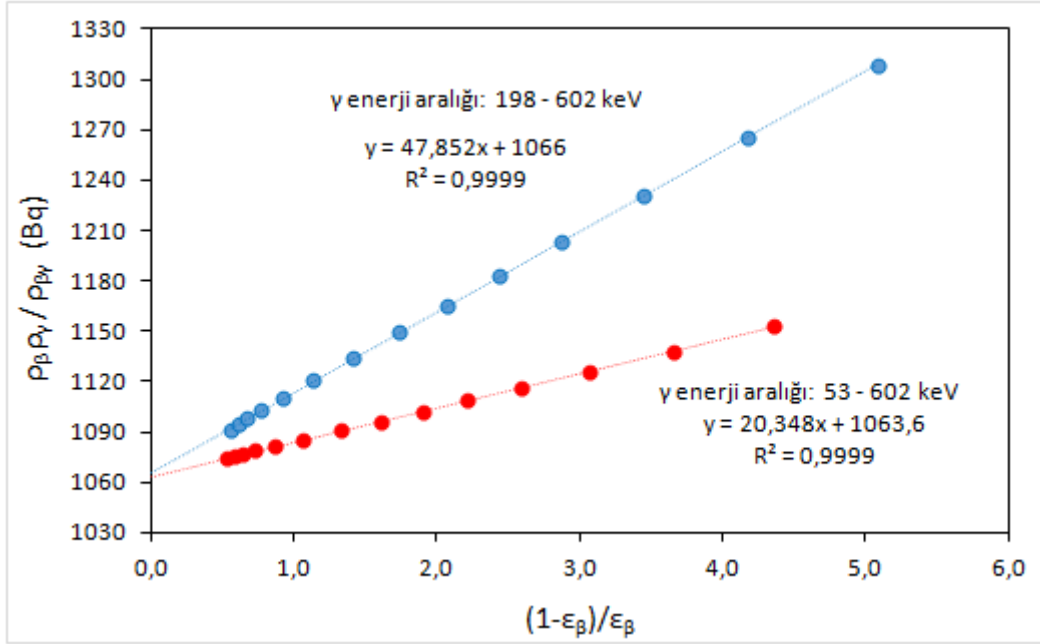
Çizelge 6.12. ¹³³Ba aktivite hesaplamasında 10 µs ölü zaman değeri için 53 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman=10 µs			
çakışma penceresi = 90 ns			
gama enerji aralığı = 53 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,650393	0,537532	1074,08	4
0,631559	0,583383	1075,44	6
0,607873	0,64508	1076,93	8
0,576877	0,733472	1078,85	10
0,534619	0,870491	1081,68	12
0,482742	1,0715	1085,62	14
0,429796	1,326685	1090,74	16

0,383718	1,606081	1096,21	18
0,344589	1,902008	1102,28	20
0,310545	2,220145	1108,66	22
0,278276	2,593555	1116,07	24
0,245863	3,067306	1125,91	26
0,214687	3,657944	1137,99	28
0,186507	4,361729	1152,75	30

Çizelge 6.13. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 198 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman=10 μs			
çakışma penceresi = 90 ns			
gama enerji aralığı = 198 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,63993	0,562671	1091,64	4
0,620542	0,611494	1094,53	6
0,596185	0,677332	1098,05	8
0,564345	0,771966	1102,81	10
0,520873	0,919854	1110,22	12
0,467608	1,138543	1120,75	14
0,413293	1,419591	1134,3	16
0,365969	1,732472	1149,37	18
0,325847	2,068925	1165,68	20
0,29098	2,436662	1183,2	22
0,257973	2,876375	1203,91	24
0,224804	3,448319	1231,38	26
0,193061	4,17971	1265,47	28
0,164303	5,086316	1308,54	30



Şekil 6.20. 10 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Verim dışadeğerleme yönteminde $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında (Şekil 6.20), 53 keV – 602 keV gama enerji aralığında 1063,6 Bq, 198 keV – 602 keV aralığında 1066,0 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1064,8 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 30 µs

53 – 602 keV ve 198 – 602 keV gama enerji aralıklarında, her bir beta enerji diskriminasyonu için elde edilen ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerleri Çizelge 6.14 ve 6.15'de verilmiştir.

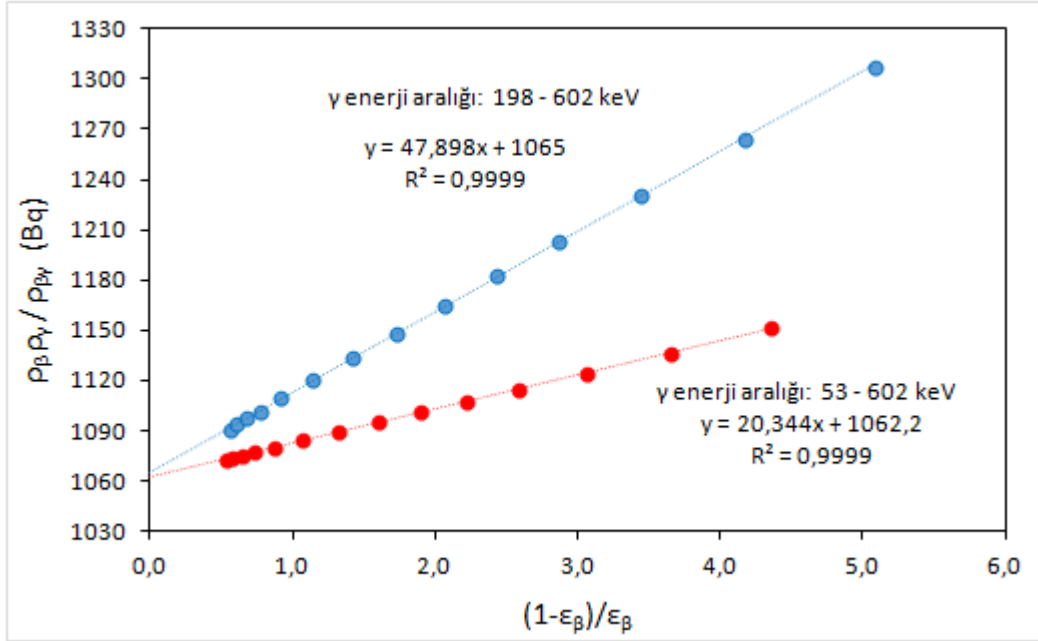
Çizelge 6.14. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 53 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman=30 μs			
çakışma penceresi = 90 ns			
gama enerji aralığı = 53 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,65113	0,535792	1072,56	4
0,6323	0,581528	1073,93	6
0,608586	0,643153	1075,47	8
0,577598	0,731308	1077,29	10
0,535322	0,868035	1080,14	12
0,483369	1,068813	1084,11	14
0,43043	1,323258	1089,19	16
0,38428	1,602269	1094,73	18
0,345105	1,897669	1100,75	20
0,311032	2,215103	1106,99	22
0,278704	2,588036	1114,48	24
0,24626	3,060749	1124,26	26
0,215022	3,650687	1136,37	28
0,186765	4,354322	1151,14	30

Çizelge 6.15. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 198 - 602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman=30 μs			
çakışma penceresi = 90 ns			
gama enerji aralığı = 198 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,640314	0,561734	1090,68	4
0,620935	0,610475	1093,59	6
0,596577	0,67623	1097,12	8
0,564778	0,770607	1101,74	10
0,52131	0,918244	1109,17	12
0,467962	1,136926	1119,8	14
0,413679	1,417333	1133,3	16
0,366311	1,729921	1148,43	18
0,326122	2,066337	1164,82	20
0,291245	2,433535	1182,2	22
0,258199	2,872982	1202,99	24
0,225013	3,444188	1230,42	26
0,193237	4,174992	1264,48	28
0,164421	5,081948	1307,58	30

Verim dışdeğerleme yönteminde $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında (Şekil 6.21), 53 keV – 602 keV gama enerji aralığında 1062,2 Bq, 198 keV – 602 keV aralığında 1065,0 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1063,6 Bq olarak hesaplanmıştır.

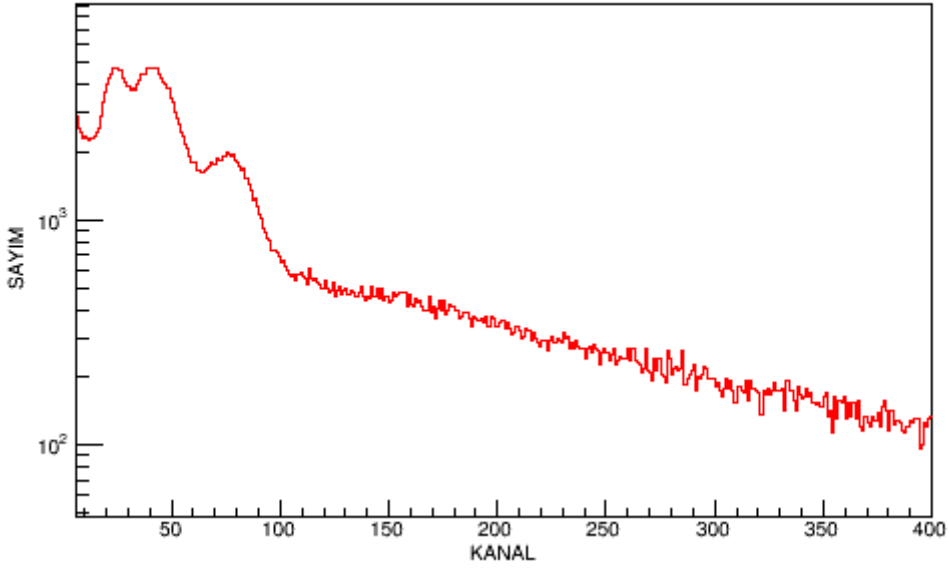


Şekil 6.21. 30 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ¹³³Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.

10 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 1065 Bq aktivite değeri ile 30 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 1062,2 Bq aktivite değeri arasında yaklaşık %0,3 bir göreceli fark vardır. Nihai aktivite değeri bu değerlerden biri olarak alınabilir ya da her iki değer aritmetik ortalaması olarak (1063,6 Bq) alınabilir.

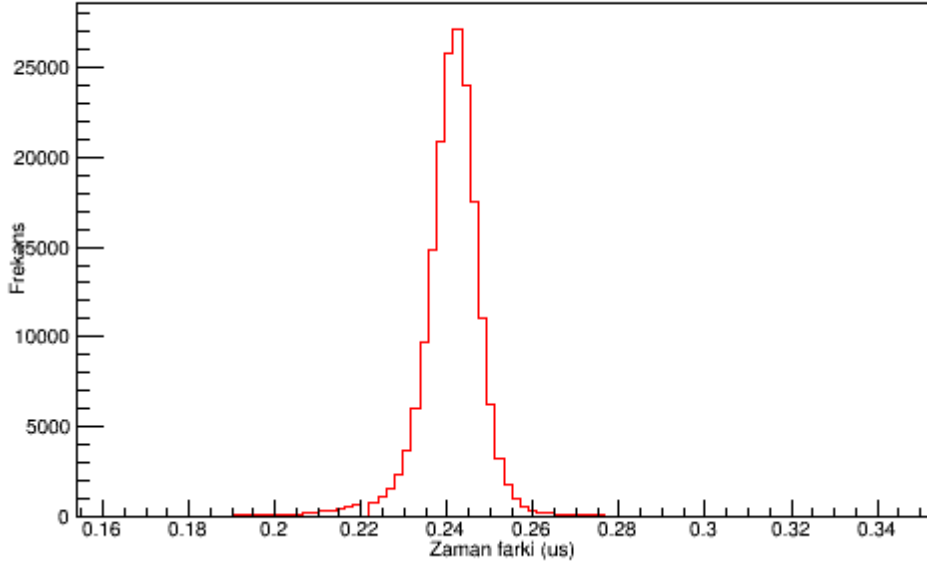
6.2.3. ¹⁵²Eu Ölçümünün Sonuçları

¹⁵²Eu'un beta bozunması sonucu yayınlanan beta parçacıklarının ve elektron yakalama olayı sonucu yayınlanan iç dönüşüm ve Auger elektronlarının enerji spektrumu Şekil 6.22'de verilmiştir. En yüksek olasılıklarla yayınlanan beta enerjileri 384,9 keV (%2,43), 695,7 keV (%13,7) ve 1474,6 keV (%8,24) değerlerindedir. İç dönüşüm elektronlarının enerjileri en yüksek olasılıkla 74,9 keV, 114,0 keV ve 120,1 keV değerlerinde iken Auger elektronların enerjileri 35 keV ile 50 keV arasındadır. Spektrumdaki yayvan ve sürekli dağılım beta parçacıklarının enerjileri dağılımıyken, yayvan dağılımın üzerinde ortaya çıkan ayırık çıkıntılar elektronların enerjileridir.



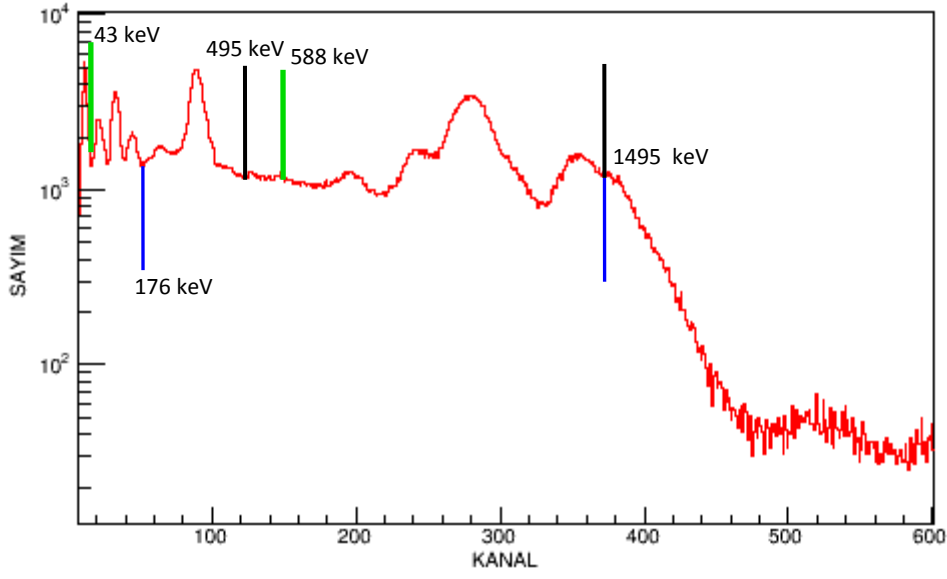
Şekil 6.22. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{152}Eu için beta ve elektron enerjisi spektrumu.

Beta ve gama sinyalleri arasındaki zaman farklarını gösteren zaman gecikmesi spektrumu Şekil 6.23'te verilmiştir. Bu zaman gecikmesi spektrumu incelendiğinde beta ve gama sinyalleri arasındaki gecikme farkı 240 ns olarak bulunur. Dolayısıyla çakışan beta-gama sinyallerini bulmadan önce her beta sinyaline 240 ns gecikme uygulanması gerekmektedir. Çakışma penceresinin genişliği ise pikin taban genişliği olan yaklaşık 60 ns değerine eşit olmaktadır.

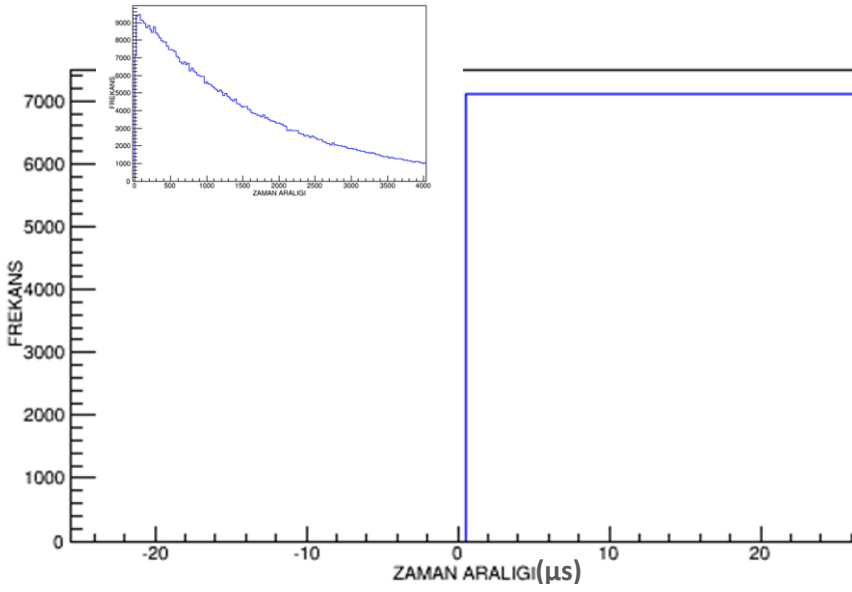


Şekil 6.23. ^{152}Eu ölçümünde elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.

^{152}Eu radyonüklidine ait gama enerji spektrumu ve analizlerde seçilen enerji aralıkları Şekil 6.24'te gösterilmiştir. ^{152}Eu ölçüm sonucunun analizi üç farklı gama enerji penceresi seçilmiştir. İlk enerji penceresi 43 keV – 588 keV aralığıdır. Bu aralık 121,78 keV, 244,69 keV ve 344,28 keV pikleri içermektedir. İkinci enerji penceresi 176 keV – 1495 keV aralığıdır. Bu aralık 244,69 keV, 344,28 keV, 778,90 keV, 867,38 keV, 964,08 keV, 1085,84 keV, 1112,08 keV ve 1408,01 keV piklerini içermektedir. Son enerji penceresi ise 495 keV – 1495 keV aralığıdır. Bu aralık 778,90 keV, 867,38 keV, 964,08 keV, 1085,84 keV, 1112,08 keV ve 1408,01 keV piklerini içermektedir. Ölçüm, enerji çözünürlüğü düşük Nal dedektörü ile yapıldığından çok sayıda gama enerjisi pikine sahip olan ^{152}Eu spektrumunda pik ayrımı yapmak oldukça zordur. O yüzden, seçilen enerji aralıkları çok sayıda pik içermektedir.



Şekil 6.24. ^{152}Eu gama enerji spektrumu. Renkli çizgiler arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarını gösterir.



Şekil 6.25. ^{152}Eu ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sifıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.

¹⁵²Eu kaynağının ölçümü sonucu elde edilen gama sinyalleri arasındaki zaman aralığı değerlerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 6.25'te verilmiştir. Şekil 6.25 (b)'de zaman aralığı değerinin sıfıra yakın olan bölgesi incelendiğinde, en küçük zaman aralığı değerinin yaklaşık olarak 0,3 µs'den başladığı görülmektedir. Bu davranış ölçüm sisteminde yaklaşık 0,3 µs değerinde ölü zaman olduğunu ifade etmektedir.

¹⁵²Eu aktivitesi, uygulanan iki farklı ölü zaman değeri için hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonuçları aşağıda detaylandırılmıştır.

Ölü zaman: 5 µs

Belirlenen gama enerji aralıklarında ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerleri, sırasıyla Çizelge 6.16, 6.17 ve 6.18'de verilmiştir. Hesaplamalarda, beta sinyallerine 240 ns gecikme uygulanmıştır ve çakışma penceresi 60 ns olarak alınmıştır.

Çizelge 6.16. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 43 - 588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

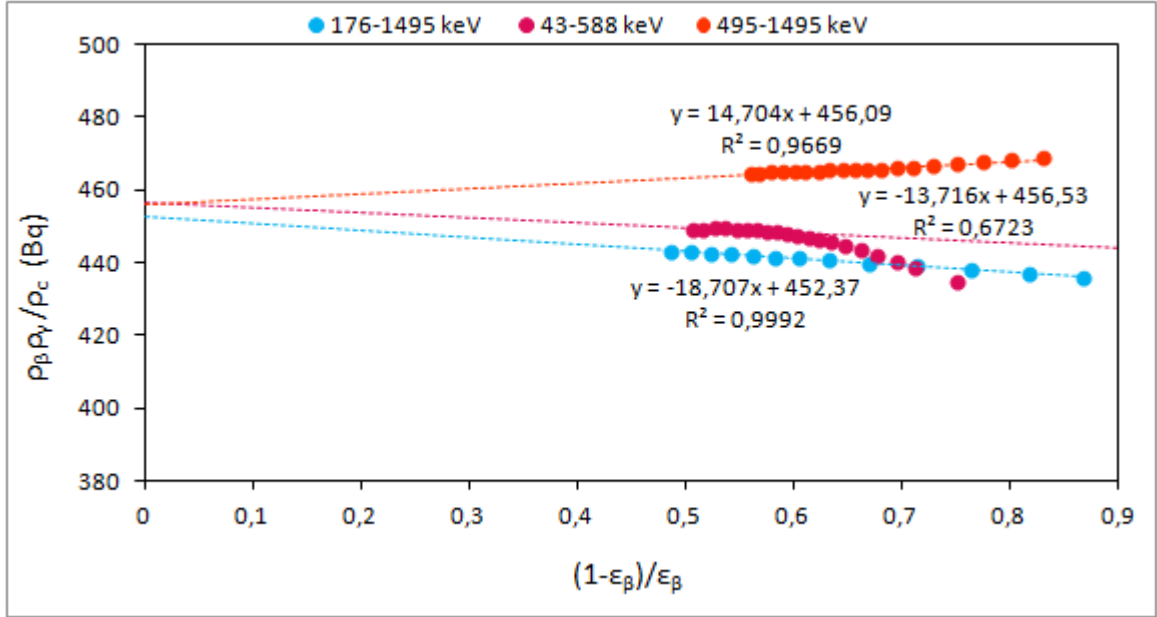
ölü zaman = 5 μs			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 43 keV - 588 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,66333	0,50755	449,18	4
0,65948	0,51636	449,26	5
0,65475	0,52731	449,40	6
0,65054	0,53718	449,37	7
0,64643	0,54696	449,32	8
0,64251	0,55641	449,21	9
0,63868	0,56574	448,94	10
0,63476	0,57540	448,76	11
0,63117	0,58436	448,36	12
0,62750	0,59362	447,93	13
0,62354	0,60375	447,67	14
0,61974	0,61357	447,13	15
0,61576	0,62402	446,54	16
0,61151	0,63529	445,73	17
0,60673	0,64819	444,67	18
0,60155	0,66237	443,40	19
0,59602	0,67780	441,93	20
0,59000	0,69492	440,39	21
0,58389	0,71264	438,60	22
0,57085	0,75179	434,75	24

Çizelge 6.17. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 176 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 176 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,67239	0,48724	443,12	4
0,66441	0,50511	442,87	6
0,65626	0,52378	442,59	8
0,64829	0,54252	442,28	10
0,64038	0,56158	441,92	12
0,63221	0,58175	441,53	14
0,62335	0,60424	441,10	16
0,61241	0,63290	440,54	18
0,59877	0,67009	439,90	20
0,58326	0,71451	439,08	22
0,56661	0,76487	438,00	24
0,55012	0,81779	437,00	26
0,53520	0,86847	436,12	28

Çizelge 6.18. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 495 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 495 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,64117	0,55966	464,70	4
0,63755	0,56851	464,71	5
0,63308	0,57959	464,78	6
0,62890	0,59008	464,84	7
0,62471	0,60075	464,94	8
0,62067	0,61117	465,02	9
0,61636	0,62243	465,20	10
0,61217	0,63352	465,32	11
0,60797	0,64481	465,47	12
0,60366	0,65657	465,63	13
0,59937	0,66841	465,72	14
0,59486	0,68107	465,84	15
0,59001	0,69488	466,03	16
0,58456	0,71068	466,28	17
0,57821	0,72949	466,60	18
0,57106	0,75113	467,07	19
0,56328	0,77532	467,62	20
0,55502	0,80173	468,15	21
0,54637	0,83025	468,72	22



Şekil 6.26. 5 µs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ¹⁵²Eu verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Verim dışadeğerleme yönteminde elde edilen fit fonksiyonları Şekil 6.26'da gösterilmiştir. 43 keV – 588 keV gama enerjisi aralığı için $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{c\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde, $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerinin yaklaşık 0,6'nın üstüne çıktığı durumlarda doğrusallıktan sapmalar meydana gelmektedir ve noktaların tümüne doğrusal bir dışadeğerleme uygulamak mümkün olmamaktadır. Bu enerji aralığında, verim dışadeğerleme yönteminde doğrusallıktan sapma olmasının sebebi 122 keV gama enerji pikinin çalışma aralığında yer almasıdır. 122 keV enerji geçişinde dönüşüm elektronlarının oranı oldukça fazladır. Hem 122 keV gama enerjisi için gama dedektör veriminin düşük olması hem de 122 keV enerjili gama ışınlarının düşük enerjili ve düşük beta verimli Auger elektronları ile çakışma yapması, bu enerji aralığında fit doğrusunun doğrusallıktan sapmasına neden olmuştur. Bu durumda uygulanabilecek iki yol vardır: Birincisi 122 keV enerji pikini gama enerji aralığının dışında tutmaktır. İkinci yol ise, eğer 122 keV piki enerji aralığında bulunuyorsa verim dışadeğerleme yönteminde verilerden sadece doğrusal pike uyanları kullanarak fit yapmaktır. Bu yüzden, yalnızca sapmanın meydana geldiği noktaya kadar olan verilere doğrusal bir fit yapıldığında 456,53 Bq aktivite değeri bulunmuştur. 176 keV – 1495 keV gama enerji aralığında ise yine

doğrusal bir fit yapıldığında 452,37 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. 495 keV – 1495 keV enerji aralığında ise doğrusal fit sonucu 456,09 Bq aktivite değeri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 454,9 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 30 μ s

43 – 588 keV, 176 – 1495 keV ve 495 – 1495 keV gama enerji aralıklarında, her bir beta enerji diskriminasyonu için elde edilen ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerleri, sırasıyla Çizelge 6.19, 6.20 ve 6.21’de verilmiştir.

Çizelge 6.19. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μ s ölü zaman değeri için 43 - 588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μ s			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 43 keV - 588 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,66548	0,50267	448,02	4
0,66165	0,51138	448,08	5
0,65695	0,52219	448,19	6
0,65271	0,53209	448,19	7
0,64856	0,54187	448,14	8
0,64464	0,55124	448,03	9
0,64079	0,56057	447,76	10
0,63688	0,57015	447,56	11
0,63331	0,57900	447,14	12
0,62963	0,58823	446,70	13
0,62562	0,59841	446,44	14
0,62181	0,60820	445,91	15
0,61782	0,61860	445,31	16
0,61354	0,62990	444,51	17

0,60871	0,64282	443,47	18
0,60348	0,65706	442,24	19
0,59787	0,67262	440,81	20
0,59175	0,68991	439,33	21
0,58559	0,70768	437,56	22
0,57877	0,72780	435,87	23
0,57244	0,74690	433,76	24
0,56597	0,76687	431,85	25
0,55956	0,78712	429,81	26
0,55359	0,80639	427,99	27
0,54772	0,82576	426,31	28
0,54210	0,84469	424,64	29
0,53675	0,86305	422,78	30

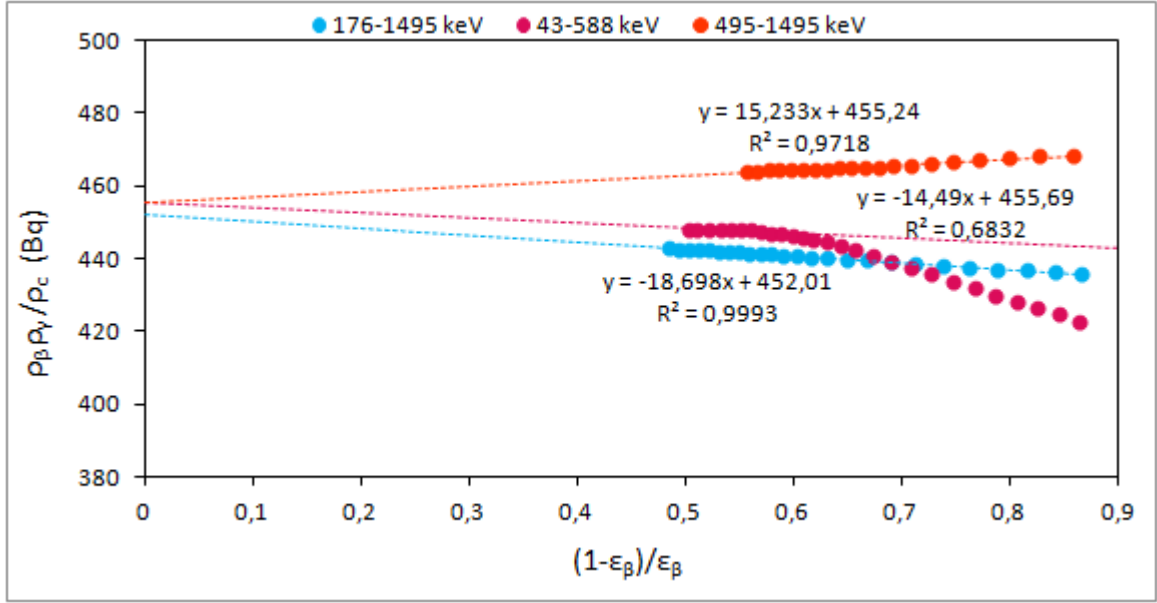
Çizelge 6.20. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 176 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 176 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,67331	0,48521	442,82	4
0,66975	0,49309	442,66	5
0,66530	0,50307	442,57	6
0,66122	0,51236	442,42	7
0,65716	0,52169	442,28	8
0,65325	0,53080	442,12	9
0,64918	0,54040	441,98	10
0,64523	0,54983	441,77	11

0,64126	0,55943	441,60	12
0,63719	0,56940	441,40	13
0,63306	0,57964	441,20	14
0,62877	0,59041	440,98	15
0,62416	0,60215	440,78	16
0,61913	0,61517	440,50	17
0,61320	0,63078	440,23	18
0,60661	0,64850	439,95	19
0,59952	0,66799	439,59	20
0,59194	0,68936	439,19	21
0,58397	0,71242	438,78	22
0,57564	0,73721	438,24	23
0,56729	0,76277	437,70	24
0,55905	0,78874	437,19	25
0,55072	0,81582	436,71	26
0,54315	0,84110	436,22	27
0,53575	0,86653	435,83	28

Çizelge 6.21. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 495 - 1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 60 ns			
gama enerji aralığı = 495 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,64238	0,55672	464,14	4
0,63873	0,56560	464,16	5
0,63424	0,57670	464,24	6
0,63006	0,58715	464,30	7
0,62588	0,59776	464,39	8
0,62183	0,60815	464,46	9
0,61753	0,61935	464,63	10
0,61335	0,63039	464,73	11
0,60912	0,64171	464,90	12
0,60479	0,65348	465,05	13
0,60046	0,66538	465,15	14
0,59594	0,67801	465,27	15
0,59107	0,69185	465,46	16
0,58559	0,70767	465,72	17
0,57922	0,72646	466,05	18
0,57204	0,74813	466,54	19
0,56424	0,77230	467,08	20
0,55599	0,79860	467,59	21
0,54732	0,82709	468,16	22
0,53834	0,85755	468,60	23



Şekil 6.27. 30 µs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ¹⁵²Eu verim dışadeğerleme fonksiyonları.

30 µs ölü zaman uygulaması için verim dışadeğerleme yönteminde elde edilen fit fonksiyonları Şekil 6.27'de gösterilmiştir. 43 keV – 588 keV gama enerjisi aralığı için $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{c\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde, 10 µs için elde edilen değerlerde olduğu gibi $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerinin yaklaşık 0,6'nın üstüne çıktığı durumlarda doğrusallıktan sapmalar meydana gelmektedir ve noktaların tümüne doğrusal bir dışadeğerleme uygulamak mümkün olmamaktadır. Bu yüzden yalnızca sapmanın meydana geldiği noktaya kadar olan verilere doğrusal bir fit yapıldığında 455,69 Bq aktivite değeri bulunmuştur. 176 keV – 1495 keV gama enerji aralığında ise yine doğrusal bir fit yapıldığında 452,01 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. 495 keV – 1495 keV enerji aralığında ise doğrusal fit sonucu 455,24 Bq aktivite değeri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 454,3 Bq olarak hesaplanmıştır.

10 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 454,9 Bq aktivite değeri ile 30 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 454,3 Bq aktivite değeri arasında yaklaşık %0,13 bir göreceli fark vardır. Nihai aktivite değeri bu değerlerden biri olarak alınabilir.

6.2.4. ^{166m}Ho Ölçümünün Sonuçları

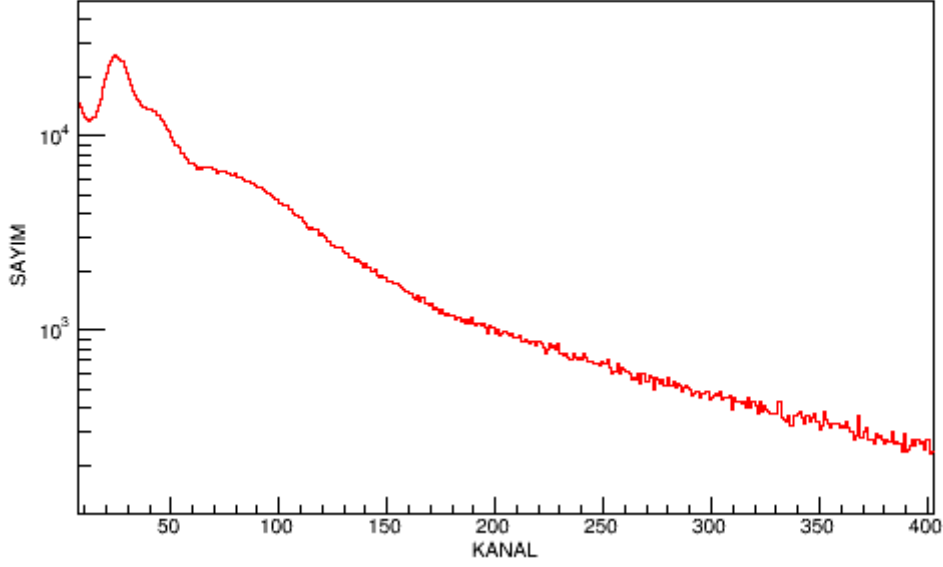
Ölçüm sisteminin ve geliştirilen çakışma sayım sistemi yazılımının kontrolü ve validasyonu için bir diğer ölçüm ^{166m}Ho radyoizotopu kullanılarak yapılmıştır. ^{133}Ba radyoizotopuna göre daha karmaşık bir bozunma şemasına sahip olan ^{166m}Ho beta bozunması yaparak ^{166}Er radyoizotopunun uyarılmış enerji seviyelerine bozunur. ^{166m}Ho radyoizotopuna ait bozunma şeması Ek 2'de verilmiştir.

Ek 2'de verilen bozunma şemasına göre beta bozunması %74,8 olasılıkla ^{166}Er 'nin 1786,96 keV uyarılmış enerji seviyesine, %17,2 olasılıkla da 1827,55 keV uyarılmış enerji seviyesine bozunma gerçekleşir. Diğer uyarılmış seviyelere olan bozunma olasılığı oldukça düşüktür. 1786,96 keV uyarılmış seviyeden %11,45 olasılıkla 410,95 keV enerjili gama salınmasıyla 1376,01 keV uyarılmış seviyesine geçiş olur. 1376,01 keV seviyesinden de %9,72 olasılıkla 830,56 keV enerjili gama salınımı ile 545,45 keV uyarılmış seviyeye geçiş yapılmış olur. Bu uyarılmış seviyeden de çeşitli yayınlanma olasılıklarıyla farklı enerjilerde gama salınimleri ile taban seviyeye geçişler tamamlanır. Bu geçişlerin ayrıntısı Ek.2'de verilen bozunma şemasında gösterilmiştir. Ana geçiş dallarından bir diğeri de yine 1786,96 keV uyarılmış seviyenin %54,9 olasılıkla 711,69 keV enerjili gama salınımı olarak 1075,27 keV uyarılmış seviyesine geçişin olmasıdır. 1075,27 keV uyarılmış seviye %57,3 olasılıkla 810,29 keV enerjide gama salınımı yaparak 264,98 keV seviyesine ulaşılır. Bu seviyeden de %72,5 olasılıkla 184,41 keV enerjili gama salınımı vasıtasıyla 80,57 keV seviyesine, oradan da %12,66 olasılıkla taban seviyesine geçiş tamamlanmış olur.

Bir diğer ana geçiş mekanizması ise 1827,55 keV seviyesinin %12,2 olasılıkla 752,28 keV enerjide gama salınımıyla başlar. Bu gama salınımı sonucunda 1075,27 keV seviyesine geçiş yapılmış olur. Bu seviyeden taban seviyesine kadar olan geçişler yukarıdaki paragrafta anlatılmıştır.

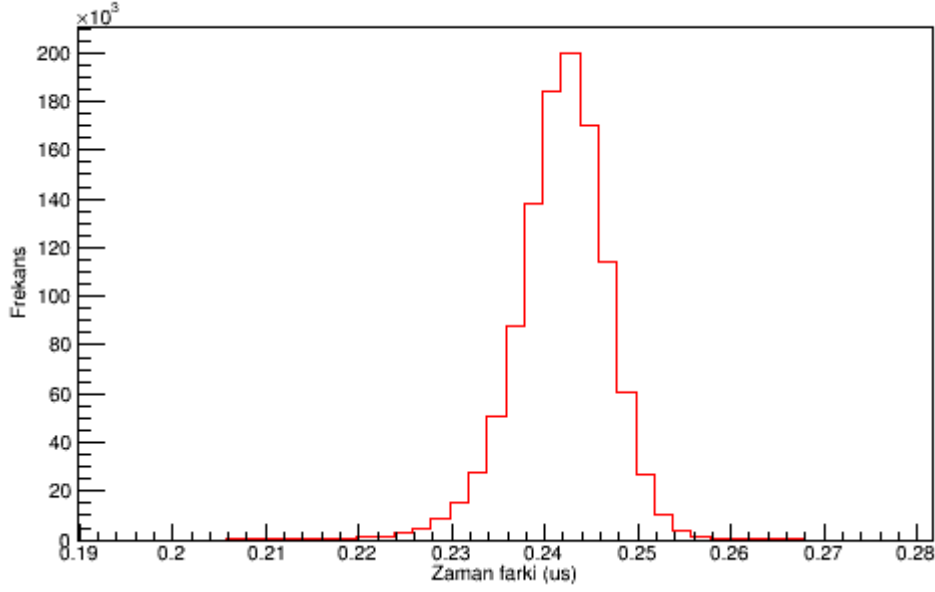
Dolayısıyla, gerçekleşme olasılığı en yüksek olan gama geçişleri, bir başka deyişle yayınlanma olasılığı en yüksek olan ana pikler 80,57 keV, 184,41 keV, 264,98 keV, 410,95 keV, 711,69 keV, 752,28 keV ve 810,28 keV pikleridir.

^{166m}Ho 'un beta bozunması sonucu yayınlanan beta parçacıklarının enerji spektrumu Şekil 6.28'de verilmiştir. En yüksek olasılıklarla yayınlanan beta enerjileri 73,5 keV (%74,8), 32,9 keV (%17,2), 644,5 keV (%2,3) ve 1315,1 keV (%3,4) değerlerindedir.



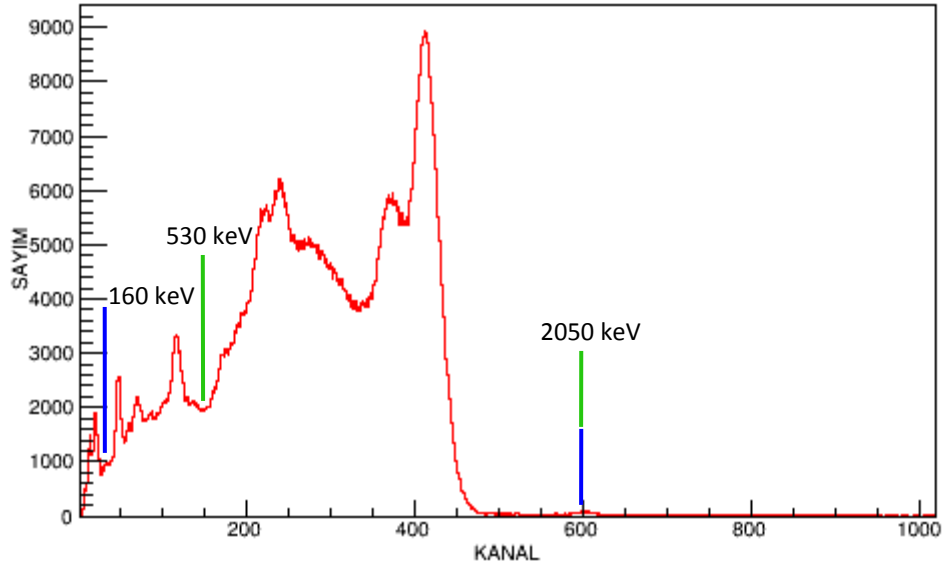
Şekil 6.28. Plastik sintilatörde yapılan ölçüm sonucu elde edilen ^{166m}Ho ölçümünde elde edilen beta enerji spektrumu.

Beta ve gama sinyalleri arasındaki zaman farklarını gösteren zaman gecikmesi spektrumu Şekil 6.29'da verilmiştir. Bu zaman gecikmesi spektrumu incelendiğinde beta ve gama sinyalleri arasındaki gecikme farkı 244 ns olarak bulunur. Dolayısıyla çakışan beta-gama sinyallerini bulmadan önce her beta sinyaline 244 ns gecikme uygulanması gerekmektedir. Çakışma penceresinin genişliği ise pikin taban genişliği olan yaklaşık 40 ns değerine eşit olmaktadır.

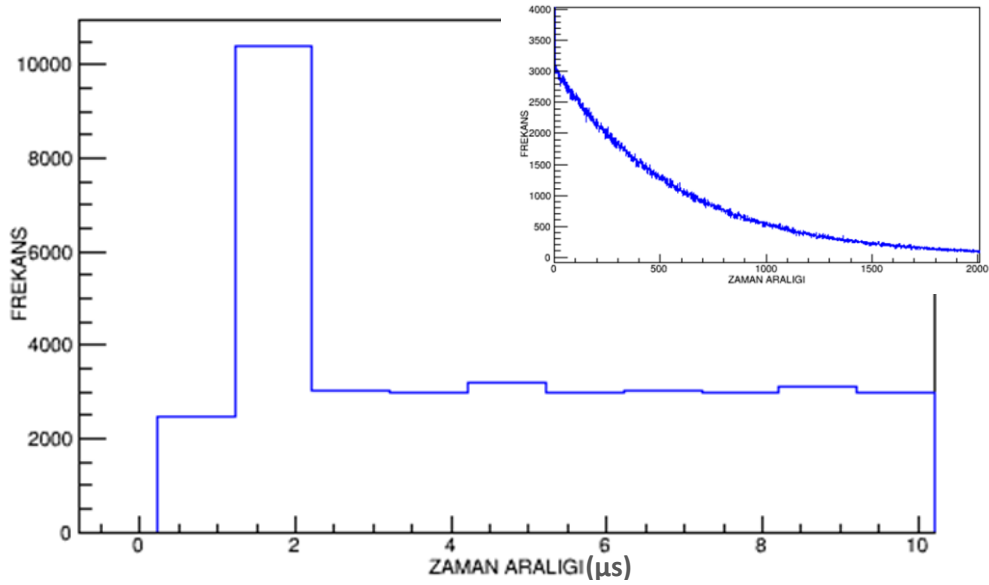


Şekil 6.29. ^{166m}Ho ölçümünde elde edilen beta-gama zaman gecikmesi spektrumu.

^{166m}Ho radyonüklitine ait gama enerji spektrumu ve analizlerde seçilen enerji aralıkları Şekil 6.30'da gösterilmiştir. ^{166m}Ho ölçüm sonucunun analizi iki farklı gama enerji penceresi seçilmiştir. İlk enerji penceresi 160 keV – 2050 keV aralığıdır. Bu aralık 184,41 keV, 264,98 keV, 410,95 keV, 711,69 keV, 752,28 keV, 810,28 keV piklerini ve bu piklerin çakışması sonucu oluşan toplam pikleri içermektedir. İkinci enerji penceresi ise 530 keV – 2050 keV aralığıdır. Bu aralık 711,69 keV, 752,28 keV, 810,28 keV piklerini ve bu piklerin çakışması çakışma sonucu oluşan toplam pikleri içermektedir.



Şekil 6.30. ^{166m}Ho için gama enerji spektrumu. Mavi ve yeşil çizgilerin arasında kalan bölgeler hesaplama için seçilen enerji aralıklarını gösterir.



Şekil 6.31. ^{166m}Ho ölçümünde deneysel olarak elde edilen gama sinyallerine ait zaman aralığı histogramı: (a) tam histogram, (b) tam histogramın zaman aralığının sıfıra yakın bölümündeki büyütülmüş hali.

^{166m}Ho kaynağının ölçümü sonucu elde edilen gama sinyalleri arasındaki zaman aralığı değerlerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 6.31’de verilmiştir. Şekil 6.31 (b)’de zaman aralığı değerinin sıfıra yakın olan bölgesi incelendiğinde, en küçük zaman aralığı değerinin yaklaşık olarak 0,5 µs’den başladığı görülmektedir. Bu davranış ölçüm sisteminde yaklaşık 0,5 µs değerinde ölü zaman olduğunu ifade etmektedir.

^{166m}Ho aktivitesi, uygulanan iki farklı ölü zaman değeri için hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonuçları aşağıda detaylandırılmıştır.

Ölü zaman: 10 µs

530 – 2050 keV ve 160 – 2050 keV gama enerji aralıklarında, her bir beta enerji diskriminasyonu için elde edilen ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ değerleri, sırasıyla Çizelge 6.22 ve 6.23’de verilmiştir. Hesaplamalarda, beta sinyallerine 244 ns gecikme uygulanmıştır ve çakışma penceresi 40 ns olarak alınmıştır.

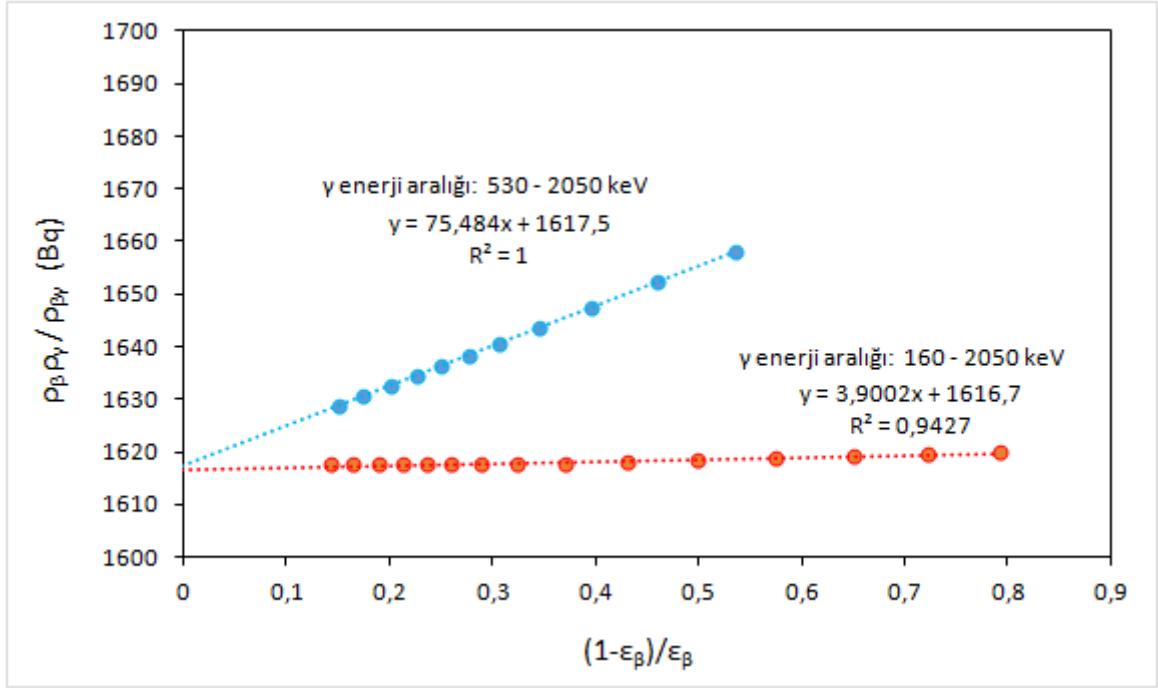
Çizelge 6.22. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 10 µs ölü zaman değeri için 530 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 µs			
çakışma penceresi = 40 ns			
γ enerji aralığı = 530 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta \rho_\gamma / \rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,869106	0,1506076	1628,75	4
0,851393	0,1745457	1630,69	6
0,832593	0,2010670	1632,7	8
0,815748	0,2258687	1634,62	10
0,799747	0,2503954	1636,46	12
0,783478	0,2763600	1638,34	14
0,765074	0,3070631	1640,64	16
0,743013	0,3458714	1643,64	18

0,716242	0,3961761	1647,37	20
0,684759	0,4603678	1652,26	22
0,65108	0,5359095	1657,93	24

Çizelge 6.23. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 160 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölu zaman = 10 μs			
çakışma penceresi = 40 ns			
y enerji aralığı = 160 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,875132	0,1426848	1617,54	4
0,858288	0,1651101	1617,59	6
0,840365	0,1899591	1617,6	8
0,824336	0,2130976	1617,59	10
0,80908	0,2359717	1617,58	12
0,793525	0,2601997	1617,6	14
0,775944	0,2887528	1617,65	16
0,754898	0,3246823	1617,76	18
0,729281	0,3712136	1617,91	20
0,699207	0,4301916	1618,12	22
0,666983	0,4992886	1618,39	24
0,635311	0,5740322	1618,8	26
0,60593	0,6503557	1619,23	28
0,580344	0,7231159	1619,7	30
0,557917	0,7923813	1620,08	32



Şekil 6.32. 10 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Şekil 6.32'de gösterildiği üzere, verim dışadeğerleme yönteminde, 530 keV – 2050 keV gama enerjisi aralığı için $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında 1617,5 Bq aktivite değeri bulunmuştur. 160 keV – 2050 keV gama enerji aralığında ise yine doğrusal bir fit yapıldığında 1616,7 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. İki farklı gama enerji aralığında hesaplanan aktivite değerleri birbirine oldukça yakındır. Ortalama aktivite değeri ise 1617,1 Bq olarak hesaplanmıştır.

Ölü zaman: 30 µs

530 – 2050 keV ve 160 – 2050 keV gama enerji aralıklarında, her bir beta enerji diskriminasyonu için elde edilen ϵ_β , $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ ve $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerleri Çizelge 6.24 ve 6.25'de verilmiştir. Hesaplamalarda, beta sinyallerine 244 ns gecikme uygulanmıştır ve çakışma penceresi 40 ns olarak alınmıştır.

Çizelge 6.24. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 530 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

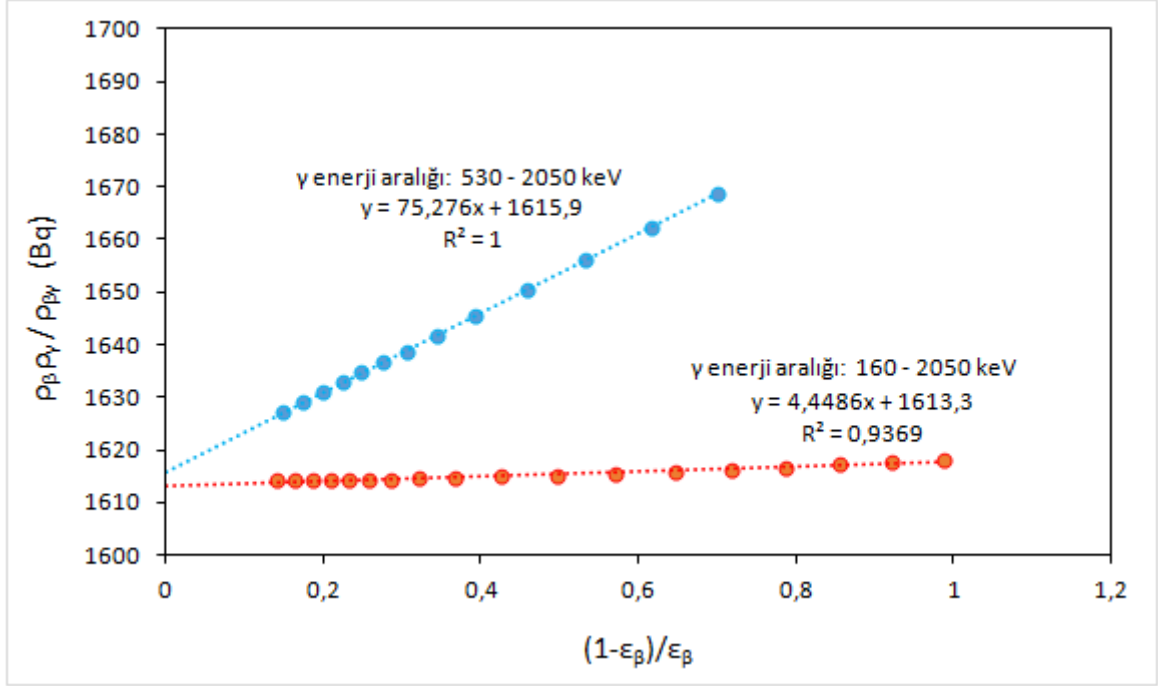
ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 40 ns			
gama enerji aralığı =530 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,870079	0,149320924	1627,1	4
0,852384	0,173180163	1629,02	6
0,833594	0,199624757	1631,04	8
0,816724	0,224403838	1632,9	10
0,800739	0,248846378	1634,72	12
0,784459	0,274763882	1636,59	14
0,766064	0,305373964	1638,83	16
0,743956	0,344165515	1641,86	18
0,717787	0,393170955	1645,64	20
0,685725	0,458310547	1650,46	22
0,652028	0,533676468	1655,97	24
0,618849	0,615903072	1662,42	26
0,588181	0,700156924	1668,64	28

Çizelge 6.25. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 30 μs ölü zaman değeri için 160 - 2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 30 μs			
çakışma penceresi = 40 ns			
gama enerji aralığı = 160 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,876919	0,140356179	1614,41	4
0,860072	0,162693356	1614,46	6
0,842155	0,187429867	1614,46	8
0,826078	0,210539441	1614,41	10
0,810824	0,233313271	1614,38	12
0,795241	0,257480437	1614,4	14
0,777655	0,285917277	1614,4	16
0,756553	0,321784462	1614,53	18
0,730915	0,368148143	1614,73	20
0,700823	0,426893809	1614,9	22
0,668555	0,495763251	1615,03	24
0,636852	0,570223537	1615,42	26
0,607397	0,646369673	1615,87	28
0,581748	0,718957349	1616,33	30
0,559288	0,787987584	1616,7	32
0,5392	0,854599407	1617,22	34
0,520528	0,921126241	1617,85	36
0,50289	0,988506433	1618,22	38

Verim dışadeğerleme yönteminde elde edilen fit fonksiyonları Şekil 6.33'te gösterilmiştir. 530 keV – 2050 keV gama enerjisi aralığı için $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında

1615,9 Bq aktivite değeri bulunmuştur. 160 keV – 2050 keV gama enerji aralığında ise yine doğrusal bir fit yapıldığında 1613,3 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1614,6 Bq olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.33. 30 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışıdeğerleme fonksiyonları.

10 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 1617,1 Bq aktivite değeri ile 30 µs ölü zaman uygulanması sonucu hesaplanan 1614,6 Bq aktivite değeri arasında yaklaşık %0,15 bir göreceli fark vardır. Nihai aktivite değeri bu değerlerden biri olarak alınabilir ya da her iki değer aritmetik ortalaması olarak (1615,8 Bq) alınabilir.

6.2.5. Belirsizlik Hesaplamaları

Bu çalışmada, dijital çakışma yönteminde temel belirsizlik kaynakları olarak sayım istatistiği, verim dışıdeğerleme ve ölü zamandan dolayı meydana gelen katkılar hesaba katılmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalarda (Nedjadi, Bailat ve Bochud, 2012) ölçümü yapılan kaynağın kütlesi, radyonüklitin yarı ömrü ve

doğal fon gibi diğer parametreler de belirsizlik kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Diğer bazı çalışmalarda (Havelka ve Sochorova, 2010) ise sadece verim dışı değerlendirme ve sayım istatistiği belirsizlik kaynakları olarak dikkate alınmıştır. Toplam belirsizlik değerini oluşturan bu bileşenlerin hesaplanmasında standart bir prosedür yoktur. Farklı hesaplama ve yaklaşımlar kullanılarak bu belirsizlik bileşenleri hesaplanmaktadır (Havelka ve Sochorova, 2010; Nedjadi, Bailat ve Bochud, 2012; Unno ve ark., 2018).

Bu çalışmada, verim dışı değerlendirme belirsizlik hesabı Microsoft Excel programında bulunan LINEST (DOT) fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. LINEST, en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan fit doğrusunun istatistiklerini (fit doğrusunun eğiminin ve sabitinin belirsizlik değerlerini) hesaplayan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon kullanılarak $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değeri sıfır olduğunda fit doğrusunun $\rho_\beta\rho_V/\rho_{\beta V}$ eksenini kestiği değer standart hatası hesaplanmıştır. Bu hata değeri, verim dışı değerlendirme belirsizliği olarak alınmıştır. LINEST fonksiyonunun hesaplama yöntemleri Ek 3'te verilmiştir.

Sayım istatistiğinden kaynaklanan belirsizlik hesaplanırken radyoaktif bozunmanın Poisson dağılımına uyma prensibi kullanılmıştır. Yüksek sayım değerlerinde ise Poisson dağılımı Gaussian dağılımına doğru bir yaklaşım göstermektedir. Tek bir ölçümde elde edilen sayım değeri (N) ortalamaya, ortalama da varyansa eşit olacağından ($\sigma^2 = N$), standart sapma, sayım değerinin kareköküne ($\sigma = N^{1/2}$) eşit olacaktır (MacDonald, 2011). Dolayısıyla sayımdan kaynaklı belirsizlik değerleri beta, gama ve çakışma toplam sayım değerlerinin standart sapmaları hesaplanarak belirlenmiştir. Bu hesaplamalara ait açıklama ve formüller Ek 4'te verilmiştir.

Bu çalışmada sinyal serilerine yapay ölü zaman uygulaması bir elektronik modül ile değil de yazılım vasıtası ile yapıldığından uygulanan değer kendisinin bir belirsizliği yoktur. Ancak, ölü zaman uygulamasından kaynaklı belirsizlik değeri, farklı ölü zaman değerleri için hesaplamalar sonucunda elde edilen aktivite dağılımı göz önünde bulundurularak hesaplanabilir (Duran ve ark., 2018). Farklı ölü zaman değerleri için bulunan aktivite değerlerinin standart sapması hesaplanmıştır ve belirsizlik bileşeni olarak değerlendirilmiştir.

Bu üç temel belirsizlik bileşeninin ve bu bileşenler kullanılarak hesaplanan toplam belirsizlik değerlerinin bulunduğu çizelgeler aşağıda verilmiştir. Toplam belirsizlik değerinin hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar Ek 5'te verilmiştir.

Çizelge 6.26. ^{60}Co aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem)

^{60}Co	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	852-2177 keV	852-2977 keV	852-2177 keV	852-2977 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,231	0,205	0,232	0,205
Verim dışı değerlendirme	0,017	0,009	0,017	0,01
Ölü zaman	0,045	0,094	0,045	0,094
Toplam belirsizlik	0,236	0,226	0,237	0,226

Çizelge 6.27. ^{133}Ba aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem)

^{133}Ba	10 μs ölü zaman		30 μs ölü zaman	
	53-602 keV	198-602 keV	53-602 keV	198-602 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,334	0,356	0,337	0,359
Verim dışı değerlendirme	0,012	0,028	0,012	0,029
Ölü zaman	0,066	0,047	0,066	0,047
Toplam belirsizlik	0,341	0,360	0,344	0,363

Çizelge 6.28. ^{152}Eu aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem)

^{152}Eu	ölü zaman 5 μs			ölü zaman 30 μs		
	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1			Belirsizlik değeri (%) k = 1		
Sayım istatistiği	0,458	0,332	0,373	0,458	0,354	0,375
Verim dışıdeğerleme	0,409	0,022	0,097	0,419	0,015	0,091
Ölü zaman	0,092	0,040	0,093	0,092	0,040	0,093
Toplam belirsizlik	0,621	0,335	0,396	0,628	0,357	0,397

Çizelge 6.29. $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmalı yöntem)

$^{166\text{m}}\text{Ho}$	10 μs ölü zaman		30 μs ölü zaman	
	160-2050 keV	530-2050 keV	160-2050 keV	530-2050 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,171	0,179	0,180	0,176
Verim dışıdeğerleme	0,007	0,003	0,010	0,003
Ölü zaman	0,105	0,049	0,105	0,049
Toplam belirsizlik	0,201	0,186	0,209	0,183

Yukarıdaki çizelgelerde hesaplanan toplam belirsizlik değerleri kullanılarak 5 μs ve 10 μs ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan ^{60}Co aktivitesi değerleri Çizelge 6.30'da özetlenmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{60}Co aktivitesi $1222,6 \pm 2,8$ Bq olarak bulunur.

Çizelge 6.30. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{60}Co aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{60}Co	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	852-2177 keV	852-2977 keV	852-2177 keV	852-2977 keV
Aktivite (Bq)	1220,4 \pm 5,8	1223,0 \pm 5,5	1221,5 \pm 5,8	1225,3 \pm 5,5

10 μs ve 30 μs ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan ^{133}Ba aktivitesi değerleri Çizelge 6.31'de verilmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{133}Ba aktivitesi 1064,2 \pm 3,8 Bq bulunur.

Çizelge 6.31. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{133}Ba aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{133}Ba	10 μs ölü zaman		30 μs ölü zaman	
	53-602 keV	198-602 keV	53-602 keV	198-602 keV
Aktivite (Bq)	1063,6 \pm 7,3	1066,0 \pm 7,7	1062,2 \pm 7,3	1065,0 \pm 7,7

5 μs ve 30 μs ölü zaman değerleri için üç farklı gama enerji aralığında bulunan ^{152}Eu aktivitesi değerleri Çizelge 6.32'de verilmiştir. Altı farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{152}Eu aktivitesi 454,7 \pm 1,8 Bq olarak bulunur.

Çizelge 6.32. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{152}Eu aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{152}Eu	ölü zaman 5 μs			ölü zaman 30 μs		
	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV
Aktivite (Bq)	456,5 \pm 5,7	452,4 \pm 3,0	456,1 \pm 3,6	455,7 \pm 5,7	452,0 \pm 3,2	455,2 \pm 3,6

10 μ s ve 30 μ s ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan ^{166m}Ho aktivitesi değerleri Çizelge 6.33'de verilmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{166m}Ho aktivitesi $1615,9 \pm 3,1$ Bq olarak bulunur.

Çizelge 6.33. Çakışmalı yöntem ile hesaplanan ^{166m}Ho aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{166m}Ho	10 μ s ölü zaman		30 μ s ölü zaman	
	160-2050 keV	530-2050 keV	160-2050 keV	530-2050 keV
Aktivite (Bq)	$1616,7 \pm 6,5$	$1617,5 \pm 6,0$	$1613,3 \pm 6,7$	$1615,9 \pm 5,9$

6.3. Çakışmasız Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar

Çakışmasız yöntem ile yapılan veri analizi, çakışmalı yöntemde kullanılan ham veriler kullanılarak yapılmıştır, tekrar kaynak ölçümü yapılmamıştır. $4\pi\beta\gamma$ çakışma sayım sisteminde dijital sistem kullanmanın avantajı ve kolaylığı tam da buradadır. Tek bir defa ölçüm yapıp ham verileri depoladıktan sonra çeşitli analiz yöntemlerini aynı veriler üzerinde kullanmayı mümkün kılmaktadır.

6.3.1. ^{60}Co Ölçümünün Sonuçları

^{60}Co aktivitesinin çakışmasız yöntem kullanılarak hesaplanmasında, çakışmalı yöntemde olduğu gibi enerji filtrelemesi uygulanarak 852 keV – 2127 keV ve 852 keV – 2977 keV gama enerji aralıkları seçilmiştir.

Aktivite hesabı için, gama ve beta sinyallerine 5 μ s uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Daha sonra gama sinyallerine 1 μ s gecikme uygulanmıştır. Yazılımın beta ile çakışma yapmayan gama sinyallerini bulan modülünde, her beta sinyalinden sonraki 2 μ s'lik (2 x gama gecikme zamanı 1 μ s) zaman diliminde bulunan gama sinyalleri silinmiştir. Silinmeden geriye kalan gama sinyalleri, beta sinyalleriyle çakışma yapmayan gama sinyalleri olarak belirlenmiştir. Bölüm 3.2.1.1'de yer alan formüller kullanılarak yapılan ölü zaman

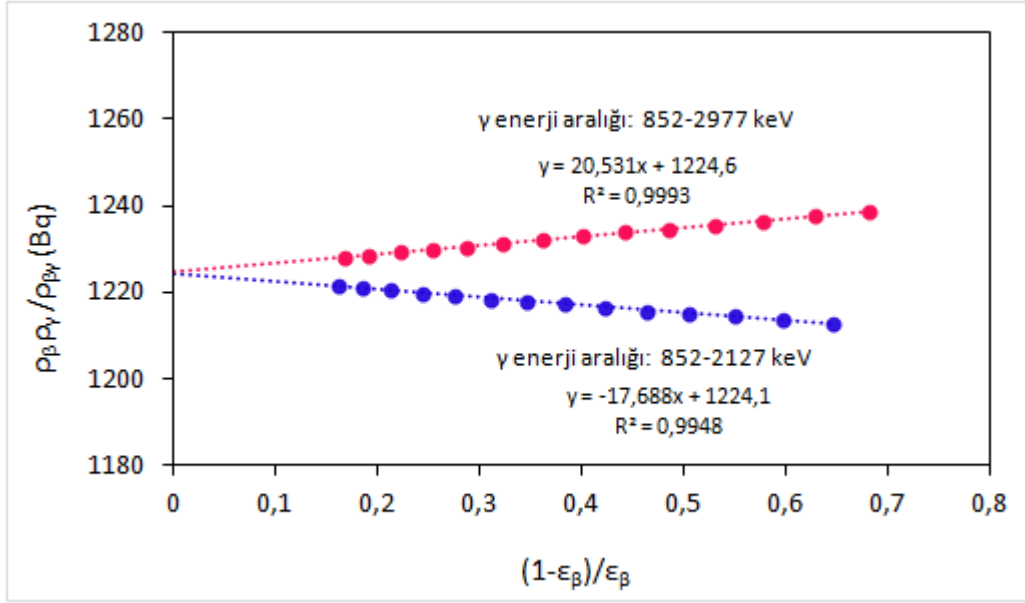
ve doğal fon düzeltmelerinin ardından düzeltilmiş beta, gama ve çakışmasız gama sayım hızları elde edilmiştir. Bu sayım hızları kullanılarak beta verim değerleri (ϵ_β), $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerleri ve $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_c$ değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 6.34 ve Çizelge 6.35'te verilmiştir. Verim dışıdeğerleme yöntemi ile $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin dağılımı ve bu dağılımlara uygulanan fit fonksiyonları Şekil 6.34'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.34. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 852-2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,86113	0,16126485	1221,45	4
0,844078	0,184724634	1220,95	6
0,824101	0,213443498	1220,39	8
0,803737	0,244188086	1219,73	10
0,783563	0,276221567	1218,99	12
0,763303	0,310095729	1218,43	14
0,743003	0,345889586	1217,75	16
0,722963	0,38319665	1217,17	18
0,703022	0,422430592	1216,46	20
0,683426	0,463216208	1215,5	22
0,664262	0,505430086	1215,06	24
0,645055	0,550255405	1214,61	26
0,626009	0,597421123	1213,79	28
0,607416	0,646318174	1212,61	30

Çizelge 6.35. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 852-2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,856497	0,167546413	1228,06	4
0,838803	0,19217504	1228,63	6
0,818215	0,222172656	1229,17	8
0,797183	0,254417116	1229,76	10
0,776338	0,28809874	1230,34	12
0,755404	0,323794949	1231,17	14
0,734339	0,361768883	1232,11	16
0,713689	0,401170538	1232,98	18
0,6931	0,442793248	1233,87	20
0,672865	0,486182221	1234,58	22
0,653273	0,530753605	1235,5	24
0,633655	0,578145836	1236,46	26
0,614005	0,628651232	1237,52	28
0,594706	0,681503129	1238,53	30



Şekil 6.34. Çakışmasız yöntemde 5 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ⁶⁰Co verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Verim dışadeğerleme yöntemi sonucunda, 1173,2 keV ve 1332,5 keV ana piklerini içeren 852 keV – 2127 keV enerji aralığında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin 100% olduğu noktada aktivite değeri 1224,1 Bq olarak hesaplanmıştır. Ana pikler ve toplam piki içeren 852 keV – 2977 keV aralığında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1224,6 Bq olarak hesaplanmıştır. İki farklı gama enerji penceresi için bulunan aktivite değerleri birbirlerinden %0,04 kadar bir göreceli farkla ayrılmaktadır. Dolayısıyla, aktivite değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları, seçilen enerji pencerelerinin uygun olduğu ve hesaplanan aktivite değerlerinin ise doğruluk derecelerinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. İki pencere göz önünde bulundurularak ortalama aktivite değeri 1224,4 Bq olarak hesaplanmıştır.

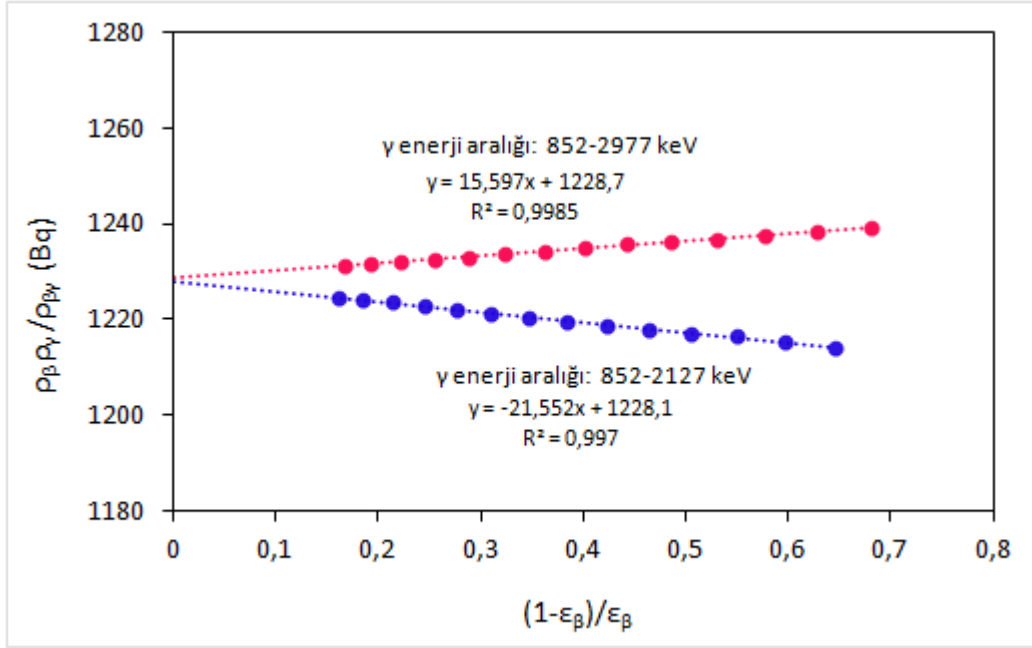
Aynı enerji aralıkları için gama ve beta sinyallerine 10 µs uzamayan ölü zaman uygulandığında ve gama sinyalleri 1 µs geciktirildiğinde elde edilen verim dışadeğerleme sonuçları Şekil 6.35'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.36. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 852-2127 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2127 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı (1- ϵ_β)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,86097	0,161480656	1224,81	4
0,843914	0,184954865	1224,25	6
0,823936	0,2136865	1223,59	8
0,803586	0,244421879	1222,83	10
0,783422	0,276451261	1221,96	12
0,763168	0,310327477	1221,29	14
0,742884	0,346105179	1220,46	16
0,722877	0,383361208	1219,75	18
0,702955	0,422566167	1218,9	20
0,683396	0,463280441	1217,76	22
0,664267	0,505418755	1217,15	24
0,6451	0,550147264	1216,53	26
0,626109	0,597165989	1215,5	28
0,607573	0,645892757	1214,12	30

Çizelge 6.37. ^{60}Co aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 852-2977 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 852 keV - 2977 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı (1- ϵ_β)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,856469	0,167584583	1231,25	4
0,838784	0,192202045	1231,74	6
0,818223	0,222160707	1232,14	8
0,797227	0,254347883	1232,58	10
0,776414	0,287972654	1232,99	12
0,755523	0,323586443	1233,65	14
0,734495	0,361479656	1234,4	16
0,713899	0,400758371	1235,09	18
0,693353	0,442266782	1235,78	20
0,673173	0,485502241	1236,25	22
0,653642	0,52988945	1236,93	24
0,634089	0,57706568	1237,65	26
0,61451	0,627312818	1238,44	28
0,59528	0,679881736	1239,19	30



Şekil 6.35. Çakışmasız yöntemde 10 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ⁶⁰Co verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Verim dışadeğerleme yöntemi sonucunda, 852 keV – 2127 keV enerji aralığında doğrusal fit yapıldığında beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1228,1 Bq olarak hesaplanmıştır. 852 keV – 2977 keV aralığında doğrusal fit yapıldığında ise beta veriminin %100 olduğu noktada aktivite değeri 1228,7 Bq olarak hesaplanmıştır. İki farklı gama enerji penceresi için bulunan aktivite değerleri birbirlerinden 0%0,05'den daha az bir göreceli farkla ayrılmaktadır. İki pencere göz önünde bulundurularak ortalama aktivite değeri 1228,4 Bq olarak hesaplanmıştır.

6.3.2. ¹³³Ba Ölçümünün Sonuçları

¹³³Ba aktivitesinin çakışmasız yöntem kullanılarak hesaplanmasında, çakışmalı yöntemde olduğu gibi enerji filtrelemesi uygulanarak 53 keV – 602 keV ve 198 keV – 602 keV gama enerji aralıkları seçilmiştir.

Aktivite hesabı için, gama ve beta sinyallerine 5 µs uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Daha sonra gama sinyallerine 1 µs gecikme uygulanmıştır.

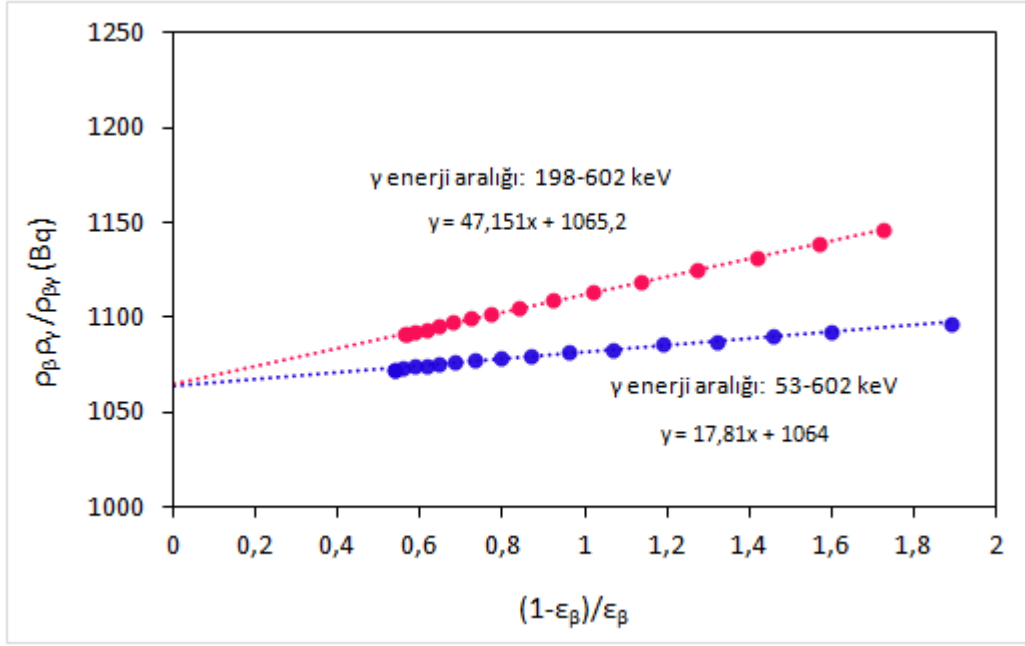
Verim dışı değerlendirme yönteminde $(1-\varepsilon_\beta)/\varepsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında (Şekil 6.36), 53 keV – 602 keV gama enerji aralığında 1064,0 Bq, 198 keV – 602 keV aralığında 1065,2 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1064,6 Bq olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.38. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 53-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 53 keV - 602 keV			
Beta verimi (ε_β)	Verim oranı $(1-\varepsilon_\beta)/\varepsilon_\beta$	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,650597	0,537049817	1072,86	3
0,650109	0,538203594	1072,79	4
0,641999	0,557634825	1073,43	5
0,631342	0,58392757	1074,13	6
0,619931	0,613082746	1074,95	7
0,60775	0,64541341	1075,57	8
0,593366	0,685300472	1076,51	9
0,576899	0,733405674	1077,34	10
0,557265	0,79447839	1078,54	11
0,534874	0,869599195	1079,87	12
0,509766	0,961684381	1081,69	13
0,483272	1,069228095	1083,31	14
0,456256	1,191751999	1085,6	15
0,430662	1,322006585	1087,61	16
0,406732	1,458621402	1090,14	17
0,384901	1,598070673	1092,08	18
0,346057	1,889697362	1096,98	20

Çizelge 6.39. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 198-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 198 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,639783	0,563029965	1091	3
0,639234	0,564372358	1091,04	4
0,630939	0,584939273	1092,24	5
0,619921	0,613108767	1093,92	6
0,608298	0,6439311	1095,51	7
0,595671	0,678779058	1097,38	8
0,580982	0,721223721	1099,46	9
0,563983	0,77310309	1102,02	10
0,543813	0,838867405	1105,22	11
0,520758	0,920277749	1109,14	12
0,49507	1,019916375	1113,8	13
0,467794	1,137693087	1119,15	14
0,44017	1,271849513	1125,28	15
0,413819	1,416515433	1131,88	16
0,389315	1,568614104	1138,91	17
0,366828	1,726073255	1145,89	18



Şekil 6.36. Çakışmasız yöntemde 5 μ s ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.

Aynı enerji aralıkları için gama ve beta sinyallerine 10 μ s uzamayan ölü zaman uygulandığında ve gama sinyalleri 1 μ s geciktirildiğinde elde edilen verim dışadeğerleme sonuçları Şekil 6.37’de gösterilmiştir.

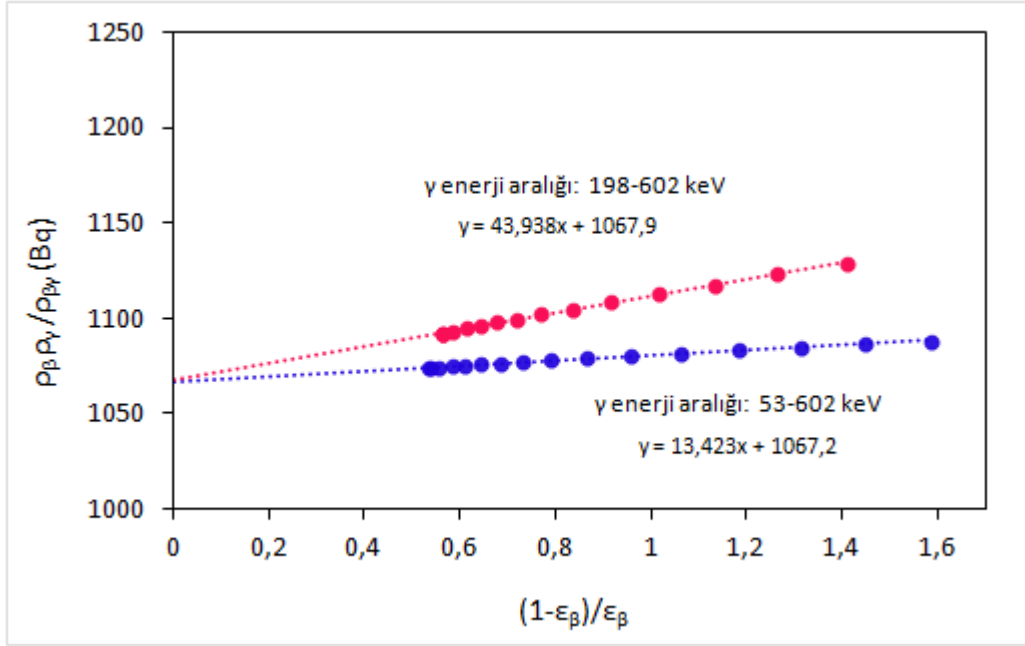
Çizelge 6.40. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 53-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 53 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,651	0,53609831	1073,82	3
0,650599	0,537045092	1073,75	4
0,642527	0,55635483	1074,29	5
0,631899	0,582531386	1074,87	6
0,620527	0,611533422	1075,55	7
0,608397	0,643663595	1076,02	8
0,594072	0,683297647	1076,76	9
0,577674	0,731080159	1077,37	10
0,558118	0,791735798	1078,27	11
0,535818	0,86630535	1079,27	12
0,510831	0,957594586	1080,65	13
0,484487	1,06403887	1081,72	14
0,457622	1,185209627	1083,4	15
0,432163	1,31394173	1084,78	16
0,408373	1,448741714	1086,62	17
0,386681	1,586111032	1087,82	18

Çizelge 6.41. ^{133}Ba aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 198-602 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 198 keV - 602 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,6402	0,562011871	1092,1	2
0,640196	0,562021631	1092,09	3
0,639646	0,563364736	1092,13	4
0,631391	0,583804647	1093,23	5
0,620396	0,611873706	1094,8	6
0,608808	0,642553974	1096,26	7
0,596226	0,677216358	1097,98	8
0,581597	0,719403642	1099,86	9
0,564663	0,770967816	1102,2	10
0,544565	0,836328078	1105,1	11
0,521594	0,917199968	1108,7	12
0,496019	1,016051804	1112,91	13
0,468874	1,132769145	1117,74	14
0,441396	1,265539334	1123,22	15
0,415172	1,408640274	1129,18	16

Verim dışadeğerleme yönteminde uygulanan doğrusal fit fonksiyonları sonucu, 53 keV – 602 keV gama enerji aralığında 1067,2 Bq, 198 keV – 602 keV aralığında 1067,9 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1067,6 Bq olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.37. Çakışmasız yöntemde 10 μ s ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{133}Ba verim dışadeğerleme fonksiyonları.

6.3.3. ^{152}Eu Ölçümünün Sonuçları

^{152}Eu aktivitesinin çakışmasız yöntem kullanılarak hesaplanmasında, çakışmalı yöntemde olduğu gibi enerji filtrelemesi uygulanarak 43 keV – 588 keV, 176 keV – 1495 keV ve 495 keV – 1495 keV gama enerji aralıkları seçilmiştir.

Aktivite hesabı için, seçilen gama enerji aralığındaki verilere 5 μ s uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Enerji diskriminasyonuna uğramış beta sinyallerine de 5 μ s uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Daha sonra gama sinyallerine 1 μ s gecikme uygulanmıştır.

Çizelge 6.42. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 43-588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 43 keV - 588 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,661962	0,510660733	450,214	1
0,661962	0,510660733	450,214	2
0,661962	0,510660733	450,21	3
0,661829	0,510964313	450,193	4
0,657971	0,519823822	450,285	5
0,65325	0,530807501	450,429	6
0,649054	0,540703855	450,402	7
0,644952	0,550502983	450,346	8
0,641041	0,559962623	450,237	9
0,637224	0,569306869	449,964	10
0,63313	0,579454456	449,787	11
0,629731	0,587979629	449,388	12
0,626077	0,597247623	448,952	13
0,622127	0,607388845	448,686	14
0,618346	0,617217545	448,144	15
0,614375	0,627670397	447,544	16
0,610143	0,638960047	446,731	17
0,605377	0,651863219	445,657	18
0,600216	0,666066883	444,382	19
0,594711	0,681488992	442,901	20
0,588711	0,698626321	441,356	21
0,582622	0,716378716	439,56	22
0,575848	0,736569372	437,849	23
0,569627	0,755534762	435,683	24

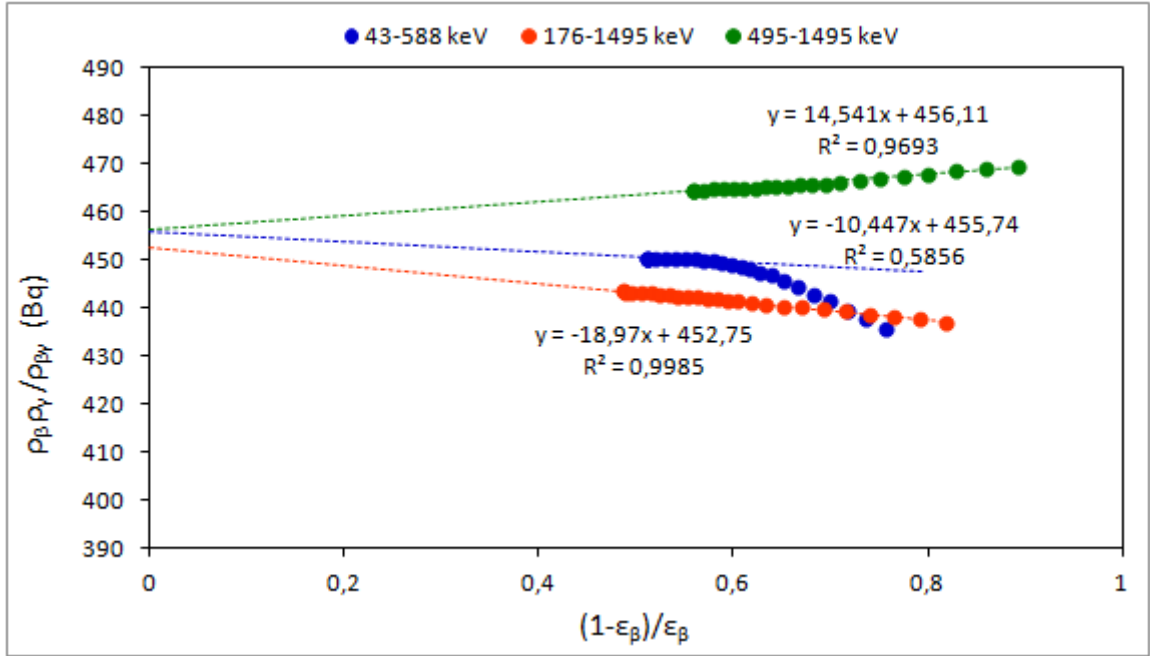
Çizelge 6.43. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 176-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 176 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,672148	0,487767575	443,391	2
0,672143	0,487778642	443,391	3
0,672004	0,48808638	443,376	4
0,668462	0,495971349	443,219	5
0,664015	0,505990076	443,127	6
0,659933	0,515305342	442,978	7
0,65589	0,524645901	442,836	8
0,651989	0,533768208	442,676	9
0,64793	0,543376599	442,528	10
0,64398	0,552843256	442,336	11
0,640033	0,562419438	442,155	12
0,635967	0,572408631	441,97	13
0,631881	0,582576466	441,761	14
0,627613	0,59333857	441,527	15
0,623038	0,605038537	441,321	16
0,618035	0,618031341	441,026	17
0,612114	0,633682615	440,752	18
0,605564	0,651353119	440,458	19
0,598508	0,670821443	440,091	20
0,590941	0,692216313	439,691	21
0,583022	0,715201142	439,258	22
0,574718	0,739983783	438,71	23
0,566419	0,7654775	438,151	24
0,558221	0,791405196	437,635	25
0,549963	0,818304	437,128	26

Çizelge 6.44. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 495-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 495 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,641448	0,558972824	464,613	2
0,641441	0,558989837	464,613	3
0,641294	0,559347195	464,608	4
0,637683	0,568177292	464,612	5
0,63321	0,579254908	464,685	6
0,629044	0,589713915	464,73	7
0,624871	0,600330308	464,819	8
0,620836	0,610731336	464,89	9
0,616546	0,621938996	465,055	10
0,612371	0,63299699	465,169	11
0,608166	0,644287908	465,323	12
0,60386	0,656012983	465,469	13
0,599597	0,667786864	465,546	14
0,595096	0,680401145	465,652	15
0,590246	0,694208855	465,839	16
0,58482	0,709927841	466,074	17
0,578449	0,728760876	466,404	18
0,571337	0,750280482	466,844	19
0,563565	0,774418213	467,378	20
0,55534	0,800698671	467,877	21
0,546705	0,82914003	468,437	22
0,537755	0,859582896	468,865	23
0,528609	0,891757424	469,49	24

Verim dışıdeğerleme yönteminde $(1-\varepsilon_\beta)/\varepsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında (Şekil 6.38), 176 keV – 1495 keV gama enerji aralığında 452,75 Bq, 495 keV – 1495 keV aralığında 456,11 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. 43 keV – 588 keV enerji aralığında $(1-\varepsilon_\beta)/\varepsilon_\beta$ değerinin 0,6'nın üzerine çıktığı noktadan itibaren $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinde hızlı düşüşler başlamıştır. Bu noktadan itibaren tüm verilere doğrusal fit yapmak mümkün olmadığından beta veriminin yüksek olduğu değerlere doğrusal fit uygulanmıştır. Elde edilen fit fonksiyonundan aktivite değeri 455,74 Bq olarak belirlenmiştir. Ortalama aktivite değeri ise 454,8 Bq olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.38. Çakışmasız yöntemde 5 µs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{152}Eu verim dışıdeğerleme fonksiyonları.

Aynı enerji aralıkları için gama ve beta sinyallerine 10 µs uzamayan ölü zaman uygulandığında ve gama sinyalleri 1 µs geciktirildiğinde elde edilen verim dışıdeğerleme sonuçları Şekil 6.39'da gösterilmiştir. 43 keV – 588 keV, 176 keV – 1495 keV ve 495 keV – 1495 keV enerji aralıkları için, sırasıyla 456,86

Bq, 453,2 Bq ve 456,71 Bq aktivite değerleri hesaplanmıştır. Üç enerji aralığında bulunan değerlerin ortalaması alındığında 455,6 Bq değeri bulunur.

Çizelge 6.45. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 43-588 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

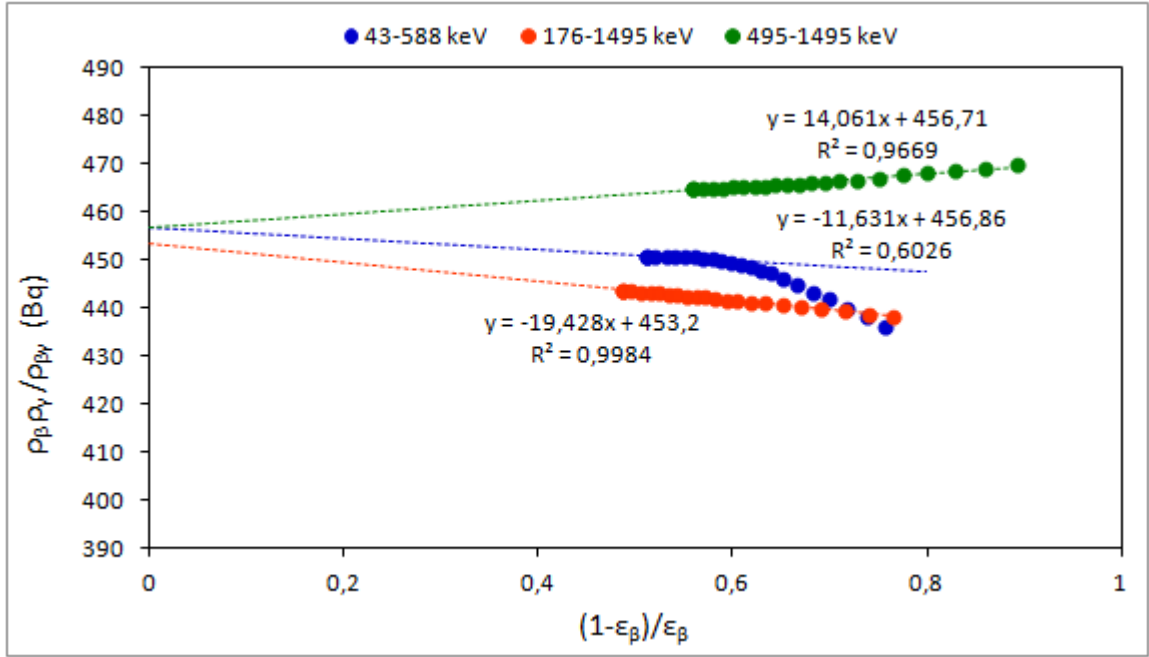
ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 43 keV - 588 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,661749	0,511146976	450,677	2
0,661749	0,511146976	450,673	3
0,661621	0,511439329	450,651	4
0,657751	0,520332162	450,75	5
0,653034	0,531313837	450,889	6
0,648836	0,541221511	450,861	7
0,644722	0,551056114	450,81	8
0,640821	0,560498173	450,693	9
0,637016	0,569819282	450,407	10
0,633104	0,579519321	450,228	11
0,629522	0,588506835	449,825	12
0,625863	0,597793766	449,338	13
0,621913	0,607941947	449,119	14
0,618133	0,617774815	448,571	15
0,614157	0,628248152	447,971	16
0,609927	0,63954047	447,158	17
0,605163	0,652447357	446,08	18
0,600016	0,666622223	444,791	19
0,59452	0,6820292	443,301	20
0,588528	0,699154501	441,749	21
0,582443	0,716906204	439,942	22
0,575679	0,737079171	438,22	23
0,569475	0,756003336	436,032	24

Çizelge 6.46. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 176-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 176 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_V/\rho_{\beta V}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,672248	0,487546263	443,638	2
0,672244	0,487555114	443,637	3
0,672107	0,487858332	443,62	4
0,668558	0,495756539	443,464	5
0,664115	0,505763309	443,365	6
0,660042	0,515055103	443,206	7
0,656001	0,52438792	443,059	8
0,652106	0,533493021	442,894	9
0,648053	0,543083668	442,736	10
0,644104	0,55254431	442,539	11
0,640162	0,562104592	442,349	12
0,636101	0,57207739	442,155	13
0,632018	0,582233417	441,938	14
0,627754	0,59298069	441,696	15
0,623189	0,604649633	441,479	16
0,618199	0,617602099	441,174	17
0,612286	0,63322369	440,89	18
0,605742	0,650867861	440,586	19
0,598699	0,670288409	440,207	20
0,591138	0,691652372	439,798	21
0,583231	0,714586502	439,348	22
0,574944	0,739299827	438,78	23
0,566653	0,764748444	438,203	24

Çizelge 6.47. ^{152}Eu aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 495-1495 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 495 keV - 1495 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,641449	0,558970394	464,939	2
0,641442	0,558987406	464,94	3
0,641299	0,559335037	464,932	4
0,637677	0,568192047	464,94	5
0,633204	0,579269872	465,009	6
0,629044	0,589713915	465,046	7
0,624875	0,600320064	465,129	8
0,62084	0,610720959	465,199	9
0,616553	0,621920581	465,356	10
0,612378	0,632978324	465,466	11
0,608179	0,644252761	465,611	12
0,603874	0,655974591	465,752	13
0,599615	0,667736798	465,821	14
0,595121	0,680330555	465,916	15
0,590275	0,694125619	466,096	16
0,584859	0,709813818	466,324	17
0,578495	0,728623411	466,643	18
0,571385	0,750133448	467,079	19
0,563623	0,774235615	467,602	20
0,555407	0,800481449	468,092	21
0,546781	0,828885788	468,636	22
0,537846	0,859268266	469,045	23
0,528704	0,891417504	469,656	24



Şekil 6.39. Çakışmasız yöntemde 10 µs ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ¹⁵²Eu verim dışadeğerleme fonksiyonları.

6.3.4. ^{166m}Ho Ölçümünün Sonuçları

^{166m}Ho aktivitesinin çakışmasız yöntem kullanılarak hesaplanmasında, çakışmalı yöntemde olduğu gibi enerji filtrelemesi uygulanarak 160 keV – 2050 keV ve 530 keV – 2050 keV gama enerji aralıkları seçilmiştir.

Aktivite hesabı için, seçilen gama enerji aralığındaki verilere 5 µs uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Enerji diskriminasyonuna uğramış beta sinyallerine de 5 µs uzamayan ölü zaman uygulanmıştır. Daha sonra gama sinyallerine 1 µs gecikme uygulanmıştır.

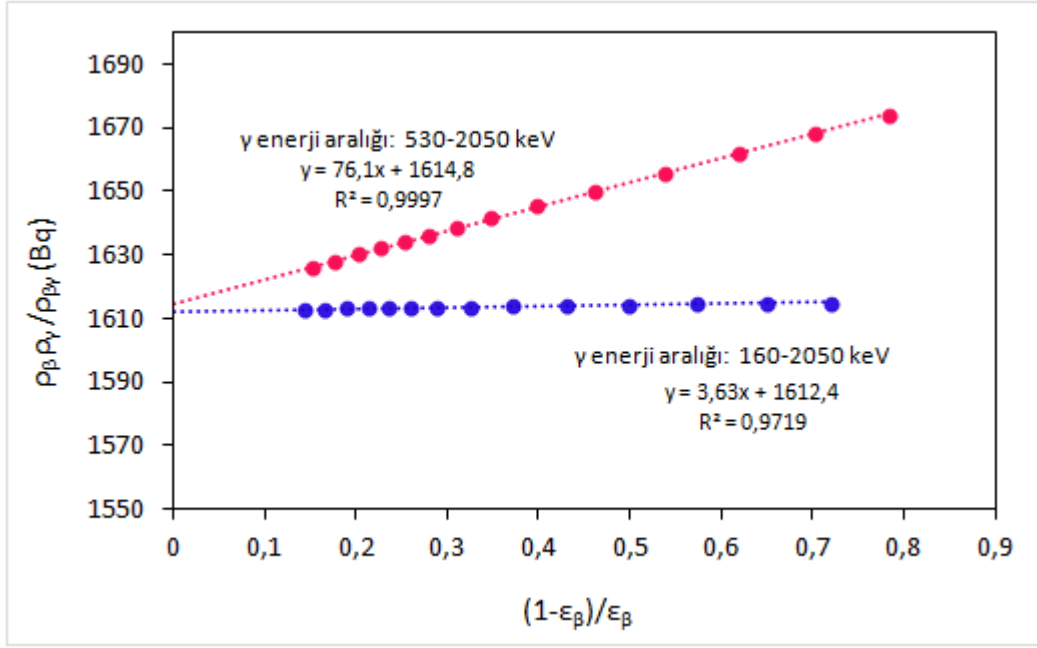
Çizelge 6.48. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 160-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 160 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,874759	0,143172005	1612,65	4
0,857901	0,165635662	1612,92	6
0,839986	0,190496032	1613,09	8
0,823992	0,213604016	1613,19	10
0,808761	0,236459226	1613,26	12
0,793232	0,260665228	1613,39	14
0,775695	0,289166489	1613,51	16
0,754711	0,325010501	1613,68	18
0,729185	0,371394091	1613,87	20
0,699246	0,430111863	1614,09	22
0,667168	0,498872848	1614,28	24
0,635674	0,573133399	1614,51	26
0,606471	0,648883459	1614,69	28
0,581069	0,720966013	1614,83	30

Çizelge 6.49. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 530-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 5 μs			
gama enerji aralığı = 530 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,867661	0,152523854	1625,85	4
0,849959	0,176527338	1627,99	6
0,831189	0,203095806	1630,16	8
0,814397	0,227902362	1632,19	10
0,798439	0,252443831	1634,12	12
0,782214	0,278422529	1636,12	14
0,763869	0,309124994	1638,49	16
0,741891	0,347906903	1641,56	18
0,715244	0,398124276	1645,33	20
0,683925	0,462148627	1650,25	22
0,650423	0,537461006	1655,83	24
0,617475	0,619498765	1662,09	26
0,58704	0,703461434	1668,13	28
0,560501	0,784118137	1674,09	30

Verim dışadeğerleme yönteminde $(1-\epsilon_\beta)/\epsilon_\beta$ değerlerine karşılık $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ değerlerinin grafiği çizildiğinde ve doğrusal bir fit yapıldığında (Şekil 6.40), 160 keV – 2050 keV gama enerji aralığında 1612,4 Bq, 530 keV 2050 keV aralığında 1614,8 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1613,6 Bq olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.40. Çakışmasız yöntemde 5 µs ölü zaman uygulamasında iki farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışadeğerleme fonksiyonları.

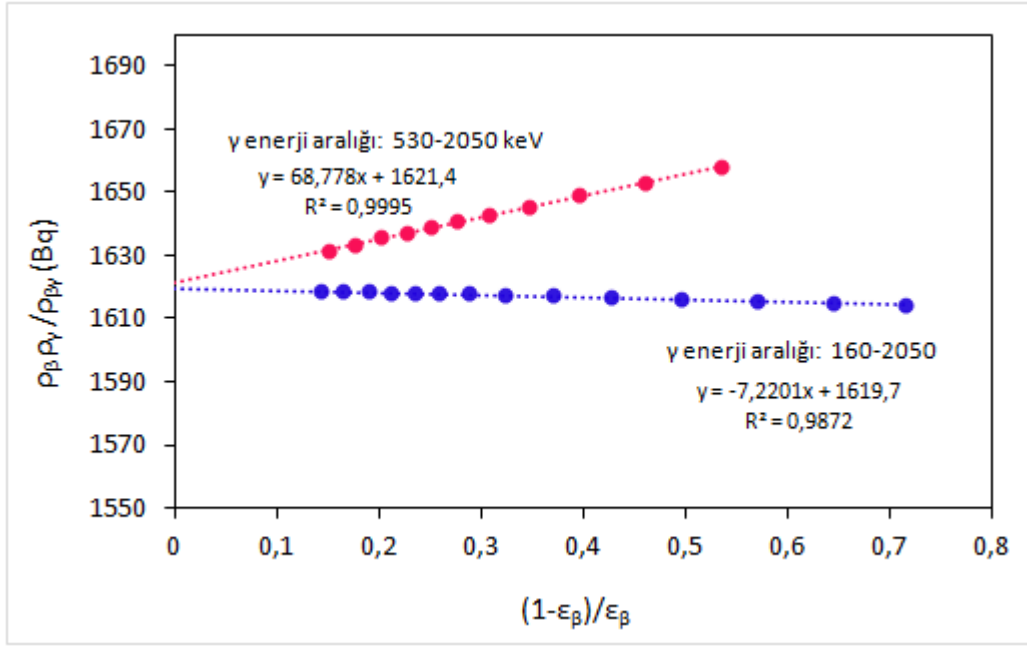
Aynı enerji aralıkları için gama ve beta sinyallerine 10 µs uzamayan ölü zaman uygulandığında ve gama sinyalleri 1 µs geciktirildiğinde elde edilen verim dışadeğerleme sonuçları Şekil 6.41'de gösterilmiştir. Verim dışadeğerleme yönteminde uygulanan doğrusal fit fonksiyonları sonucu, 160 keV – 2050 keV gama enerji aralığında 1619,7 Bq, 530 keV 2050 keV aralığında 1621,4 Bq aktivite değerleri bulunmuştur. Ortalama aktivite değeri ise 1620,5 Bq olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.50. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 10 μs ölü zaman değeri için 160-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 160 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,874727	0,143213826	1618,3	4
0,857898	0,165639738	1618,34	6
0,84003	0,190433675	1618,27	8
0,824067	0,213493563	1618,13	10
0,808887	0,236266623	1617,98	12
0,793416	0,260372869	1617,84	14
0,775944	0,288752797	1617,67	16
0,755043	0,32442788	1617,47	18
0,729625	0,370567072	1617,16	20
0,699815	0,428949079	1616,73	22
0,667905	0,497218916	1616,18	24
0,636581	0,570892	1615,59	26
0,607559	0,645930683	1614,9	28
0,582312	0,717292448	1614,24	30

Çizelge 6.51. ^{166m}Ho aktivite hesaplamasında 5 μs ölü zaman değeri için 530-2050 keV enerji aralığında hesaplanan beta verim değeri, sayım hızları oranı ve ilgili diğer parametreler.

ölü zaman = 10 μs			
gama enerji aralığı = 530 keV - 2050 keV			
Beta verimi (ϵ_β)	Verim oranı ($1-\epsilon_\beta$)/ ϵ_β	Sayım hızları oranı $\rho_\beta\rho_\gamma/\rho_{\beta\gamma}$ (Bq)	Beta enerji diskriminasyonu (kanal)
0,867646	0,152543779	1631,51	4
0,84996	0,176525954	1633,46	6
0,831228	0,203039359	1635,4	8
0,814459	0,227808889	1637,22	10
0,798544	0,252279148	1638,94	12
0,782366	0,278174154	1640,68	14
0,764079	0,308765193	1642,79	16
0,742174	0,347392929	1645,51	18
0,715617	0,397395534	1648,82	20
0,684409	0,461114626	1653,12	22
0,651052	0,535975621	1658,01	24



Şekil 6.41. Çakışmasız yöntemde 10 μ s ölü zaman uygulamasında üç farklı gama enerji aralığı için elde edilen ^{166m}Ho verim dışı değerlendirme fonksiyonları.

6.3.5. Belirsizlik Hesaplamaları

Çakışmaz yöntemde yapılan aktivite hesaplamalarının belirsizlik bütçesi oluşturulurken ana belirsizlik bileşenleri çakışmalı yöntemde olduğu gibi sayım istatistiği, verim dışı değerlendirme ve ölü zamandan kaynaklı olarak alınmıştır. Bu üç ana belirsizlik bileşeninin ve bu bileşenler kullanılarak hesaplanan toplam belirsizlik değerlerinin bulunduğu çizelgeler aşağıda verilmiştir. Çakışmalı ve çakışmasız yöntemlerde aynı enerji aralıkları kullanıldığı için, sayım istatistiği kaynaklı belirsizlik değerleri tekrar hesaplanmamıştır. Verim dışı değerlendirme ve ölü zaman kaynaklı belirsizlik değerleri ise tekrar hesaplanmıştır.

Çizelge 6.52. ^{60}Co aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem).

^{60}Co	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	852-2177 keV	852-2977 keV	852-2177 keV	852-2977 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,231	0,205	0,232	0,205
Verim dışıdeğerleme	0,012	0,006	0,011	0,006
Ölü zaman	0,231	0,237	0,231	0,237
Toplam belirsizlik	0,327	0,313	0,328	0,313

Çizelge 6.53. ^{133}Ba aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem)

^{133}Ba	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	53-602 keV	198-602 keV	53-602 keV	198-602 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,334	0,356	0,337	0,359
Verim dışıdeğerleme	0,026	0,031	0,029	0,033
Ölü zaman	0,213	0,179	0,213	0,179
Toplam belirsizlik	0,397	0,400	0,400	0,402

Çizelge 6.54. ^{152}Eu aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem)

^{152}Eu	ölü zaman 5 μs			ölü zaman 30 μs		
	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1			Belirsizlik değeri (%) k = 1		
Sayım istatistiği	0,458	0,332	0,373	0,458	0,354	0,375
Verim dışıdeğerleme	0,317	0,021	0,085	0,359	0,023	0,085
Ölü zaman	0,186	0,062	0,093	0,186	0,062	0,093
Toplam belirsizlik	0,587	0,338	0,394	0,611	0,360	0,396

Çizelge 6.55. ^{166m}Ho aktivite hesabına ait belirsizlik bütçesi (çakışmasız yöntem)

^{166m}Ho	10 μs ölü zaman		30 μs ölü zaman	
	160-2050 keV	530-2050 keV	160-2050 keV	530-2050 keV
Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri (%) k = 1		Belirsizlik değeri (%) k = 1	
Sayım istatistiği	0,171	0,179	0,180	0,176
Verim dışıadeğerleme	0,005	0,010	0,006	0,011
Ölü zaman	0,320	0,289	0,320	0,289
Toplam belirsizlik	0,363	0,340	0,367	0,339

Yukarıdaki çizelgelerde hesaplanan toplam belirsizlik değerleri kullanılarak 5 μs ve 10 μs ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan ^{60}Co aktivitesi değerleri Çizelge 6.30'da özetlenmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{60}Co aktivitesi $1226,4 \pm 3,9$ Bq bulunur.

Çizelge 6.56. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{60}Co aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri k = 2 için hesaplanmıştır).

^{60}Co	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	852-2177 keV	852-2977 keV	852-2177 keV	852-2977 keV
Aktivite (Bq)	$1224,1 \pm 8,0$	$1224,6 \pm 7,7$	$1228,1 \pm 8,0$	$1228,7 \pm 7,7$

5 μs ve 10 μs ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan ^{133}Ba aktivitesi değerleri Çizelge 6.31'de verilmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{133}Ba aktivitesi $1066,1 \pm 4,3$ Bq bulunur.

Çizelge 6.57. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{133}Ba aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{133}Ba	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	53-602 keV	198-602 keV	53-602 keV	198-602 keV
Aktivite (Bq)	1064,0 \pm 8,4	1065,2 \pm 8,5	1067,2 \pm 8,5	1067,9 \pm 8,6

5 μs ve 10 μs ölü zaman değerleri için üç farklı gama enerji aralığında bulunan ^{152}Eu aktivitesi değerleri Çizelge 6.32'de verilmiştir. Altı farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında ^{152}Eu aktivitesi 455,2 \pm 1,8 Bq olarak bulunur.

Çizelge 6.58. Çakışmasız yöntemle hesaplanan ^{152}Eu aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

^{152}Eu	5 μs ölü zaman			10 μs ölü zaman		
	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV	43-588 keV	176-1495 keV	495-1495 keV
Aktivite (Bq)	455,7 \pm 5,7	452,8 \pm 3,0	456,1 \pm 3,6	456,9 \pm 5,7	453,2 \pm 3,2	456,7 \pm 3,6

5 μs ve 10 μs ölü zaman değerleri için iki farklı gama enerji aralığında bulunan $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivitesi değerleri Çizelge 6.33'de verilmiştir. Bu dört farklı aktivite değerlerinin ortalaması alındığında $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivitesi 1617,1 \pm 5,7 Bq bulunur.

Çizelge 6.59. Çakışmasız yöntemle hesaplanan $^{166\text{m}}\text{Ho}$ aktivite değerleri (Belirsizlik değerleri $k = 2$ için hesaplanmıştır).

$^{166\text{m}}\text{Ho}$	5 μs ölü zaman		10 μs ölü zaman	
	160-2050 keV	530-2050 keV	160-2050 keV	530-2050 keV
Aktivite (Bq)	1612,4 \pm 11,7	1614,8 \pm 11,0	1619,7 \pm 11,9	1621,4 \pm 11,0

6.4. Farklı Yöntemler ile Bulunan Sonuçların Karşılaştırılması

4 $\pi\beta$ - γ çakışma sayım sisteminde yapılan ölçümler sonucunda çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem ve Monte Carlo simülasyonu kullanılarak bulunan aktivite değerleri Çizelge 6.60'da sunulmuştur.

Çizelge 6.60. Çakışmalı yöntem, çakışmasız yöntem ve Monte Carlo yöntemi ile bulunan aktivite değerlerinin karşılaştırılması (toplam belirsizlik değerleri k=2 için verilmiştir).

Radyonüklit	Çakışmalı yöntem	Çakışmasız yöntem	Monte Carlo simülasyonu
⁶⁰ Co	1222,6 ± 2,8	1226,4 ± 3,9	1213,7 ± 2,9
¹³³ Ba	1064,2 ± 3,8	1066,1 ± 4,3	1042,9 ± 9,2
¹⁵² Eu	454,7 ± 1,8	455,2 ± 1,8	466,3 ± 3,1
^{166m} Ho	1615,9 ± 3,1	1617,1 ± 5,7	1605,4 ± 8,4

Çakışmalı yöntem ve çakışmasız yöntem kullanılarak hesaplanan aktivite değerleri birbirlerine oldukça yakındır. İki yöntem arasında ⁶⁰Co için %0,3, ¹³³Ba için %0,18, ¹⁵²Eu için %0,1, ^{166m}Ho için ise %0,08 fark bulunmaktadır. 4 $\pi\beta$ - γ çakışma sayım sisteminde radyonüklit standardizasyonu yaparken, genel olarak hangi yöntemin daha doğru bir aktivite sonucu verdiğini söylemek mümkün değildir. Eğer her iki yöntem de kullanılırsa ve bu iki yöntem ile hesaplanan aktivite değerleri birbiriyle uyumlu olursa, yöntemlerde kullanılan düzeltmelerin ve bulunan değerlerin güvenilirliği artmış olur. Ölü zaman düzeltmesine olan duyarlılığından dolayı çakışmasız yöntem ile bulunan sonucun çakışmalı yöntem ile teyit edilmesi, o sonuca olan güveni artırır (Bryant, 1962).

Çakışmalı yöntem ile bulunan aktivite değerleri ile Monte Carlo yöntemi kullanılarak bulunan aktivite değerleri arasında ⁶⁰Co için %0,7 fark bulunurken, ¹³³Ba için %2,0, ¹⁵²Eu için %2,5 ve ^{166m}Ho için ise yaklaşık %0,7 fark vardır. Her iki yöntem arasında bulunan bu farkların kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

7. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı bünyesinde bulunan Radyonüklit Metrolojisi Laboratuvarlarına kurulumu yapılan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ dijital çakışma sayım sisteminde mutlak aktivite hesabı yapmak amacıyla kullanılmak üzere özgün bir veri analiz yazılımı geliştirilmiştir. Bu analiz yazılımında gerçek zamanlı çakışmalı ve çakışmasız yöntemlerin her ikisinin de kullanılması hedeflenmişti. Bu tür birincil ölçüm sistemlerinin veri analiz programları, genelde kullanıcılar tarafından geliştirilmektedir ve ticari olarak temin etmek zordur. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sisteminde yapılan ölçümler sonucu alınan veriler iyi bir veri analiz yazılımında işlenerek yüksek doğrulukta ve hassasiyette, düşük belirsizlikte radyoaktivite değerleri elde etmek mümkündür. Bu amaçla, önce, Monte Carlo yöntemi kullanılarak sayım sisteminin optimizasyonu yapılmıştır. EGS4 Monte Carlo kodu ile yapılan simülasyonlar sonucunda beta dedektörü olarak kullanılacak plastik sintilatör dedektörlerin ebatlarına karar verilmiştir ve bununla birlikte tüm sistemin geometrisi tasarlanmıştır.

Daha sonra, ölçüm sisteminden alınan verilerin analizi için çakışmalı yöntemin ve çakışmasız yöntemin her ikisinin de kullanıldığı, özgün algoritmalar üzerine kurulu bir sayısal çakışma sayımı yazılımı geliştirilmiştir. Yazılımı oluşturan alt program modülleri C++ programlama dilinde oluşturulmuştur ve derlenmiştir. Yazılımda kullanılan çakışmalı yöntemin ve çakışmasız yöntemin doğruluğunu yapmak amacıyla aktivite derişimi bilinen radyoaktif sıvı referans çözeltiler kullanılarak kaynaklar hazırlanmıştır. Kaynakların seçimi yapılırken, radyonüklitlerin bozunma şemaları göz önünde bulundurulmuştur. Basit bozunma şemasına sahip ^{60}Co ve ^{133}Ba radyonüklitlerinin yanı sıra oldukça karmaşık bozunma şemalarına sahip ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin de ölçümleri yapılmış ve geliştirilen yazılım bu dört radyonüklit için de uygulanarak aktiviteleri hesaplanmıştır. Çakışma sayımı yazılımı karmaşık bozunma şemalarına sahip radyonüklitler için oldukça tatmin edici sonuçlar vermiştir. Çakışmalı yöntem ve çakışmasız yöntem kullanılarak elde edilen aktivite sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. İki yöntem ile bulunan aktivite değerleri arasında %0,3'den daha küçük göreceli farklar vardır. İki

yöntemin de benzer sonuçlar vermesi, bu sonuçların doğruluğuna olan güveni artırmıştır.

Geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla, EGS4 kodu kullanılarak NaI dedektörünün ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için tepki fonksiyonları oluşturulmuş ve toplam dedektör verimi hesaplanmıştır. Bu verim değeri ve deneysel olarak bulunan gama sayım hızları kullanılarak ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radyonüklitlerinin aktiviteleri hesaplanmıştır. Yazılım ile bulunan aktivite değerleri ile Monte Carlo yöntemi ile bulunan aktivite değerleri arasında ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu ve $^{166\text{m}}\text{Ho}$ için, sırasıyla %0,7, %2,0, %2,5 ve %0,7 göreceli farklar olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan çakışma sayımı yazılımı, çakışmalı yöntemin ve çakışmasız yöntemin her ikisi için de, laboratuvarda bulunan $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemine hem basit hem de karmaşık bozunma şemalı radyonüklitler için uygulanabilir durumdadır. Mevcut durumda, kalibrasyon amaçlı kullanılan standardizasyonu yapılmış radyoaktif çözeltiler ülke dışından oldukça yüksek maliyetlerde temin edilmektedir. Ancak, standardize edilmemiş ve aktivitesi tam olarak bilinmeyen radyoaktif çözeltiler ise çok daha düşük maliyetlerde temin edilebilmektedir. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ çakışma sayım sistemi ve sisteme uygulanan bu yazılım kullanılarak, aktivitesi bilinmeyen radyoaktif çözeltilerin standardizasyonları yapılabilir ve referans kaynaklar olarak kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

- Anonim, Nuclear Physics, Stability: the N-Z curve, <https://a-levelphysicstutor.com/nucphys-NZ-curve.php> (Erişim tarihi: **9 Temmuz 2019**).
- Buckman, S. M., Ius, D., Digital coincidence counting, Nucl. Inst. Meth., A369, 368-374, **1996**.
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), Particle Counting in Radioactivity Measurements, ICRP Report 52, **1994**.
- A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 58, Bethesda, Maryland, **1985**.
- Nichols, A. L., Nuclear decay data: Observations and reflections, Appl. Radiat. Isot., 64, 1384-1391, **2006**.
- Baerg, A. P., Pressurized proportional counters for coincidence measurements. Nucl. Instr. Meth. 112, 95-99, **1973(a)**.
- Baerg, A. P., The efficiency extrapolation method in coincidence counting, Nucl. Instr. Meth., 112, 143-150, **1973(b)**.
- Baerg, A. P., Multiple channel $4\pi\beta\gamma$ anti-coincidence counting, Nucl. Instr. and Methods, 190, 345, **1981**.
- Bé, M.M., Coursol, N., Duchemin, B., Lagoutine, F., Legrand, J., Debertain, K. and Schönfeld, E., Table de radionucléides – introduction, Document CEA-ISBN 2-7272-0201-6, Commissariat à l'Énergie Atomique, France, **1999**.
- Bé, M. M., Christe, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmanko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schönfeld, A., Dersch, R., Table of radionuclides, vol. 1-A = 1 to 150, Monographie BIPM-5, Bureau International des Poids et Mesures, **2004a**.
- Bé, M. M., Christe, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmanko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schönfeld, A., Dersch, R., Table of radionuclides, vol. 1-A = 151 to 242, Monographie BIPM-5, Bureau International des Poids et Mesures, **2004b**.
- Bé, M. M., Christe, V., Dulieu, C., Browne, Baglin, C., E., Chechev, V., Kuzmanko, N., Helmer, R., Kondev, F., MacMahon, D., Lee, K. B., Table of radionuclides, vol. 3-A = 3 to 244, Monographie BIPM-5, Bureau International des Poids et Mesures, **2006**.

- Bobin, Ch. and Bouchard, J., A $4\pi(\text{LS})\beta\text{-}\gamma$ coincidence system using a TDCR apparatus in the β -channel, *Appl. Radiat. Isot.* 64 (2006) 124.
- Bryant, J., Anticoincidence counting method for standardizing radioactive materials, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 13 (1962) 273.
- Bryant, J., Advantage of anticoincidence counting for standardizing radionuclides emitting delayed gamam rays, *Standardization of Radionuclides*, p. 129, IAEA/STI/PUB/139, IAEA, Vienna, 1967.
- Buckman, S.M., Keightley, J.D., Smith, D. and Woods, M.J., The validation of a digital coincidence counting system, *Appl. Radiat. Isot.* 49, 1135-1140, 1998.
- Campion, P.J., The standardisation of radioisotopes by the beta-gamma coincidence method using high efficiency detectors, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 4, 232-248, 1959.
- Campion, P.J., Taylor, J.G.V. and Merritt, J.S., The efficiency tracing technique for eliminating self-absorption errors in 4pb-counting. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 8, 8-19, 1960.
- Cox, D.R. and Isham, V., A bivariate point process connected with electronic counters, *Proc. Roy. Soc. Lond.* A356, 149-160, 1977.
- Data sheet for BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 premium plastic scintillators, Saint-Gobain Ceramic & Plastics, Inc., 2018.
- Data sheet for 2005 scintillation preamplifier, Mirion Technologies, 2019.
- Dulieu, C., Christé, V. and Bé, M.M., A website dedicated to ionising radiation metrology. *Appl. Radiat. Isot.* 60, 133-137, 2004.
- Duran, M. T., Nedjadi, Y., Juget, F., Bochud, F., Bailat, C., Fast digital $4\pi\beta - 4\pi\gamma$ coincidence counting with offline analysis at IRA, *Appl. Radiat. Isot.* 134, 329-336, 2018.
- Gandy, A., Mesure absolue de l'activité des radionuclides par le méthode descoïnc idences bêta-gamma à l'aide de détecteurs de grande efficacité - Etude des coïncidences instrumentales, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 11, 75-91, 1961.
- Gandy, A., Mesure absolue de l'activité des radionuclides par le méthode des coïncidences bêta-gamma à l'aide de détecteurs de grande efficacité - Corrections de temps morts, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 13, 501-513, 1962.
- Grigorescu, E.L., Sahagia, M., Razdolescu, A., Luca, A. and Radwan, R.M., Standardisation of ^{110}mAg and ^{75}Se by the beta-efficiency extrapolation method, *Appl. Radiat. Isot.* 49, 1165-1170, 1998.

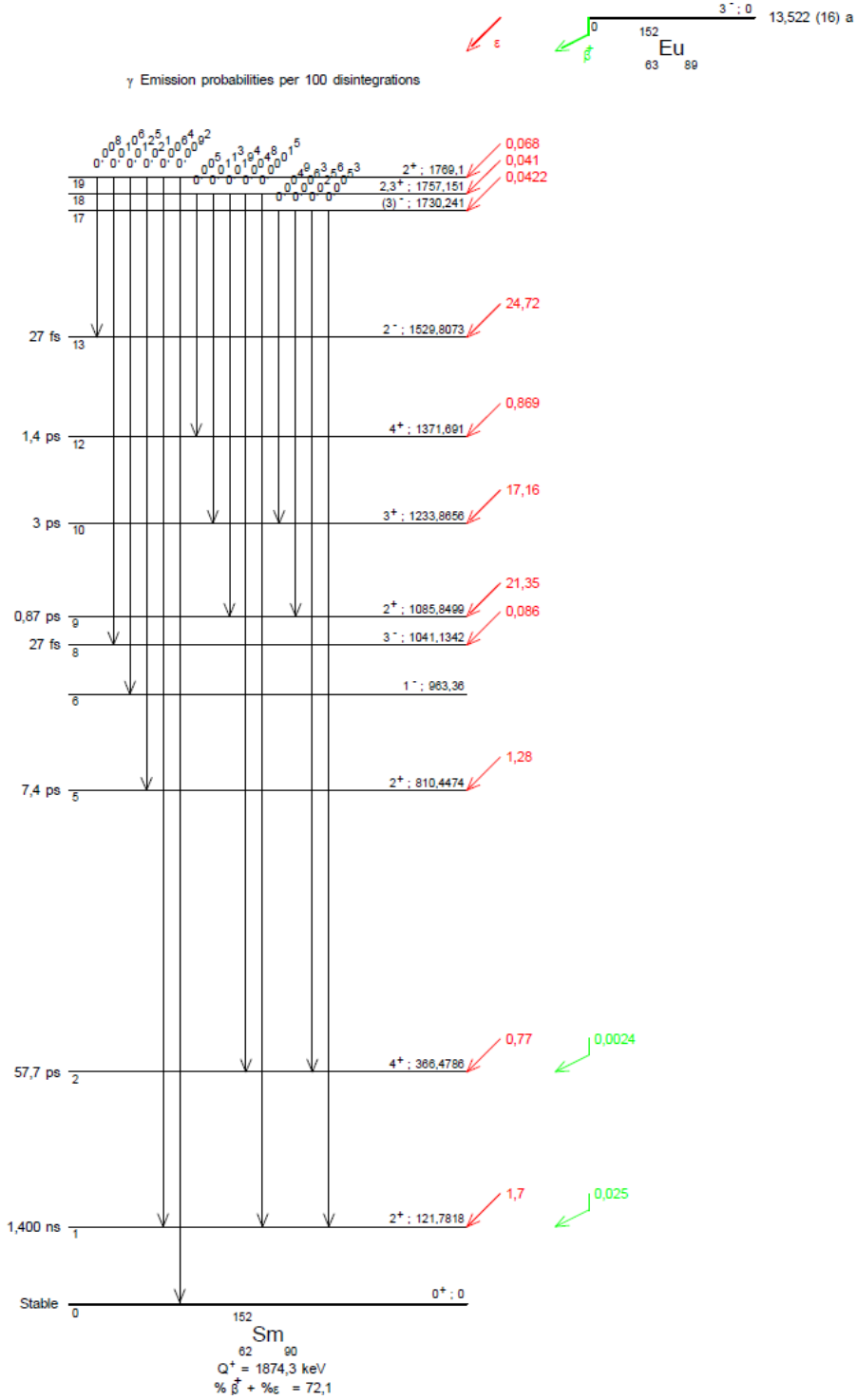
- Photomultiplier tubes and related products, Hamamatsu Photonics K.K., Electron Tube Division, **2016**.
- Havelka, M., Auerbach, P., Sochorova, J., Software coincidence counting, Appl. Radiat. Isot. 56 265-268, **2002**.
- Havelka, M., Auerbach, P. and Sochorová, J., Standardisation of ^{54}Mn and ^{65}Zn using a software coincidence counting system, Appl. Radiat. Isot. 64 1215-1219, **2006**.
- Havelka, M., and Sochorová, J., Standardisation of ^{124}Sb and ^{152}Eu using software coincidence counting system, Appl. Radiat. Isot. 68 1330-4, **2010**.
- Hayward, R.W., On the determination of disintegration rates by the coincidence method using high efficiency detectors, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 12 (**1961**) 148.
- Houtermans, H. And Miguel, M., 4π - β - γ coincidence counting for the calibration of nuclides with complex decay schemes, Int. J. Appl. Radiat. Isot., 13 (**1962**) 137.
- Hwang, H.Y, Park, T.S., Kim, K.H., Jeon, W.J., Oh, P.J., Lee, M.K., Han, K.H. and Yun, H.J., An improved method of correlation counting using a bi-dimensional data acquisition system, Nucl. Instr. and Meth. A369, 363-367, **1996a**.
- Hwang, H.Y., Lee, C.B., Park, T.S. and Kim, H.J., A new method of isomer lifetime measurement, Nucl. Instrum. Meth. A383, 447-450, **1996b**.
- Hwang, H.Y., Park, T.S., Oh, P.J., Lee, J.M. and Lee, M.K., Measurement of accidental coincidences for higher activity sources, Nucl. Instrum. Meth. A425, 488-491, **1999**.
- Hwang, H.Y., Park, T.S., Oh, P.J., Lee, J.M. and Han, K.H., Development of a three dimensional data acquisition method for standardisation of beta emitting radionuclides, Appl. Radiat. Isot. 52, 393-397, **2000**.
- Hwang, H-Y, Sung, K.S., Lee, K.B., Lee, J.M. and Park, T.S., Standardization of radionuclide by $\beta(\text{LS})$ - γ coincidence counting using the geometry variation method, Appl. Radiat. Isot. 64, 1119-1123, **2006**.
- Judge, S. M., Arnold, D., Chauvenet, B., Colle, R., De Felice, P., Garcia-torano, E., Watjen, U., 100 Years of radionuclide metrology, Applied Radiation and Isotopes, Volume 87, Pages 27-31, **2014**.
- Karam, L., International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM), <https://physics.nist.gov/ICRM/index.html>, **2018** (Erişim tarihi: 28.08.2019).

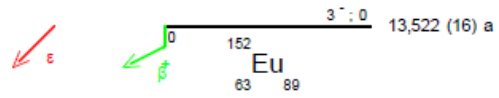
- Keightley, J.D., DCC data format; Report DCC/DCCDataFormat/01, National Physical Laboratory, Teddington, UK, **2002**.
- Keightley, J.D., Data Simulation for the validation of $4\pi\beta\text{-}\gamma$ digital coincidence counting analysis software, Report GE/R/IM/11/05, Institute for Reference Materials and Measurements, Geel, Belgium, **2005**.
- Keightley, J.D., DCC_SIM: A simulation routine for the validation of $4\pi\beta\text{-}\gamma$ digital coincidence counting software. Chapter 17 in "Applied Modeling and computations in nuclear science"., ACS Symposium Series 945, American Chemical Society, Washington, DC, USA, **2006**.
- Keightley, J. D., On the Development and Validation of a Digital Coincidence Counting System for the Primary Standardization of Radionuclides, Doktora Tezi, University of London, Londra, **2008**.
- Keightley, J.D. and Watt, G.C., Digital Coincidence Counting (DCC) and its use in the corrections for out-of-channel gamma events in $4\pi\beta\text{-}\gamma$ Coincidence Counting, Appl. Radiat. Isot. 56, 205-210, **2002**.
- Knoll, G. F., Radiation Detection and Measurement, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, **2000**.
- Koskinas, M.F. and Dias, M., A coincidence system for radionuclide standardization using surface barrier detectors. Nucl. Inst. Meth. A280, 327-331, **2004**.
- Kossert, K., Marganiec-Galazka, J., Mougeot, X., Nahle, O. J., Activity determination of ^{60}Co and the importance of its beta spectrum, Appl. Radiat. Isot. Volume 134, P. 212-218, **2018**.
- MacDonald, L., Counting Statistics and Error Propagation, Nuclear Medicine Physics Lectures, Imaging Research Lab., Radiology Dept., **2011**.
- Müller, J. W., Counting statistics of a Poisson process with dead time, Report BIPM-111, Bureau International des Poids et Mesures, Sevres, France, **1970**.
- Müller, J. W., Sur la perte de coïncidences vraies par un temps mort cumulatif, Rapport BIPM-77/2, 4 p., **1977(b)**.
- Nal sintilasyon dedektörü özellikleri, **2018**.
- Nedjadi, Y., Elektronik posta yoluyla özel yazışma, **Mart 2019**.
- Nedjadi, Y., Bailat, C., Bochud, F., Primary activity measurements with a $4\pi\beta\text{-}4\pi\gamma$ coincidence counting system, Appl. Radiat. Isot. 70, 249-256, **2012**.
- Nelson, W. R., Hirayama, H. and Rogers, D. W. O., EGS4 code system, Technical Report SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, CA, USA, **1985**.

- Park T.S, Oh P.J, Lee M.K, Kim K.H, Jeon W.J., Ungyong Mulli 8(3) 311-316 (in Korean), **1995**.
- Parzen, E., Stochastic Processes, Section 4.1, San Francisco, **1962**.
- Photomultiplier tube series 9390B data sheet, ET Enterprises Limited, DS_9390B Issue 10, **2014**.
- Pomme, S., Fitzgerald, R., and Keightley, J., Uncertainty of nuclear counting, Metrologia, 52, S3-17, **2015**.
- Recommended data, Laboratoire National Henri Becquerel, http://nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm, (Erişim tarihi: **19 Temmuz 2019**).
- Sahagia, M., Ivan, C., Grigorescu, E.L., Campogni, M., de Felice, P. and Fazio, A., Standardisation of ^{65}Zn by $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting method with efficiency extrapolation, Appl. Radiat. Isot. 60, 423-427, **2004**.
- Schönfeld, E., Janssen, H., Precise measurement of dead time, Nucl. Instr. Methods, A339, pp. 137-143, **1994**.
- Simpson, B.R.S. and Meyer, B.R., Standardization and half-life of ^{201}Tl by the $4\pi(x,e)\text{-}\gamma$ coincidence method with liquid scintillation counting in the 4π -channel, Appl. Radiat. Isot. 45, 669-673, **1994**.
- Smith, D., Improved correction formulae for coincidence counting, Nucl. Inst. and Methods, 152, 505-519, **1978**.
- Smith, D., Some developments in the Cox-Isham theory of coincidence corrections, including the extension to the computer-discrimination method, Appl. Radiat. Isot. 38, 813-821, **1987**.
- Unno, Y., Sanami, T., Sasaki, S., Hagiwara, M., Yunoki, A., Evaluation of absolute measurement using a 4π plastic scintillator for the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting method, Appl. Radiat. Isot. 134, 302-306, **2018**.
- User manual for DT5730-DT5725 digitizers, CAEN Electronic Instrumentation, **2016**.
- User manual UM5960 for CoMPASS multiparametric DAQ software, CAEN Electronic Instrumentation, **2018**.
- Williams, A., Campin, P. J., On the relative time distribution of pulses in the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence technique, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 16, 555, **1965**.

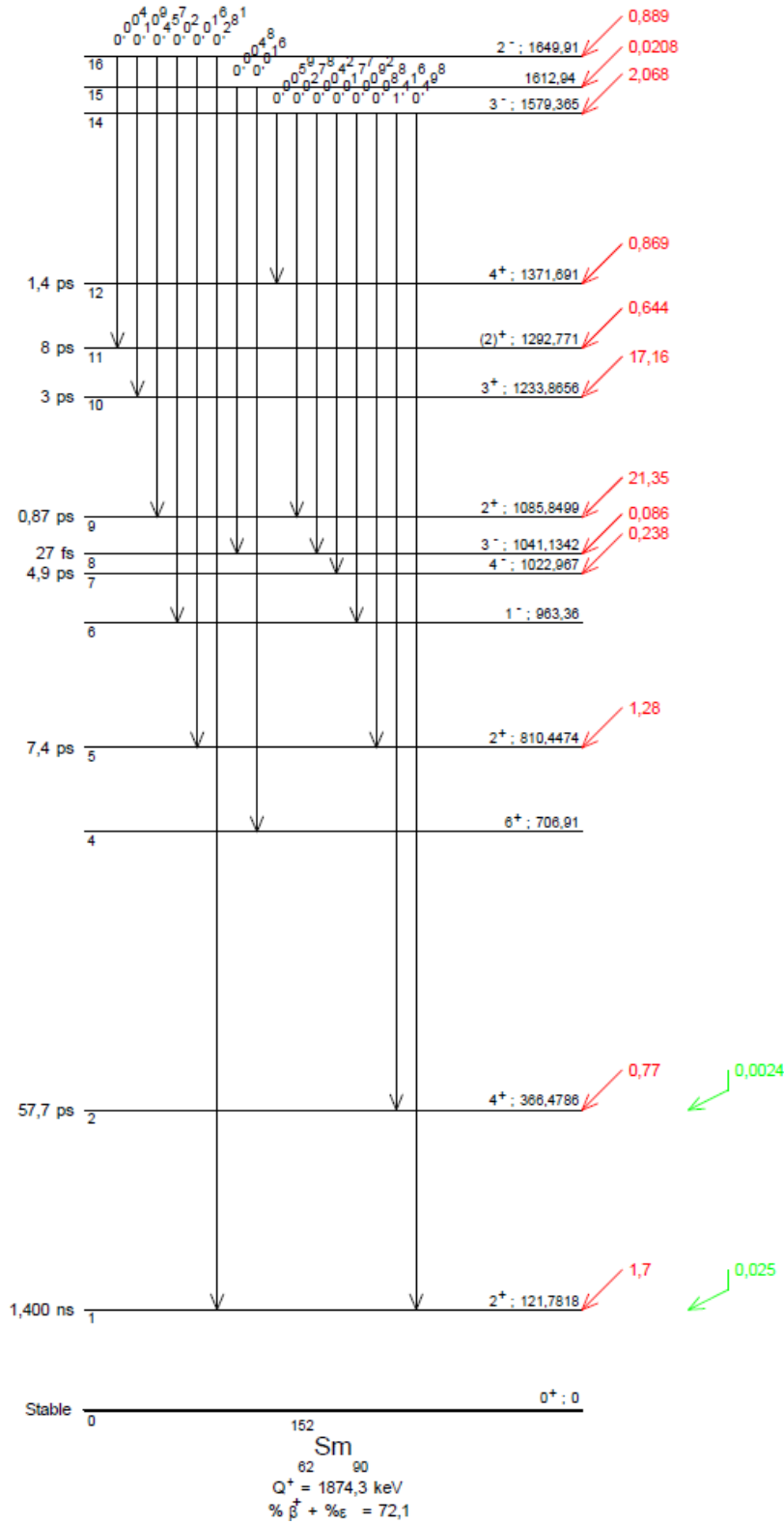
EKLER

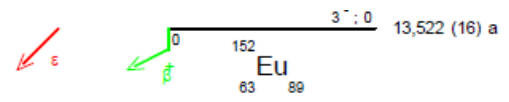
Ek 1. ^{152}Eu radyonüklitine ait bozunma şeması (Nucleide, 2019)



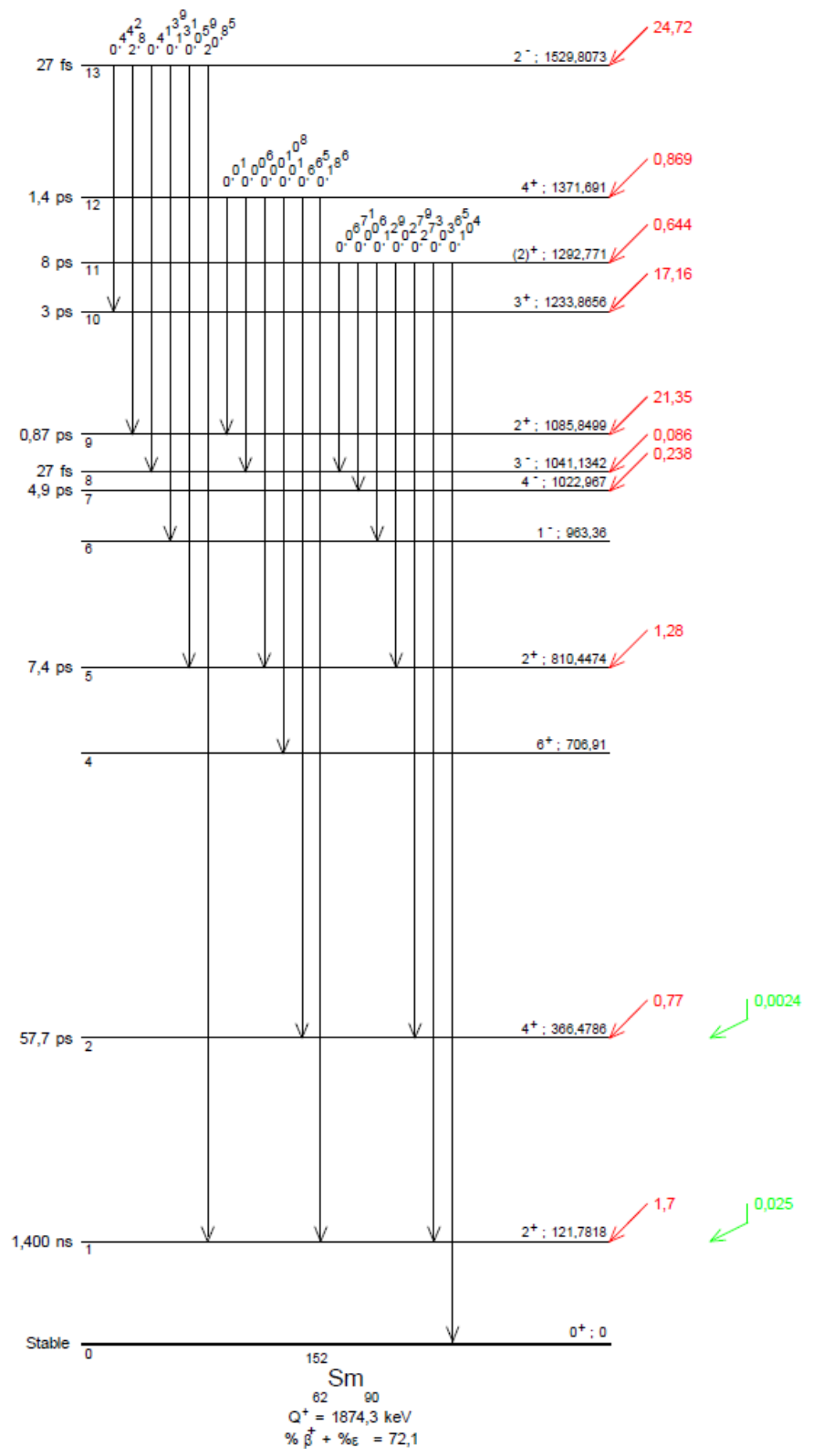


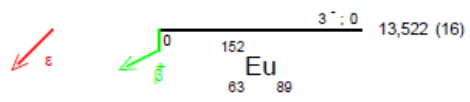
γ Emission probabilities per 100 disintegrations



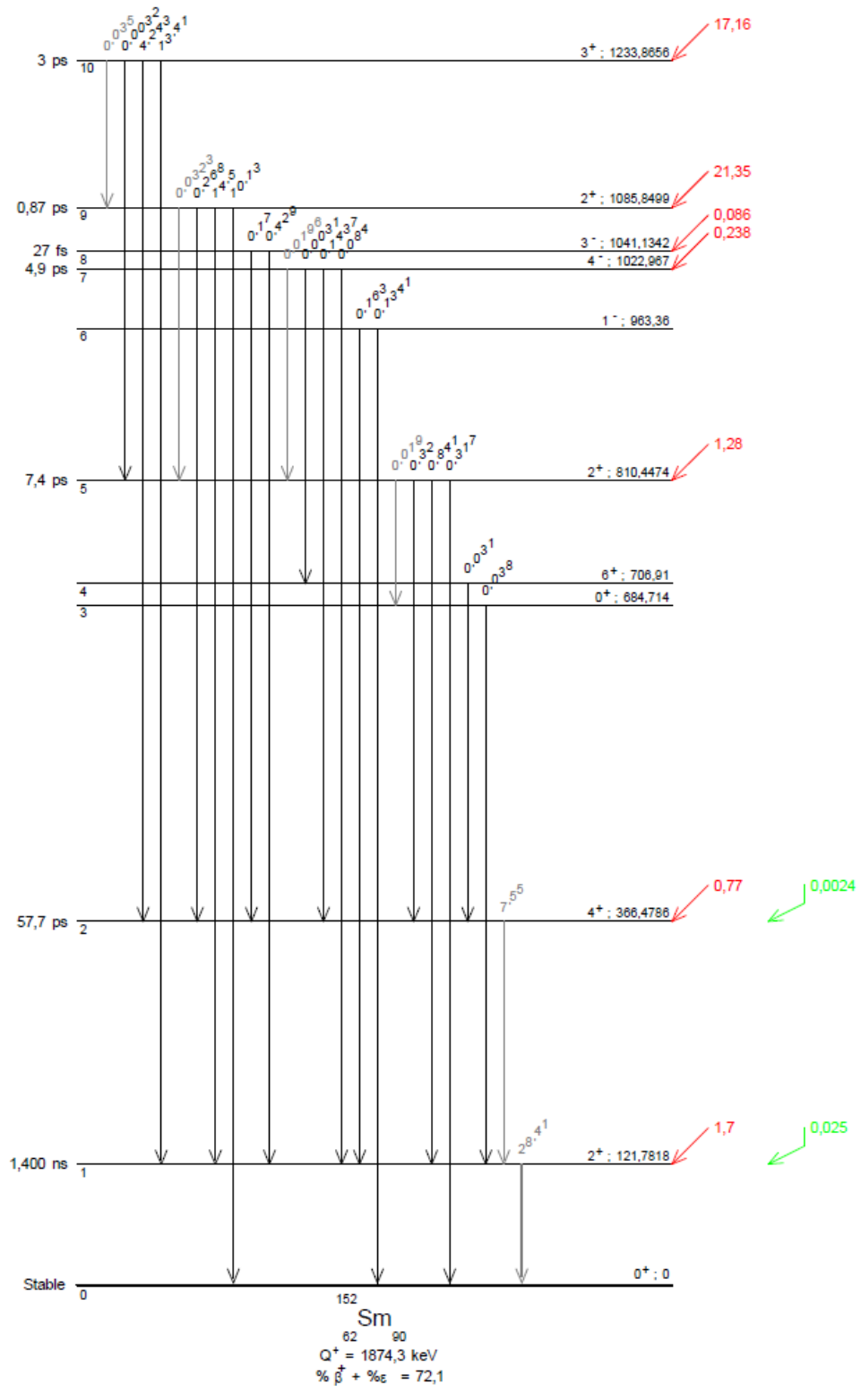


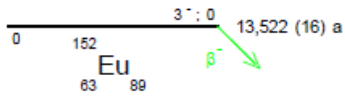
γ Emission probabilities per 100 disintegrations



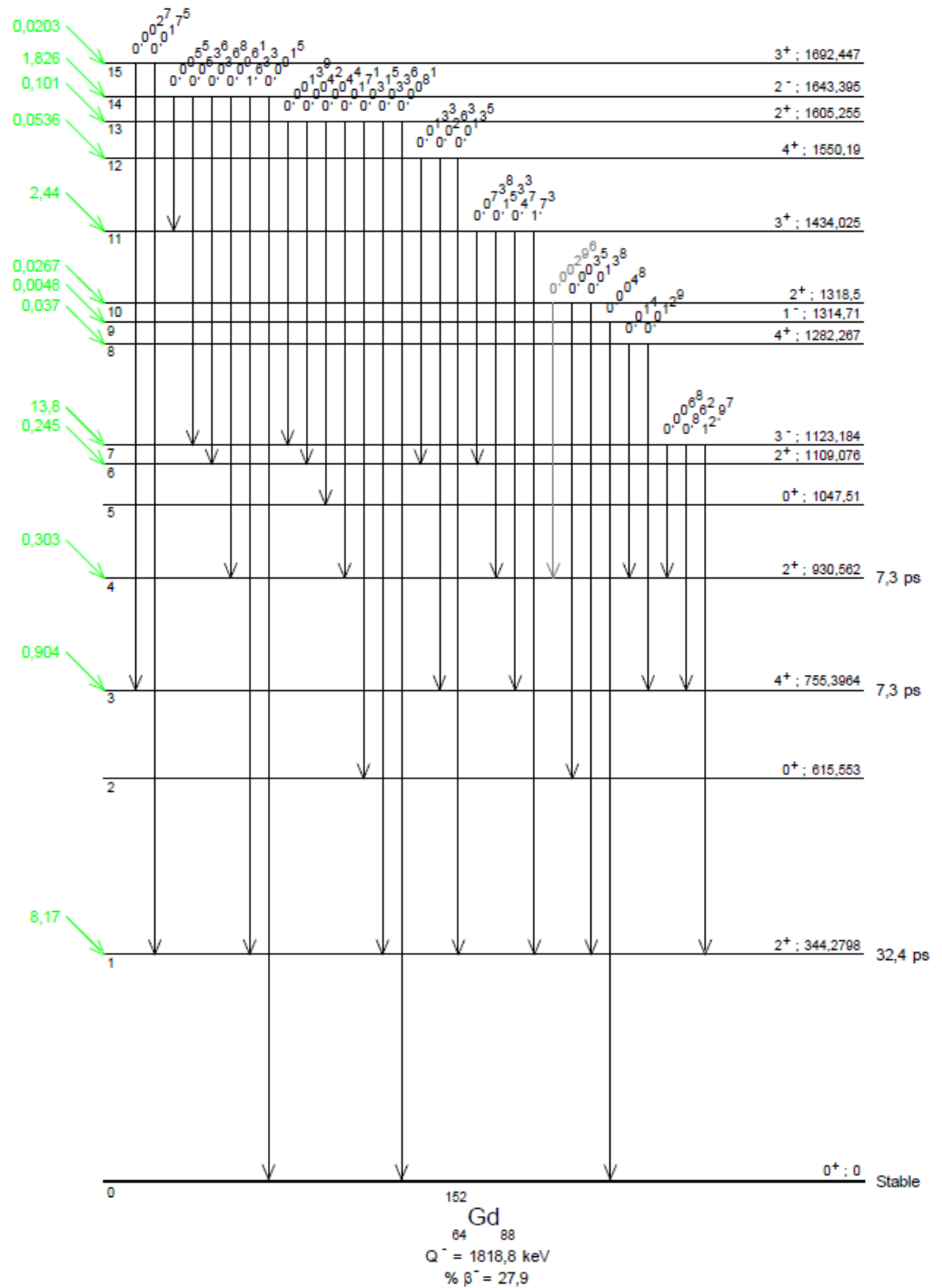


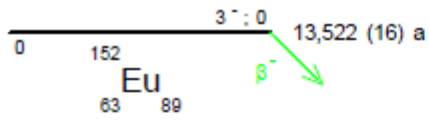
γ Emission probabilities per 100 disintegrations



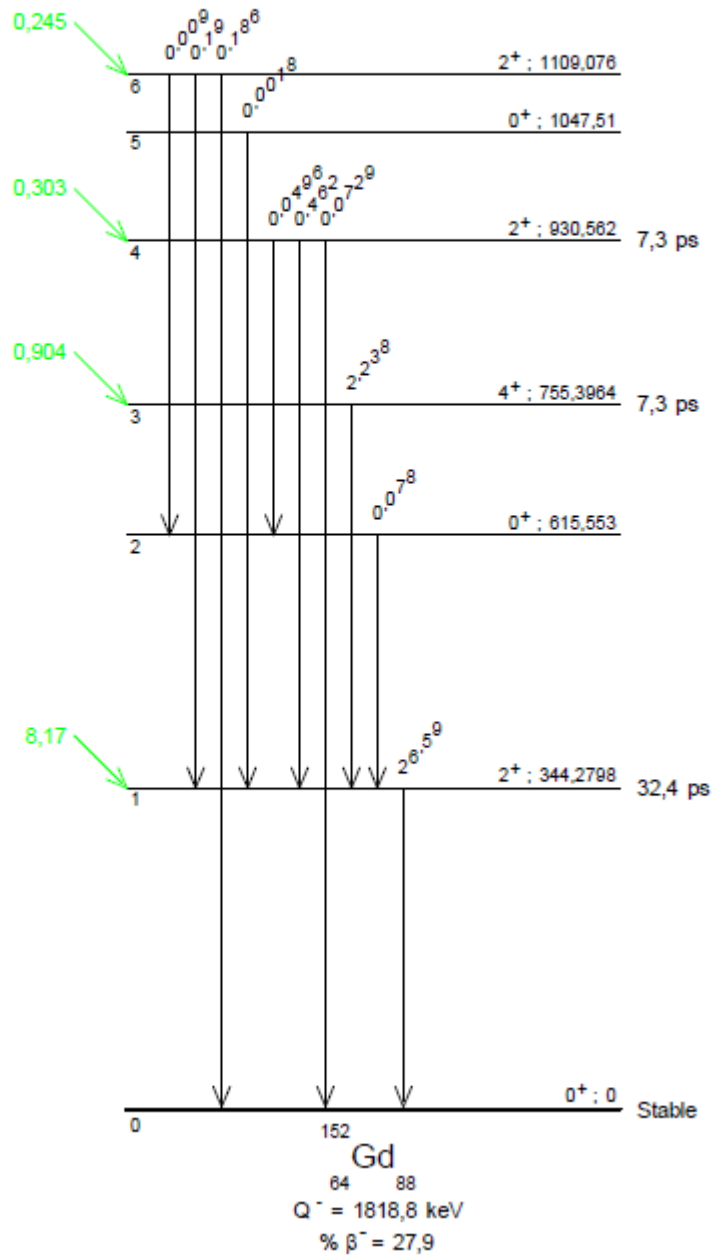


γ Emission probabilities per 100 disintegrations

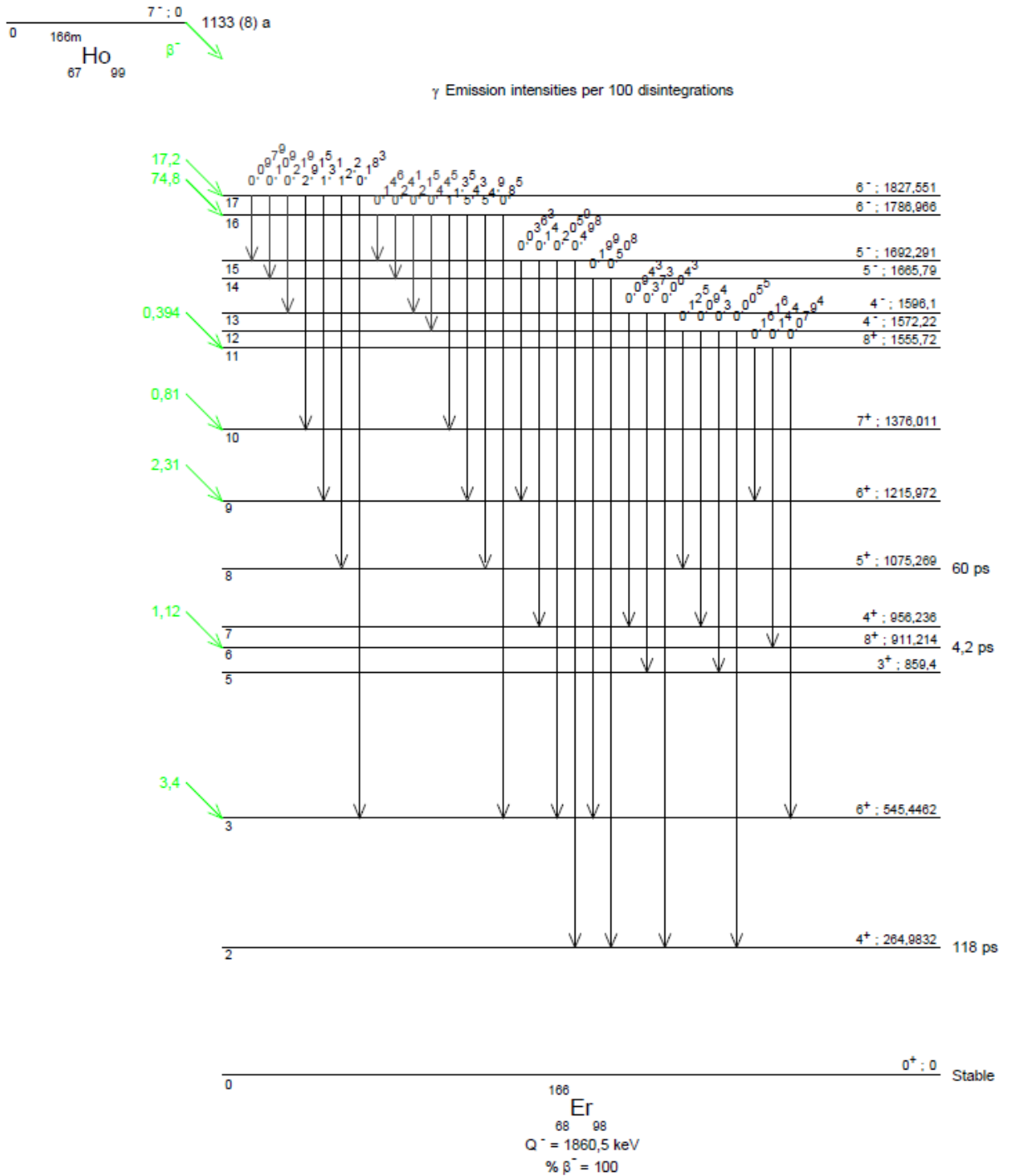


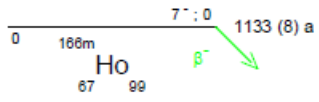


γ Emission probabilities per 100 disintegrations

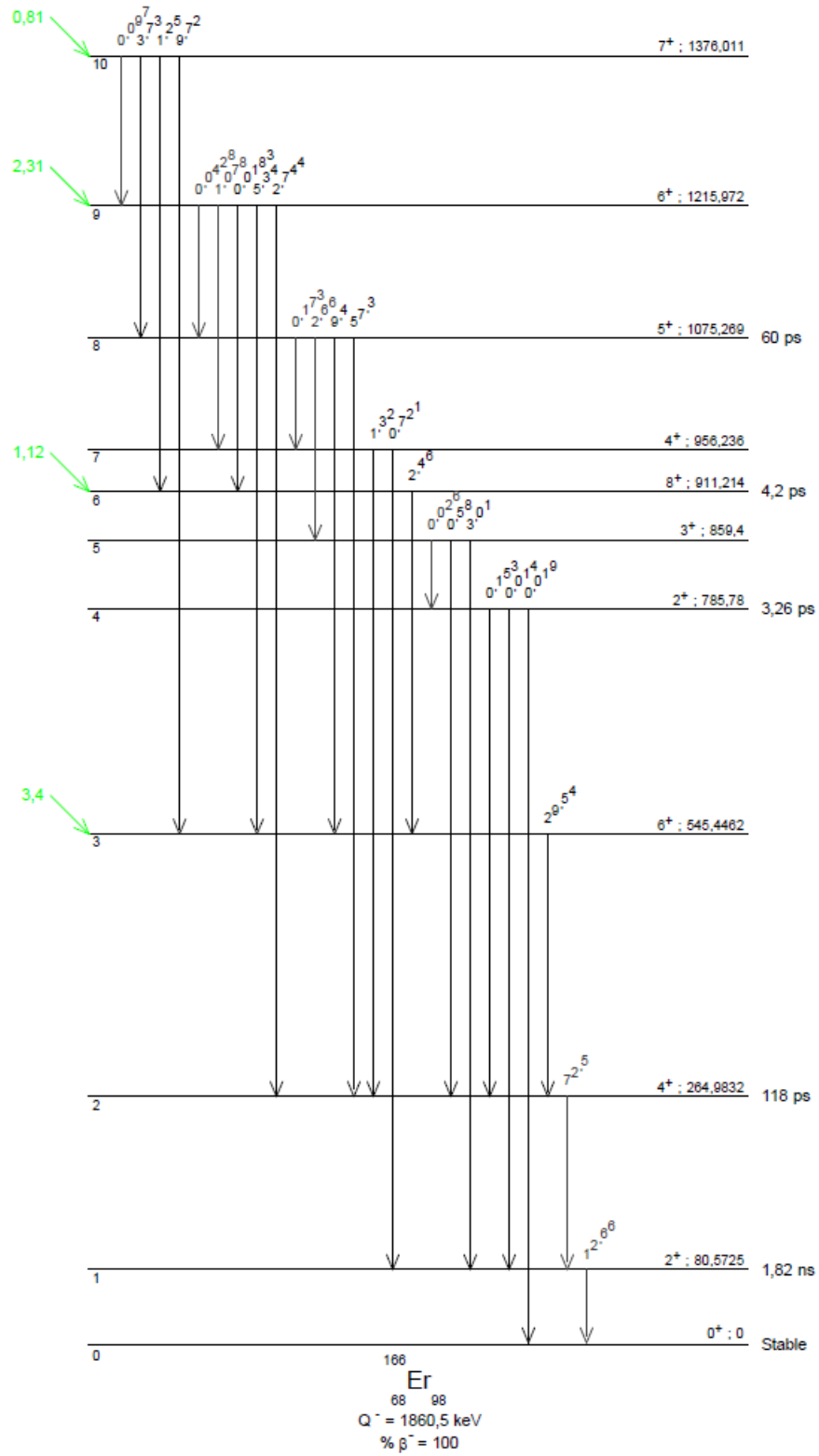


Ek 2. ^{166m}Ho radyonüklitine ait bozunma şeması (Nucleide, 2019)





γ Emission intensities per 100 disintegrations



Ek 3. LINEST Fonksiyonu ve Belirsizlik Hesaplama Yöntemi

Microsoft Excel LINEST fonksiyonu, en küçük kareler yöntemini kullanarak doğrusal bir fit denklemini ve bu fit doğrusunun istatistiksel bilgilerini verir. LINEST fonksiyonu, EXCEL programında istatistiksel fonksiyonlar kategorisinde bulunan gömülü bir fonksiyondur.

LINEST fonksiyonunun hesaplama yönteminde, elde edilen doğrusal fit denklemini $y = mx + b$ olursa, doğrunun eğim değeri m ve y eksenini kesen sabit değer b aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$m = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2}$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

Fit doğrusunun y eksenini kestiği nokta olan b değerinin standart belirsizliği ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u(b) = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \sqrt{\frac{x_i^2}{n(x_i - \bar{x})^2}}$$

Ek 4. Sayım İstatistiğinin Belirsizliğini Hesaplama

Sayım istatistiğinden kaynaklanan belirsizlik hesaplanırken radyoaktif bozunmanın Poisson dağılımına uyma prensibi kullanılmıştır. Yüksek sayım değerlerinde ise Poisson dağılımı Gaussian dağılımına doğru bir yaklaşım göstermektedir. Tek bir ölçümde elde edilen sayım değeri ortalamaya, ortalama da varyansa eşit olacağından, standart sapma, sayım değerinin kareköküne eşit olacaktır (MacDonald, 2011).

Tek bir ölçüm için elde edilen sayım değeri S olarak tanımlanırsa,

$$S = \bar{S} = V$$

olacaktır. Burada \bar{S} ortalama sayım değeri, V ise varyans değeridir. Bu durumda sayım değerinin standart sapması

$$StS = \sqrt{V} = \sqrt{\bar{S}}$$

olarak hesaplanır. Bu standart sapma değeri sayım istatistiğinden kaynaklı belirsizlik değerine eşit olarak alınmıştır.

Ek 5. Toplam Belirsizlik Hesaplama

Aktivite hesaplanırken; sayım istatistiğinden kaynaklı belirsizlik $u(S)$, verim dışadeğerleme ynteminden kaynaklı fit doğrusunun fit doğrusunun y eksenini kestiği değerin belirsizliği $u(F)$ ve ölü zaman kaynaklı belirsizlik $u(\ddot{O})$ olarak tanımlanırsa, aktivitenin toplam belirsizlik değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$u(A) = \sqrt{u(s)^2 + u(F)^2 + u(\ddot{O})^2}$$



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 27/09/2019

Tez Başlığı / Konusu: **DİJİTAL ÇAKIŞMA YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE 4Pİ-BETA-GAMA SAYIM SİSTEMİNDE KARMAŞIK BOZUNMA ŞEMALİ BELİRLİ RADYOİZOTOPLARA UYGULANMASI**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 180 sayfalık kısmına ilişkin, 27/09/2019 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

27/09/2019

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: NAMIK KEMAL ŞAHİN

Öğrenci No: N10243730

Anabilim Dalı: NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı: DOKTORA

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

DOÇ. DR. ŞULE ERGÜN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Namık Kemal Şahin
Doğum yeri : Çıldır
Doğum tarihi : 12/09/1977
Medeni hali : Evli
Yazışma adresi : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon ve
Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı Saray
M. Atom C. No:27 Kahramankazan Ankara
Telefon : 507 614 4997
Elektronik posta adresi : namikkemal.sahin@taek.gov.tr
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölümü
Doktora : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölümü

İş Tecrübesi

2014 - : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu