

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAHADA GAMA SPEKTROMETRİK AKTİVİTE ÖLÇÜMÜ İÇİN HPG_e
DEDEKTÖRÜNÜN ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K İÇEREN ÖZEL BLOKLAR
KULLANILARAK KALİBRASYONUNUN YAPILMASI VE SAHA
ÖLÇÜMÜNE UYGULANMASI

MİNE ÖZGÜR

MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI

ANKARA

2019

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Mine ÖZGÜR tarafından hazırlanan “Sahada Gama Spektrometrik Aktivite Ölçümü İçin HPGe Dedektörünün ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K İçeren Özel Bloklar Kullanılarak Kalibrasyonunun Yapılması ve Saha Ölçümüne Uygulanması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: *Prof. Dr. Haluk YÜCEL*

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Prof. Dr. Mustafa KARADAĞ

Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

Adı, Soyadı: Mine ÖZGÜR

İmza:



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAHADA GAMA SPEKTROMETRİK AKTİVİTE ÖLÇÜMÜ İÇİN HPGe DEDEKTÖRÜNÜN ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K İÇEREN ÖZEL BLOKLAR KULLANILARAK KALİBRASYONUNUN YAPILMASI VE SAHA ÖLÇÜMÜNE UYGULANMASI

MİNE ÖZGÜR

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Bu tezde, saha şartlarında (in-situ) gama spektrometrik aktivite ölçümü için yüksek enerji ayırma güçlü bir HPGe dedektörünün özel kalibrasyon blokları kullanılarak kalibrasyonun yapılması ve daha sonra bu sistemin radyoaktif kirlenmiş madde gömülü bir sahada uygulamasının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, U, Th ve K elementel içerikleri bilinen ve MTA tarafından 1987 yılında Ankara Etimesgut Askeri Havaalanında cevher numunelerinin betona karıştırılarak elde edilen $8\text{m}\times 8\text{m}\times 0,375\text{m}$ boyutlarındaki dört farklı blok kullanılmıştır. Bu bloklar $1\text{m}\times 1\text{m}$ boyutundaki karelaja uygun olarak işaretlenmiş ve her blok üzerinde 49 adet ölçüm yapılmıştır. Bu tezde, sahada gama spektrometrik ölçüm için, U, Th, K ve boş kalibrasyon bloklarının bir HPGe sisteminin gerçek bir kalibrasyonu için laboratuvar koşullarında yapılan kalibrasyonla uyumlu olduğu görülmüştür.

Tez çalışmasında, %40 bağıl verimli ve elektrik soğutmalı p-tipi HPGe dedektör (OrtecTrans SPEC 100) kullanılmıştır. Bloklar kullanılarak kalibre edilen bu HPGe dedektör ile, TAEK'in SANAEM yerleşkesinde radyoaktif madde gömü alanında yüzeyden ölçümle, toprakta bulunan doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite derişimleri belirlenmiştir. Radyoaktif gömü alanında aktivite derişim sonuçları ^{137}Cs için $4,1\pm 0,7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{238}U için $27,1\pm 4,1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th için $29,0\pm 4,0 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ve ^{40}K için $535,5\pm 69,6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ bulunmuştur.

HPGe sistemiyle elde edilen söz konusu blokların güncel aktivite değerleri; yerinde U, Th, K cevher aramaları veya jeolojik araştırmalar öncesinde ya da havadan tarama araçlarına entegre kullanılacak radyasyon ölçüm cihazlarının deneye dayalı kalibrasyonlarının yapılması için önemlidir. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak tartışılmıştır.

2019, 53 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyoaktivite, in-situ, gama spektrometri, HPGe, kalibrasyon

ABSTRACT

Master's Thesis

CALIBRATION OF A HPGe DETECTOR IN-SITU GAMMA-RAY SPECTROMETRY BY USING ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K SPECIFIC CALIBRATION PADS AND AN APPLICATION TO IN-SITU ACTIVITY MEASUREMENTS

MİNE ÖZGÜR

Ankara University Institute of Nuclear Sciences

Department of Medical Physics

Health Physics Master's Degree Program

Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

In this thesis, it is aimed to calibrate a high energy resolution HPGe detector using special calibration pads for in-situ gamma spectrometric activity measurement and then to apply this system in a radioactive contaminated area. From the calibrated HPGe detector using four different calibration pads of 8mx8mx0,375m was used to measure the radioactivity in the contaminated soil area in TAEK-SANAEM. The calibration pads built at Ankara Etimesgut Military Airport, are line marked into 1mx1m size grids and then the activity measurements are then performed on each block.

In this thesis, a 40% relative efficiency and electrically cooled p-type HPGe detector (OrtecTrans SPEC 100) was used for in-situ measurements utilizing the known contents of U, Th, K and blank concrete calibration pads. Their known activity values are found to be consistent with those measurements performed by the present HPGe system on the pads. The measured activity from the surface of in radioactive material burial areas in SANAEM-TAEK was found to be 4.1 ± 0.7 Bq·kg⁻¹ for ^{137}Cs , 27.1 ± 4.1 Bq·kg⁻¹ for ^{238}U , 29.0 ± 4.0 Bq·kg⁻¹ for ^{232}Th and 535.5 ± 69.6 Bq·kg⁻¹ for ^{40}K .

The current activity values of the calibration pads obtained by the HPGe system are useful data to perform experimental calibrations of radiation measuring devices to be used prior to site U, Th, K ore explorations or geological surveys or integrated into airborne screening tools. The measured results obtained are discussed in detail.

2019, 53 pages

Key Words: Radioactivity, in-situ, gamma spectrometry, HPGe, calibration

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, araştırma problemimi belirleyen, yol gösteren ve bana her konuda yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e;

Tez çalıőmalarım süresince, deneysel çalıőmalarımda beni tam destekleyen TAEK-SANAEM'den Nükleer Enerji Yüksek Müh. Sayın Hasan DİKMEN'e;

Çalıőmalarım boyunca bana her zaman destek olan eőim Sinan ÖZGÜR ve kızım Doğa Nur ÖZGÜR'e

Çok teşekkür ederim.

Mine ÖZGÜR
Ankara, Ağustos 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Çevresel Radyoaktivitenin Kaynağı	4
2.2 Yerinde (in-situ) Gama Spektrometrik Yöntemin Temel Prensipleri	4
2.3 Yerinde Gama Spektrometride Dedeksiyon Verimi.....	6
2.4 Yerinde uygulama için gama spektrometresi seçimi	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1 Kullanılan Cihazlar ve Materyaller	12
3.1.1 Dedektör	12
3.1.2 Enerji kalibrasyonu	13
3.1.3 Dedektörün temel fiziksel özellikleri	13
3.1.4 Kullanılan materyaller.....	15
3.1.5 Spektrum verileri toplama ve değerlendirme	22
3.1.6 Verimin hesaplanması için dedektörün modellenmesi	23
3.2 Yöntem	25
3.2.1 Laboratuvar ölçümleri ve modellemeler ile verim değerinin belirlenmesi.....	25

4. BULGULAR	33
4.1 Verim Kalibrasyon Sonuçları	33
4.2. Kalibrasyon Blokları ile Sahada Yapılan Ölçümler	44
4.3 Sarayköy’de Sahada Yapılan Ölçümler	47
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53



SİMGELER DİZİNİ

A	Aktivite (Bq veya Ci)
Bq	SI Aktivite birimi; 1 parçalanma/saniye.
cps	Saniye başına sayım
E	Enerji
eTh	Radyoaktif dengedeki toryum
eU	Radyoaktif dengedeki uranyum
ε	Sayım verimi
f_γ	Gama yayınlanma olasılığı
⁴⁰K	Potasyum-40 izotopu
μ	Lineer soğurma katsayısı (cm⁻¹)
μ/ρ	Kütle soğurma katsayısı (cm²/gr)
ppm	mg/ kg veya μg/g.
²²⁶Ra	Radyum-226 izotopu
²³²Th	Toryum-232 izotopu
²³⁸U	Uranyum-238 izotopu

KISALTMALAR DİZİNİ

AÜ-NBE	Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
EFT	Verim Transfer Katsayısı
HPGe	Yüksek Saflıkta Yarı İletken Germanyum
MCA	Çok Kanallı Analizör
MTA	Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
Nal (TI)	Katkılı Talyum Sodyum İyodür
PTB	Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology)
TCC	Gerçek Çakışma Düzeltmesi
TAEK-SANAEM	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
TAEK-RHTD	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi
UAEA	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
GML	Gama Spektrometri Laboratuvarı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 In-situ gama spektrometride genel bir ölçüm düzeneği	6
Şekil 3.1 Ortec Trans-SPEC 100 HPGe Dedektör	12
Şekil 3.2 HPGe dedektör kristal konfigürasyonu.....	14
Şekil 3.3 Silindirik numune kabı.....	18
Şekil 3.4 Kalibrasyon bloklarının üstten görünümü ve kesit görünümü.....	21
Şekil 3.5 Isotopic supervisor 4.0	22
Şekil 3.6 Gespecor yazılımı ile dedektör geometrisinin modellenmesi	23
Şekil 3.7 DETEFF	25
Şekil 3.8 Gespecor yazılımı ile nokta kaynak modellenmesi.	27
Şekil 3.9 Gespecor yazılımı ile verim hesaplarında kullanılan parametreler.....	28
Şekil 3.10 Kaynak dedektör geometrileri.....	30
Şekil 3.11 DETEFF yazılımı ile HpGe dedektör geometrisinin modellenmesi.....	30
Şekil 3.12 DETEFF yazılımı ile nokta kaynak geometrisinin modellenmesi.....	31
Şekil 3.13 DETEFF yazılımı ile hacim kaynak geometrisinin modellenmesi.....	31
Şekil 4.1 In-situ nokta kaynak verim kalibrasyonu eğrisi.....	36
Şekil 4.2 Nokta kaynak mutlak verim-Gespecor verim yüzde fark dağılımı.....	37
Şekil 4.3 Kalibrasyon bloklarının DETEFF yazılımı ile modellenmesi.	41
Şekil 4.4 Kalibrasyon bloklarının kalınlığının sayım sistemi verimine yüzdesel katkısı	43
Şekil 4.5 Kalibrasyon bloklarının genişliğinin sayım sistemi verimine yüzdesel katkısı	43
Şekil 4.6 Kalibrasyon bloku üzerinde in-situ HPGe dedektör ile ölçüm sistemi	44
Şekil 4.7 Kalibrasyon blokları üzerinde yapılan ölçüm konumları.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Dedektörün temel özellikleri.....	14
Çizelge 3.2 Dedektör kurulum boyutları ve malzemeleri	14
Çizelge 3.3 PTB nokta kaynakların özellikleri	16
Çizelge 3.4 U, Th ve K'un nükleer bilgileri	18
Çizelge 3.5 RGTh, RGU ve RGK standart kaynakların sertifika aktivite derişimleri....	19
Çizelge 3.6 U, Th, K ve boş kalibrasyon bloklarının içerikleri	22
Çizelge 4.1 Nokta kaynak için belirlenen verim değerleri.....	34
Çizelge 4.2 Hacim kaynak için belirlenen verim değerleri.....	38
Çizelge 4.3 DETEFF ve Gespecor ile elde edilen ETF değerlerinin karşılaştırılması....	39
Çizelge 4.4 Adi betona ait elementel yapı	40
Çizelge 4.5 Kalibrasyon bloklarının aktivite içerikleri	41
Çizelge 4.6 Kalibrasyon bloklarında elde edilen ETF değerleri	42
Çizelge 4.7 Kalibrasyon bloklarının ETF yaklaşımı ile belirlenen aktivite değerleri.....	46
Çizelge 4.8 TAEK SANAEM yüzey toprağının analiz sonuçları.....	47
Çizelge 5.1 Kalibrasyon bloklarının bu tez çalışmasında elde edilen aktivite değerlerinin MTA tarafından verilen değer ile karşılaştırılması.....	49

1. GİRİŞ

Yerinde (in-situ) gama spektrometrik yöntem; doğal çevre şartlarında gerçek zamanlı aktivite sonuçlarının elde edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Birçok yönüyle laboratuvarında uygulanan gama spektrometrik yöntemden farklıdır. Öncelikle dış saha şartlarında çalışabilen kararlı bir ölçüm sistemi gerektiren bu yöntemde, cihazın saha koşullarına göre kalibre edilmesi en önemli husustur. Yerinde (in-situ) gama spektrometrik yöntem, kaza koşullarında veya herhangi bir bölgenin radyoaktif kirlenme derecesinin sahaya özgü belirlenmesi amacıyla birçok durumda bir zorunluluktur. Çünkü, normalde, sahadan alınan numunelerin laboratuvarında ölçülmesi o bölgeyi gerçek anlamda temsil etmez. Örneğin ¹⁵²Eu kirlenmesine maruz kalmış bir bölgeyi veya nükleer kaza sonrası kontamine olmuş çayların gömüldüğü çay fabrikası bahçelerinin yüzey kirliliğinin tespitinde yerinde yapılacak radyoaktivite ölçümleri ancak güvenilir sonuçları verebilir.

Normal koşullarda sahadan alınan numunelerde, laboratuvar ortamında numune hazırlama ve laboratuvar ölçümleri zaman almaktadır ve tam sahayı temsil edemeyecek şekilde toplanabilen örnekler üzerinden ön kestirmeler yapılması herhangi bir bölgedeki kontaminasyonun tespitinde analizcilerin ve karar vericilerin yanlış sonuca ulaşmasına sebep olabilmektedir. Bu durum, zaman ve emek kaybına neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için yerinde (in-situ) gama spektrometrik teknikler geliştirilmiştir (Beck vd. 1964, Beck vd. 1972).

Bu yöntem çevredeki radyasyon kaynaklarının kompozisyonu ve dağılımı için hızlı ve detaylı bilgi sunar. Çünkü sadece çevresel dozun artışı ile ilgileniliyorsa, doz ve doz hızı ölçerler, iyon odaları, sintilatörler gibi sistemler kullanılır, ancak mevcut numunelerin radyonüklit içeriği hakkında spektral bilgi olmadan bir sonuç elde edilemez.

In-situ gama spektrometri yönteminin rutin uygulaması için güvenilir model hesaplamalarının ve dedektör kalibrasyonlarının çok iyi yapılması gerekmektedir. Çevresel izleme çalışmalarında geleneksel olarak kullanılan dedektörlerden; NaI(Tl), Ge(Li), n-tipi veya p-tipi HPGe dedektörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmalar, teknolojik gelişmeler ile birlikte oda sıcaklığında soğutulma ihtiyacı duymayan sintilatörler ve sahada elektriksel soğutmalı yarı iletken dedektörlerin giderek artarak kullanılması sayesinde yaygınlaşmaktadır. Ancak, bu dedektör sistemlerinden

NaI(Tl) kristalinin enerji ayırım gücünün düşük olması, sahada bulunabilen doğal radyonüklitlerin (^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th) dışındaki kirlenme kaynaklı yapay ve çok enerjili radyoizotopların (^{133}Ba , ^{152}Eu gibi), tanımlanmasına tam imkan vermemektedir. Sıcaklıktan kaynaklanan sistemdeki kazanç kaymaları nedeniyle, spektral karmaşıklık çözümlenmeyi daha da güçleştirmektedir. Bu nedenle, yerinde güvenilir radyonüklit tanımlaması için ortam sıcaklığında kararlı çalışan ve spektrumlarda spektral kaymaların minimumda olduğu, yüksek enerji ayırma gücü olan yüksek saflıktaki yarı iletken Germanyum (HPGe) dedektörlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle, sıvı azot soğutmalı olanlardan ziyade elektrik soğutmalı dedektör sistemlerin kolay kullanımı ve saha çalışması için kararlı olması nedeniyle bu sistemler üzerinde yöntem geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. (Helfer vd. 1988). Çevresel radyoaktivitenin belirlenmesinde in-situ gama spektrometrik yöntem, ilk defa H.L.Beck tarafından 1964'te NaI(Tl) dedektörleri için geliştirilmiş ve daha sonra yarı iletken dedektörlere uygulanmıştır.

Toprak içerisindeki veya yüzeyinde bulunan çevresel radyoaktiviteye neden olan radyonüklitlerin tanımlanması ve aktivite değerlerinin tespiti için çeşitli yönlerini dikkate alan (örneğin, gama yayınlıyıcı, beta veya alfa yayınlıyıcı radyonüklitlere, aktivite yüzeyde veya toprak içinde veya çamur içinde ya da bitki kaplı bir bölgede) güvenilir yöntemler ve çalışma öncesi uygun ölçüm cihazların seçimini ve bunların sahaya özgü özel kalibrasyonların yapılmasını gerektiren güvenilir ve hassas yöntemler gereklidir.

Bu nedenle bu tezde, saha şartlarında (in-situ) gama spektrometrik aktivite ölçümü için uygun bir HPGe dedektörünün, MTA'nın U, Th, K ve doğal fon içeren özel yapılmış beton kalibrasyon blokları kullanılarak kalibrasyonunun yapılması ve daha sonra bu sistemin, TAEK-SANAEM'in radyoaktif kirlenmiş madde gömülü bir sahasında uygulamasının yapılması amaçlanmıştır. In-situ yöntemi ile U, Th ve K elementel içerikleri bilinen ve MTA tarafından 1987 yılında Ankara Etimesgut Askeri Havaalanında kurulu alanda alınan özel izinlerle ölçümler yapılmıştır. Tez çalışmasında, %40 bağıl verimli ve elektrik soğutmalı p-tip HPGe dedektör (OrtecTrans SPEC 100) kullanılmıştır. Sahada gama spektrometrik ölçüm için U, Th, K ve boş beton kalibrasyon bloklarının bir HPGe sisteminin gerçek bir kalibrasyonu için laboratuvar koşullarında yapılan kalibrasyonla olan uyumu da araştırılmıştır.

Bu tez dört bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde, yerinde (in-situ) gama spektrometrik yöntem açıklanmıştır. İkinci bölümde kullanılan cihaz, kalibrasyon kaynakları ve kalibrasyon blokları ile kullanılan simülasyon modelleri açıklanmıştır. Tezin üçüncü bölümünde elde edilen bulgular sunulmuş, verim kalibrasyon doğrulamaları ve gömülü alandaki yapılan radyoaktivite ölçümleri sunulmuştur. Son dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır ve geleceğe yönelik öneriler yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Çevresel Radyoaktivitenin Kaynağı

İnsan yaşadığı çevrede, farklı kaynaklardan dış ışınlanmaya maruz kalır. Bilindiği üzere insanın aldığı dış ışınlanma dozuna iki bileşen katkı verir. İrtifa ve bölgesel koordinatlara göre de değişen kozmik radyasyonun yanı sıra yersel (terrestrial) gama yayınlı radyonüklitlerden ileri gelir. (Yücel 2013) Bu nedenle çevresel radyasyon kaynakları olarak adlandırılan yerden gelen ışınlanma iki ana grupta tanımlanabilir. Birinci grup, toprak içinde düzensiz bir şekilde dağılmış olan potasyum (^{40}K), uranyum serisi (^{238}U) ve toryum serisi (^{232}Th) ve eser miktarda ^{87}Rb radyonüklitleridir. İkinci grup ise, nükleer denemeler veya nükleer/radyasyon kazaları neticesinde atmosfere salınan ve dolayısıyla toprağın yüzeyinde birikmiş ^{137}Cs , ^{134}Cs gibi fisyon ürünleridir veya çevreye dağıtılmış ^{131}I , ^{152}Eu , ^{133}Ba , ^{60}Co gibi düzenleyici kurumun kontrolü dışında kalmış, radyoaktif kirleticiler olarak adlandırılacak medikal veya endüstriyel kullanımı yoğun olan radyoizotoplardır.

Bu iki ana grupta bulunan radyonüklitlerin çevresel aktivite derişimleri, insana ve çevreye olabilecek etkileri nedeniyle izlenmesi bir zorunluluktur. Bunların geçici derişimleri ve geniş bir çevreye yayılımı söz konusu olabilir. Böylece hem karasal, hem hava ve hem de sucul ortamlar beklenmedik şekilde kirletilebilir. ALARA ilkesi gereği, insanın dış ışınlanmasına neden olan, yapay ve doğal kaynaklı bu radyoaktivitenin pratik olarak en düşük seviyede tutulması gerekmektedir (Marouf vd. 1993; UNSCEAR, 2000)

2.2 Yerinde (in-situ) Gama Spektrometrik Yöntemin Temel Prensibi

Yerinde (in-situ) gama radyoaktivitenin belirlenmesi için gama yayan bir radyonüklitin çevresel aktivite derişimi, A ile bu radyonüklitin spektrumdaki gama pikinin net sayım hızı N_f arasındaki orana bağlı olarak yapılır. N_f aynı zamanda incelenen radyonüklitin doz hızı \dot{D} ile de ilişkilidir. Bu amaçla, dönüşüm faktörleri (N_f/A , N_f/\dot{D}) çevredeki kaynak dağılımına, dedektör verimine, gama enerjisine ve gama yayınlanma olasılığına bağlıdır. Bu bağımlılıklar aynı zamanda ayrılabilir ve dönüşüm faktörleri üç bağımsız niceliğin bir çarpımı olarak Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2 deki gibi ifade edilebilir (Beck vd. 1972):

$$\frac{N_f}{A} = \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{N_0}{\varphi} \cdot \frac{\varphi}{A} \quad (2.1)$$

$$\frac{N_f}{\dot{D}} = \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{N_0}{\varphi} \cdot \frac{\varphi}{\dot{D}} = \frac{N_f}{A} \cdot \frac{A}{\dot{D}} \quad (2.2)$$

N_f : Dedektöre her yönden gelen gama ışınlarının belirli bir E enerjisindeki toplam sayım hızı (cps)

A: Toprağın içindeki aktivite derişimi ya da birim yüzeydeki kaynak aktivitesi ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$)

N_0 : Dedektör simetri eksenine paralel yönden gelen (0°) gama ışınlarının spesifik E enerjisindeki sayım hızı (cps)

φ : Enerji, kaynak dağılımı ve yer özelliklerinin bir fonksiyonu olarak spesifik bir radyonüklitin birim toprak konsantrasyonundaki dedektördeki toplam akı hızı. ($\gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)

\dot{D} : Havada (aynı noktada) soğurulan doz hızı (nGy/h)

N_0/φ (Dedektör Verimi): Birim akı hızı nedeniyle dedektör simetri eksenine paralel yönden gelen gama ışınları için tam enerji pik verimidir ($\text{cps} / \gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Bu terim sadece dedektöre bağlıdır ve gelen gama enerjisinin bir fonksiyonudur.

φ/A ve φ/\dot{D} dedektör parametrelerinden bağımsız değildir. Bu nicelikler farklı kaynak dağılımları ve enerjileri için hesaplanabilir.

N_f/N_0 dedektör veriminin anizotropik (yöne bağımlılık) karakteri gereği açısız düzeltme faktörüdür ve varsayılan kaynak dağılımlarını dikkate alır.

Çalışmada kullanılan dedektör kristalinin silindirik geometride olduğu dikkate alınırsa;

$$\frac{N_f}{N_0} = \frac{\int_0^{\pi/2} R(E, \vartheta) \frac{d\varphi}{d\vartheta} d\vartheta}{\int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{d\vartheta} d\vartheta} \quad (2.3)$$

Burada $R(E, \vartheta)$ gelen fotonun dedektör eksenine göre gelme açısına dedektör hassasiyetinin bağımlılığını ifade eder (ϑ gelen fotonun dedektör eksenine göre gelme açısı). $\frac{d\varphi}{d\vartheta}$ ise yerden 1 m yukarıda her yönden gelen foton akısının açısız dağılımıdır.

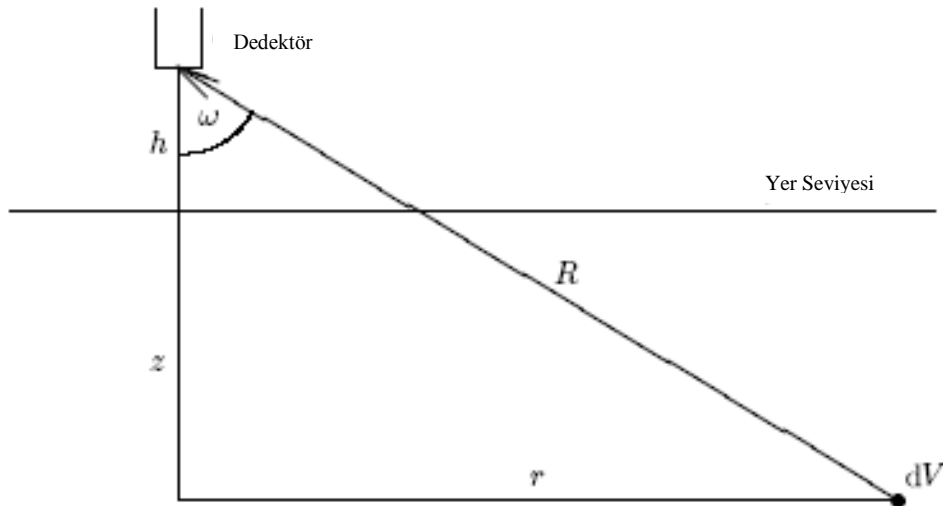
N_0/ϕ_0 ve $R(E, \vartheta)$ dedektörün kalibrasyonu ile belirlenir. ϕ/A , ϕ/\dot{D} ve $\frac{d\phi}{d\vartheta}$ ise kaynak dağılımı basit bir dağılım ise analitik yöntemlerle hesaplanabilir. Eğer daha gerçekçi zor bir kaynak dağılımı ise daha ileri seviye hesaplama teknikleri ile belirlenebilir (Andrasi vd. 1987). Pratikte bunun kolay yolu ise, deneysel kalibrasyon ölçümleri ve model hesaplamalarının bir kombinasyonu, çevresel kaynak dağılımının bazı tipik durumlarında çok sıklıkla oluşan radyonüklitlerin en yüksek olasılıklı gama enerjileri için kalibrasyon faktörleri elde edilebilir.

2.3 Yerinde Gama Spektrometride Dedeksiyon Verimi

N_0/ϕ_0 ve dedektör veriminin enerji ve açısal bağımlılığının bir fonksiyonu olan $R(E, \vartheta)$ 'nin belirlenmesi için farklı noktasal standart kaynaklar kullanılarak kalibrasyon yapılması gereklidir.

Bu bağımlılık düşük enerjilerde çok daha önem kazanır, çünkü dedeksiyon dedektör yüzeyinin yakınında oluşur. Artan foton enerjisi ile dedeksiyon daha çok dedektörün hacmi içinde gerçekleşeceği için verimin açığa bağımlılığı da azalacağından ihmal edilebilir. Bu durumda verimin açığa bağımlılığını gösteren fonksiyon dedektörün etkin hacminin fiziksel boyutlarına güçlü bir şekilde bağımlı olacaktır.

Yerinde (in-situ) gama spektrometride, dedektör görüş alanı aşağıdaki gibi bir şekilde temsil edilebilir (Gabor 2008).



Şekil 2.1 In-situ gama spektrometride genel bir ölçüm düzeneği

Yerdeki aktivite dağılımına bağlı olarak, her dV hacmi dedektörün dedeksiyon yaptığı bölgeye foton yayar. Ölçüm sonuçlarından yerdeki aktivite derişiminin belirlenebilmesi için dedektörün bu dedeksiyon bölgesinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla verilen bir aktivite dağılımındaki sayım hızının hesaplanması gerekir. Öncelikle dedektöre \vec{n} birim vektörü ile tanımlanan aynı yönde gelen fotonların sayım hızı aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Gabor 2008).

r konumundaki foton akımı $j(r)$ olsun. $j(r)$ $\phi(r)$ akısı ve n 'nin çarpımıdır. r konumunda n yönünden gelen fotonun dedektör tarafından dedekte edilme olasılığı $\varepsilon(n, r)$ ise sayım hızı bu durumda,

$$N = - \int_{A_n} \varepsilon(n, r) \cdot j(r) da = - \int_{A_n} \varepsilon(n, r) \cdot \phi(r) n da \quad (2.4)$$

Burada A_n n yönünde dedektörün görme yüzeyidir. Foton akısının A_n yüzeyinde homojen olduğunu varsayılırsa

$$N = -\phi \int_{A_n} \varepsilon(n, r) n da \quad (2.5)$$

$$\varepsilon(n) = - \int_{A_n} \varepsilon(n, r) n da \quad (2.6)$$

olarak tanımlanırsa,

$$N = \phi \cdot \varepsilon(n) \quad (2.7)$$

elde edilir.

$\varepsilon(n)$, ölçümle belirlenen, dedektörün bir karakteristiği olan, \vec{n} yönünden gelen homojen birim akıdaki sayım hızıdır. Dedektörün simetrik olduğunu kabulü ile verim kutupsal (polar) w açısına bağlıdır. w , $0 \leq w \leq \pi$ olup tersinir fonksiyondur. Bu durumda verimin aslında $\cos w$ 'ye bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre verim fonksiyonu $\varepsilon(n) = \varepsilon(\cos w)$ şeklinde ifade edilebilir.

Yerdeki aktivite konsantrasyonu A_v 'nin sadece derinliğe (z) bağlı olduğunu varsayımı ile, μ_s , μ_a sırasıyla toprak ve havadaki azalım katsayıları ise Y toplam verim olmak üzere,

$$N = \int \frac{A_V(z) \cdot Y}{4\pi R^2} \cdot e^{-\frac{1}{\cos w} \cdot \int_0^z \mu_s(z') dz'} \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{\cos w}} \cdot \varepsilon(\cos w) dV \quad (2.8)$$

Burada dV şu şekilde yazılabilir:

$$dV = R^2 \cdot \sin w dR dw d\varphi = R^2 \cdot \sin w \frac{dz}{\cos w} dw d\varphi = -\frac{R^2}{\cos w} dz d(\cos w) d\varphi$$

$x = \cos w$ kabulü ile $0 \leq w \leq \pi/2$ aralığında değişeceğinden x de 1'den 0'a değişir ve Eşitlik 2.8. aşağıdaki şekle dönüşür.

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^\infty \frac{A_V(z) \cdot Y}{4\pi R^2} \cdot e^{-\frac{1}{x} \int_0^z \mu_s(z') dz'} \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} \cdot \frac{\varepsilon(x)}{x} \cdot R^2 dz dx d\varphi \quad (2.9)$$

$$N = \frac{Y}{2} \cdot \int_0^1 dx \frac{\varepsilon(x)}{x} \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} \cdot \int_0^\infty dz A_V(z) \cdot e^{-\frac{1}{x} \int_0^z \mu_s(z') dz'} \quad (2.10)$$

Burada φ üzerinden integral alınmış ve 2π ile çarpılmıştır. Z üzerinden integralini almak için ise topraktaki aktivite dağılımının bilinmesi gerekir. Bazı özel durumlarda μ_s 'nin derinliğe bağlı olmadığı varsayımı ile bu integral kolaylıkla yapılabilir. x üzerinden yapılacak olan kalan integral de sayısal olarak yapılmak zorundadır.

Aktivitenin üstel dağılım durumu:

Bu durumda $A_V(z) = A_0 \cdot e^{-\lambda z}$. Böylece sayım hızı,

$$N = \frac{A_0 \cdot Y}{2} \cdot \int_0^1 \frac{\varepsilon(x)}{\lambda x + \mu_s} \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} dx \quad (2.11)$$

Aktivitenin homojen dağılım durumu :

Bu durumda $A_V(z) = A_0$. Böylece sayım hızı,

$$N = \frac{A_0 \cdot Y}{2 \cdot \mu_s} \cdot \int_0^1 \varepsilon(x) \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} dx \quad (2.12)$$

Belirli bir p derinliğine kadar aktivitenin homojen dağılımı ve onun aşağısında aktivite 0 olan durum:

Bu durumda $A_V(z) = A_0, 0 \leq z \leq p$ ve $A_V(z) = 0, z > p$. Böylece sayım hızı,

$$N = \frac{A_0 \cdot Y}{2 \cdot \mu_s} \cdot \int_0^1 \varepsilon(x) \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} \cdot (1 - e^{-\mu_s \frac{p}{x}}) dx \quad (2.13)$$

Bazı durumlarda sadece yerin yüzeyi radyoaktif kirlenmeye maruz kalır. Bu kirlenmenin homojen olduğu varsayılırsa, yüzey üzerindeki aktivite derişimi A_s olarak tanımlanabilir. Bu durumda sayım hızı,

$$N = \int \frac{A_s \cdot Y}{4\pi(h^2+r^2)} \cdot e^{-\mu_a \cdot \sqrt{h^2+r^2}} \cdot \epsilon(r) da \quad (2.14)$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{A_s \cdot Y}{4\pi(h^2+r^2)} \cdot e^{-\mu_a \cdot \sqrt{h^2+r^2}} \cdot \epsilon(r) \cdot r dr d\varphi$$

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{A_s \cdot Y}{4\pi x} \cdot e^{-\mu_a \frac{h}{x}} \cdot \epsilon(x) dx d\varphi$$

$$= \frac{A_s \cdot Y}{2} \cdot \int_0^1 \frac{e^{-\mu_a \frac{h}{x}}}{x} \cdot \epsilon(x) dx \quad (2.15)$$

2.4 Yerinde uygulama için gama spektrometresi seçimi

Herhangi bir gama spektrometrik ölçüm sistemi, ölçüm yapılacak alana transfer edilebiliyorsa alan ölçümleri için kullanılabilir. Ancak, pratikte uygulanabilmesi için bazı gereksinimler karşılanmalıdır. Dedektör çevresel koşullardaki değişimlere dayanıklı olmalıdır. Örneğın NaI(Tl) kristalli dedektör cevabının sıcaklık bağımlılığı saha kullanımını açısından oldukça açık bir dezavantajdır.

Taşınabilirlik de önemli bir faktördür. Küçük boyutlu ve bileşik dedektör tasarımı, alan spektrometresinde tercih edilen özelliklerdir. Geleneksel sıvı azot soğutmalı Ge dedektörler için azot kabındaki (dewar) mevcut sıvı azotun dış ortamdaki hava şartlarında hızla tükenmesi, dedektörü korumasız hale getirmektedir. Bu nedenle sıvı azot soğutmasının kısa zamanda kaybolması kristal yapısına zarar vermemesi için ölçüm esnasında hızla dedektör beslemesi yüksek gerilim düşürölüp kapatılmak zorundadır. Dedektör kristal hacmi, saat mertebesinde yeterli spektrum bilgisini toplamaya yetecek kapasitede, sıcaklık değişimlerine karşı kazanç kayması olmayan ve spektral bilginin güvenilirliği açısından enerji ayırımı yüksek nitelikte olmalıdır. 1970'lerin başlarında yarı iletken malzemelerin de radyoaktivitenin ölçülmesinde

kullanılabileceği kabulüyle farklı yarı iletken malzemelerle ilgili araştırmalar başlamıştır. Yeni teknoloji, bir taşınabilir HPGe dedektörler bu saha şartlarının gereksinimlerini en iyi şekilde karşılamaktadır. Bu tez çalışmasında, sıvı azot soğutmalı bir HPGe dedektöre kıyasla enerji ayırım gücünden fazlaca ödün vermeden kullanılan elektrik soğutmalı HPGe dedektörün tercih edilmesi, elektrik bataryasıyla desteklenen sistemin güvenilirliğini ve sahada kullanım süresini olumlu yönde iyileştirmiştir.

Sağlamlık ve dayanıklılık da dedektöre tümleşik bulunan elektronik kısımlar için gereklidir. Sistemin uzak alanlarda kullanılabılır olması için, gücü dahili olarak sağlanmalı, yani şarj edilebilir dahili pil sistemi veya en azından motorlu araçtan şarj edilebilir olmalıdır. Ancak saha çalışmalarında elektrik sağlamak ciddi bir problemdir. Bu tez çalışmasında otomobil türü akü ile elektrik enerjisi sağlanmıştır. Günde yaklaşık 6-7 saat çalışma imkanı sağlanmıştır. Geceleri dedektör ve akü şarj edilerek çalışmaların sürekliliği sağlanmıştır.

Sistemin kullanımında modüler yapıda olması basitliği kadar tercih edilebilir bir özelliğidir. Yerinde gama spektrometresi uygulamasına ilginin artması, nükleer elektronik alanında birçok büyük firmanın küçük boyutlu taşınabilir analiz sistemini geliştirmesine neden olmuştur.

Sistem ölçüm süresince ve hemen sonrasında hızlı spektrum değerlendirmesi için imkan sağlamaktadır. Bunun için sistemin bir fonksiyonu olarak basitçe yapılan bir enerji kalibrasyonu ile spektrumdaki radyonüklitler tanımlanabilir. Spektrumun detaylı değerlendirilmesi için taşınabilir bir bilgisayar yardımı ve sisteme uygun bir yazılım (Isotopic Supervisor) kullanılmıştır.

Bu işlemden sonra sistemin tamamıyla algıladığı gama fotonlarından kaynaklanan piklerin alanlarının aktiviteye oranı bulunarak belirli bir geometrik düzenlemede enerjiye karşılık mutlak verimleri bulunur. Klasik olarak yüksek çözünürlüklü gama spektrometrisinde referans standart kaynaklarla verim kalibrasyonu yapılır. Ancak dedektörün malzeme ve geometrik özellikleri yüksek doğrulukla biliniyorsa Monte-Carlo simülasyonu da verim belirlenebilir. Bu tez çalışmasında Monte-Carlo temelli Gespecor ve DETEFF yazılımları kullanılarak dedektör ve kaynak geometrileri modellenmiştir. Aktivite derişimi, Eşitlik 2.16'ya göre hesaplanır.

$$A = \frac{N/t}{\varepsilon f_{\gamma}} K \quad (2.16)$$

Burada, N , ilgilenilen pikin alanı; ε , ilgilenilen pikin deneysel veya Monte Carlo yazılımıyla belirlenen tüm enerji pik verimi; f_{γ} , ilgilenilen pikin yayınlanma olasılığı; K ise düzeltme faktörleridir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Cihazlar ve Materyaller

3.1.1 Dedektör

Bu tezde kullanılan dedektör Ortec marka, Trans-SPEC 100 model, p-tipi HPGe kristalli Gama dedektörüdür. %40 bağıl verime sahip olan dedektör, yüksek performanslı, taşınabilir ve sıvı azot gerektirmeyen elektrik soğutmalı bir sistemdir. (Şekil 3.1) 16 K dönüşüm kazançlı ADC/MCA dijital elektronik ile yüksek ayırma gücüne sahiptir.



Şekil 3.1 Ortec Trans-SPEC 100 HPGe dedektör

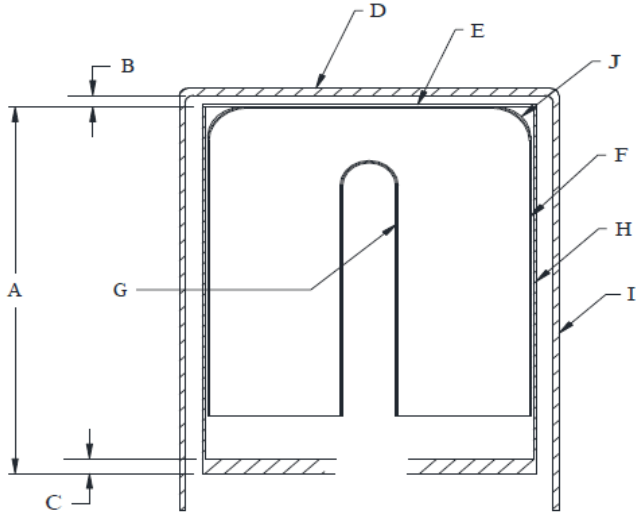
Bilindiği üzere ilk üretilen germanyum dedektörlerde kristal yeterince saflaştırılmadığından nispeten lityum sürüklenmiş kalın bir elektriksel temas tabakası kullanılıyordu (Knoll 2000). Ge(Li) adı verilen bu dedektörlerde oda sıcaklığında lityum atomları difüzyonla bütün kristale yayıldığından dedektörlerin sürekli olarak sıvı azot sıcaklığında tutulması gerekiyordu. 1980'lerde ticari olarak üretilmeye başlanan yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlerde bu gereklilik ortadan kalkmış ve HPGe dedektörler bütün dünyada yaygınlaşmıştır.

3.1.2 Enerji kalibrasyonu

HPGe dedektörleriyle analize başlamadan önce belirli kalibrasyonların ve ayarlamaların yapılması gereklidir. Bunlardan birincisi uygun enerji aralığını ve piklerin hangi enerjideki gama ışınlarına karşılık geldiğini belirlemek için yapılan enerji kalibrasyonudur. Dedektör çıkışında oluşan sinyalin genliği soğurulan enerji ile orantılıdır. Ancak yükseltecin kazancına göre darbe yüksekliği değişir. Sisteme hangi büyüklükteki pulsun ne kadarlık bir enerji soğurulması sonucu oluştuğu bilgisi sağlanmalıdır. Bu işleme “Enerji Kalibrasyonu” denir ve bu amaç için standart kaynaklar kullanılır. Enerji kalibrasyonunda dedektörün şekillendirme zaman sabiti, kazancı, kutup-sıfır düzeltmesi; yükselteç üzerinden önceden belirlenen değerlere ayarlanır. Standart gama kaynakları, dedektörün karşısına yerleştirilerek sayımlar alınır. Pik tepe noktalarına karşılık gelen kanallar not edilir. Bu kanal numaralarına karşılık gelen gama enerjileri çizilir. Elde edilen grafik genellikle doğrusal bir fonksiyon şeklinde seçilir. Enerjisi bilinmeyen bir pikin enerjisi ise seçilen fonksiyona göre bulunur. Enerji ayırımı yapabilen radyasyon dedektörlerinin çıkış sinyalleri genellikle mV-V seviyelerindedir. Bu sinyaller radyasyon enerjisiyle doğru orantılıdır. Sinyaller şekillendirilip yükseltildikten sonra enerjiye karşılık sayım grafiğinin çizilmesi (spektrum) için sinyal genlikleri belirli kanallara bölünür. Bu işlem, MCA (çok kanallı analizör) adı verilen elektronik sistemle gerçekleştirilir.

3.1.3 Dedektörün temel fiziksel özellikleri

Taşınabilir spektrometre sistemi iki ana bölüm içerir: Yarıiletken dedektör ve MCA (Multi Channel Analyser- Çok Kanallı Analizör). Dedektör ve önyükselteç, yükselteç, ADC ve MCA hafızası için gerekli güç kaynağı da bu sisteme bütünüdür. Bu tez çalışmasında kullanılan şematik HPGe kristal yapısı Şekil 3.2’ de gösterilmiş ve HPGe dedektörün kristal ölçüleri ve kullanılan malzemelere ait teknik özellikleri, Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de verilmiştir (User’s Manuel).



Şekil 3.2 HPGe dedektör kristal konfigürasyonu

Çizelge 3.1 Dedektörün temel özellikleri

Dedektör Çapı	67,1 mm
Dedektör Boyu	52,8 mm, minimum
Dedektör Son Yarıçapı (J)	8 mm, nominal
Delik Çapı	9,3 mm
Delik Derinliği	34,5 mm, minimum
Delik Dip Yarıçapı	4 mm, nominal

Çizelge 3.2 Dedektör kurulum boyutları ve malzemeleri

Bkz.Şekil 1.2.	Boyut	Tanımlar	Malzeme(ler)
A	63 mm	Montaj kabı boyu	Alüminyum
B	10 mm	Uç kap kristal boşluk mesafesi	
C	3,2 mm	Montaj kabı tabanı	Alüminyum
D	0,5 mm	Uç kap penceresi	Alüminyum
E	0,5 mm	Zırh	Alüminyum
F	700 µm	Dış kontak tabakası	Ge (w/Lions)
G	0,3 µm	Delik kontak tabakası	Ge (w/B ions)
H	1,5 mm / 0,38 mm	Montaj kabı kalınlığı	Alüminyum / Paslanmaz Çelik
I	1,5 mm	Uç kap et kalınlığı	Alüminyum

3.1.4 Kullanılan materyaller

Sertifikalı referans standart nokta kaynaklar:

Bu tez çalışmasında dedektörün verim değerlerinin elde edilmesinde PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) firmasından temin edilmiş sertifikalı nokta kaynaklar kullanılmıştır. Çizelge 3.3'te kullanılan nokta kaynakların nükleer özellikleri özetlenmiştir (<http://www.nucleide.org/Laraweb/>).



Çizelge 3.3 PTB nokta kaynakların özellikleri

Radyoizotop	Ref.Tarihi	E_{γ} (keV)	f_{γ}	$T_{1/2}$ (s)	Ref. Aktivite
²⁴¹ Am	01.01.2013	59,5409 ± 0,0001	0,3592 ± 0,0017	1,37E+10 ± 1,90E+07	28,94 ± 0,29
⁶⁰ Co	01.06.2013	1173,228 ± 0,003	0,9585 ± 0,0003	1,66E+08 ± 2,50E+04	14,75 ± 0,15
		1332,492 ± 0,004	0,999826 ± 0,000006		
¹⁵² Eu	01.05.2012	121,7817 ± 0,0003	0,2841 ± 0,0013	4,27E+08 ± 5,00E+05	54,5 ± 0,8
		344,2785 ± 0,0012	0,2659 ± 0,0012		
		1408,013 ± 0,003	0,2085 ± 0,0008		
		964,079 ± 0,018	0,145 ± 0,0006		
		1112,076 ± 0,003	0,1341 ± 0,0006		
		778,9045 ± 0,0024	0,1297 ± 0,0006		
		1085,837 ± 0,01	0,1013 ± 0,0006		
		244,6974 ± 0,0008	0,0755 ± 0,0004		
867,38 ± 0,003	0,04243 ± 0,00023				
²² Na	01.05.2012	1274,537 ± 0,007	0,9994 ± 0,0013	8,21E+07 ± 2,50E+04	80,2 ± 0,6
⁵⁴ Mn	01.05.2012	834,848 ± 0,003	0,999752 ± 0,000005	2,70E+07 ± 2,60E+03	16,72 ± 0,12
⁶⁵ Zn	01.05.2012	1115,539 ± 0,002	0,5022 ± 0,0011	2,11E+07 ± 8,00E+03	46,9 ± 0,7
¹⁰⁹ Cd	01.05.2012	88,0336 ± 0,001	0,0366 ± 0,05	3,99E+07 ± 3,50E+04	111,2 ± 1,9
¹³³ Ba	01.05.2012	356,0129 ± 0,0007	0,6205 ± 0,0019	3,33E+08 ± 1,90E+05	21,57 ± 0,22
		80,9979 ± 0,0011	0,3331 ± 0,003		
		302,8508 ± 0,0005	0,1831 ± 0,0011		
		383,8485 ± 0,0012	0,0894 ± 0,0006		

Çizelge 4.3 PTB nokta kaynakların özellikleri (devamı)

		276,3989 ± 0,0012	0,0713 ± 0,0006		
		160,6121 ± 0,0016	0,00638 ± 0,00006		
		223,2368 ± 0,0013	0,0045 ± 0,00005		
¹³⁴ Cs	01.05.201	604,72 ± 0,003	0,9763 ± 0,0008	6,51E+07 ± 4,40E+04	54,0 ± 0,4
		795,86 ± 0,01	0,8547 ± 0,0009		
		569,33 ± 0,002	0,15368 ± 0,00021		
		801,95 ± 0,006	0,08694 ± 0,00016		
		563,246 ± 0,003	0,08342 ± 0,00015		
		1365,194 ± 0,004	0,03019 ± 0,00008		
		1167,967 ± 0,004	0,01791 ± 0,00005		
		475,365 ± 0,002	0,01479 ± 0,00007		
¹³⁷ Cs	01.05.2012	661,557 ± 0,003	0,8499 ± 0,002	9,48E+08 ± 2,50E+05	89,4 ± 0,9
¹²⁵ Sb	01.05.2012	427,874 ± 0,004	0,2955 ± 0,0024	8,71E+07 ± 8,00E+04	32,1 ± 0,7
		600,597 ± 0,002	0,1776 ± 0,0018		
		635,95 ± 0,003	0,1132 ± 0,001		
		463,365 ± 0,004	0,1048 ± 0,0009		
		176,314 ± 0,002	0,0682 ± 0,0007		
		606,713 ± 0,003	0,0502 ± 0,0005		
		671,441 ± 0,006	0,01783 ± 0,00016		
		380,452 ± 0,008	0,0152 ± 0,00015		

Silindirik numune kabı içerisinde referans kaynak:

Verim kalibrasyonu çalışmalarında, silindirik numune kabı içerisinde (Şekil 3.3) UAEA RGK, UAEA RGU ve UAEA RGTh referans kaynakları kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Silindirik numune kabı

U, Th ve K'un hesaplamalarda kullanılan nükleer bilgileri Çizelge 3.4'te sunulmuştur (<http://www.nucleide.org/Laraweb/>).

Çizelge 3.5 U, Th ve K'un nükleer bilgileri

²³²Th (Toryum, Z=90)	
Atom Ağırlığı (gr·mol ⁻¹)	232,03806
Bozunma ürünü	²²⁸ Ra (α, 100%)
Yarı Ömrü (T _{1/2}) :	14,02 (6) 10 ⁹ yıl ≡ 442,4 (19) 10 ¹⁵ s
Bozunma Sabiti (λ) :	1,567 (7) 10 ⁻¹⁸ s ⁻¹
Spesifik aktivitesi (As):	4,067 (17) 10 ³ Bq·g ⁻¹
Doğal zenginlik:	100,00%
²³⁸U (Uranyum, Z=92)	
Atom Ağırlığı (gr·mol ⁻¹)	238,02891
Bozunma ürünü	²³⁴ Th (α, 100%)
Yarı Ömrü (T _{1/2}) :	4,468 (5) 10 ⁹ yıl ≡ 141,00 (16) 10 ¹⁵ s
Bozunma Sabiti (λ) :	4,916 (6) 10 ⁻¹⁸ s ⁻¹

Çizelge 3.6 U, Th ve K'un nükleer bilgileri (devamı)

Spesifik aktivitesi (As):	12,439 (14) $10^3 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$
Doğal zenginlik:	99,27%
^{40}K (Potasyum, Z=19)	
Atom Ağırlığı ($\text{gr}\cdot\text{mol}^{-1}$)	39,0983
Bozunma ürünü:	Ar-40 (β^+ , ϵ , 10,75%), Ca-40 (β^- , %89,25)
Yarı Ömrü ($T_{1/2}$):	$1,2504 (30) 10^9 \text{ a} \equiv 39,46 (9) 10^{15} \text{ s}$
Bozunma Sabiti (λ):	$17,566 (42) 10^{-18} \text{ s}^{-1}$
Spesifik aktivitesi (As):	$3,1655 10^1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$
Doğal zenginlik:	0,0117%

Çizelge 3.5'te UAEA RGK, UAEA RGU ve UAEA RGTh 'un ppm cinsinden derişimi ve $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ cinsinden özgül aktivite değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 RGTh, RGU ve RGK standart kaynakların sertifika aktivite derişimleri (IAEA,2019).

Referans malzeme	Derişimi ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Özgül aktivitesi ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
RGTh	$800\pm\%2$	3250 ± 90
RGU	$400\pm\%1$	4940 ± 30
RGK	$448000\pm\%1$	14000 ± 400

Çizelge 3.4 ve 3.5'te verilen bilgiler ile yaklaşık 6cm x 5cm (taban çapı x yükseklik) geometrik boyutlarındaki silindirik numune kabında bulunan RGTh, RGU ve RGK'un miktarları ve bunlara karşılık gelen aktiviteleri;

Th için $m=160,56 \text{ gr}$ olmak üzere $521,8\pm14,5 \text{ Bq}$,

U için $m=161,09 \text{ gr}$ olmak üzere $795,8\pm4,8 \text{ Bq}$,

K için $m=191,08 \text{ gr}$ olmak üzere $2675,1\pm76,4 \text{ Bq}$ olarak hesaplanmıştır.

Kalibrasyon blokları:

1987 yılında MTA tarafından, MTA'nın havadan yapacağı ve yerden yaptığı radyoaktif madde aramalarında kullanılan cihazların kalibrasyonu amacıyla, Hava Kuvvetleri Komutanlığına bağlı 11. Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı Etimesgut-Ankara'da U, Th, K ve boş kalibrasyon bloklarını inşa ettirilmiştir.

Bu blokların kullanımı için Hava Kuvvetleri Komutanlığından ve MTA'dan özel izin alınmıştır. Kalibrasyon bloklarının yapımı, geometrik yapısı ve K, U ve Th elementel içerikleri konusundaki bilgi 11. Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı ile MTA Genel Müdürlüğü arasında Kalibrasyon Bloklarının Kullanılmasına yönelik protokole dayalıdır. Söz konusu protokolün 2014 onaylı bir nüshası MTA'dan resmi yazı ile temin edilmiştir. (Kalibrasyon Bloklarının Kullanılması ile İlgili 11. Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı ile MTA Genel Müdürlüğü arasında yapılan protokol, 2014 onaylı.)

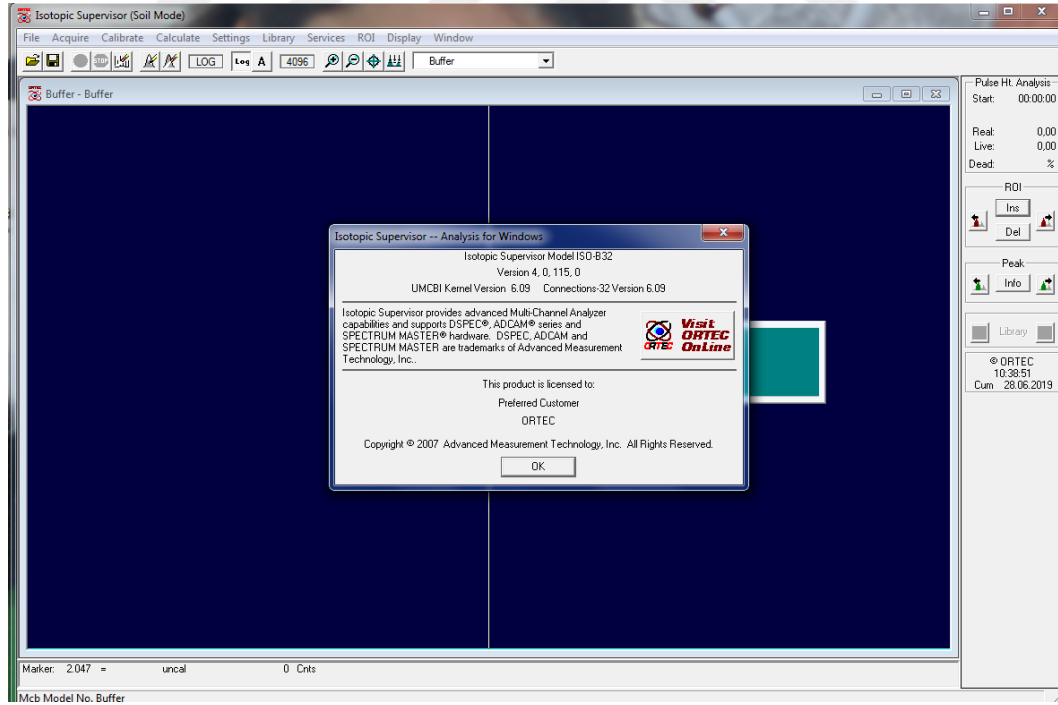
Kalibrasyon bloklarının sahada yerleşimlerinin kuş bakışı görünümü ve kesit görünümü aşağıdaki Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 U, Th, K ve boş kalibrasyon bloklarının içerikleri

Kalibrasyon bloku	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)
Th	1,17 ± 0,01	50,15 ± 0,43	2,59 ± 0,04
U	1,22 ± 0,01	6,98 ± 0,11	23,37 ± 0,27
K	7,04 ± 0,09	0,99 ± 0,10	0,56 ± 0,05
Boş	1,22 ± 0,01	6,98 ± 0,11	1,65 ± 0,04

3.1.5 Spektrum verileri toplama ve değerlendirme

Spektrum analizleri, Trans Spec 100 HPGe dedektörün (ORTEC) veri toplama arayüzü, kullanım özellikleri Ortec Gamma Vision yazılımına çok benzeyen ancak in-situ gama spektroskopisi için modifiye edilmiş Isotopic Supervisor 4.0 programı ile yapılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Isotopic supervisor 4.0

In-situ ölçümler için Container/surface ve Soil olmak üzere iki modu olan program, ölçüm analizlerinde Soil modda kullanılmıştır.

3.1.6 Verimin hesaplanması için dedektörün modellenmesi

Dedektör veriminin hesaplanması için Monte Carlo esaslı geliştirilmiş Gespecor (Ver 4.2) ve DETEFF yazılımları hesaplama aracı olarak kullanılmıştır

Gespecor Yazılımıyla Dedektör Modellemesi:

Gespecor yazılımı sadece HPGe dedektörlere uygun verim kalibrasyonu, gerçek çakışma etkileri ve öz soğurma etkileri için bir model oluşturmaya imkan vermektedir. Silindirik geometri ve disk şekli dışındaki geometrilerin modellenmesi mümkün değildir. Gespecor, aynı zamanda pik verimi ile birlikte toplam verimin de doğrudan değerlendirmesini yapmayı sağlar. Bunlar için dedektör-kaynak modelinin iyi tanımlanması ön koşuldur. Elde edilen sonuçlar, düzeltme faktörlerinin değerlerinden ziyade çok daha kuvvetli bir şekilde dedektöre ait fiziksel verilerdeki belirsizliklerden etkilenir. (Şekil 3.6)

The screenshot shows the 'DETECTOR FILE' software interface. The window title is 'DETECTOR FILE' and it has a menu bar with 'Tutorial', 'NEW', 'SAVE', 'DELETE', and 'PRINT'. The interface is divided into several sections:

- Detector type:** HPGe (selected) and Well.
- Crystal parameters:** Crystal radius (cm) = 3.355, Crystal length (cm) = 5.280.
- Inner contact:** Radius (cm) = 0.465, Length (cm) = 3.850.
- Thickness of dead layer (cm):** Active face = 0.14500, Side face = 0.15000, Distance from active face to entrance window = 1.000.
- Detector holder:** Face thickness = 0.05000, Side thickness = 0.18800, Density (g/cm³) = 2.70000E+00, Material file = AL.mat.
- End cap:** End cap diam. (cm) = 9.26, Window thickn. (cm) = 0.15000, Density (g/cm³) = 2.70000E+00, Material file = AL.mat.
- End cap side:** Side thickness (cm) = 0.15000, Density (g/cm³) = 2.70000E+00, Material file = AL.mat.

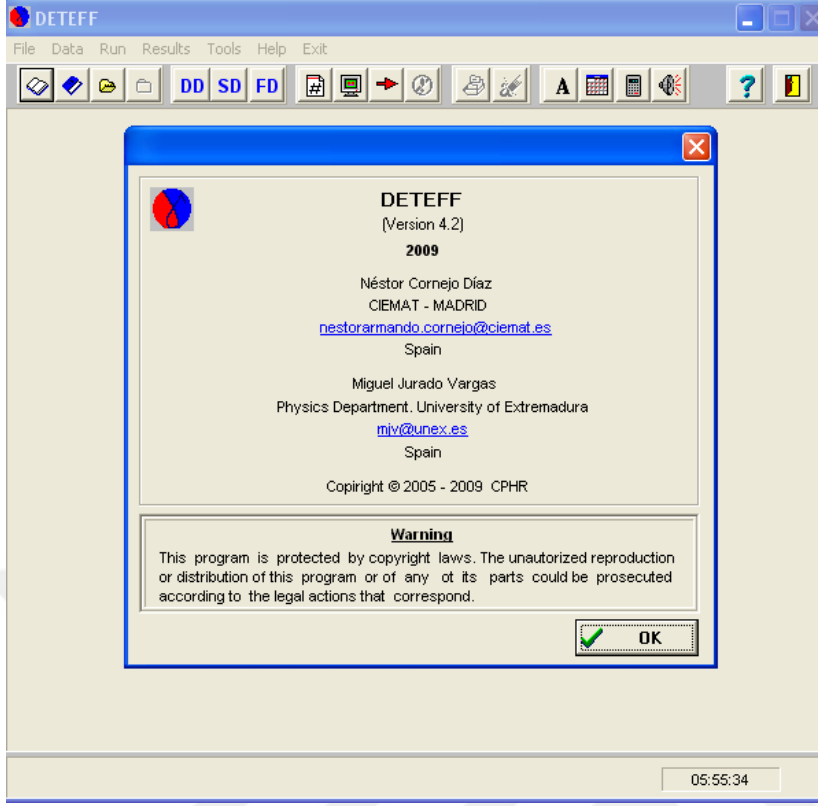
Available files: GMX70.det, GMX701.det, kurs.det, TRANSPEC100.det. Selected: TRANSPEC100.det.

Şekil 3.6 Gespecor yazılımı ile dedektör geometrisinin modellenmesi

Bir numunenin spektrumunun analizinde kullanılan verim kalibrasyon eğrisi, analiz edilecek numunenin elementel kompozisyonu ve yoğunluğuna (herhangi bir matriste) uygun olarak seçilen bir standart kalibrasyon kaynağının analizi ile elde edildiğinde, numune ve standart kaynak matrisleri arasında kendiliğinden soğurum düzeltmeleri yapılması gerekir. Gespecor tarafından hesaplanan bu düzeltme faktörünün (F_{ca}), numune ile benzer matristeki standart kaynak kullanılarak belli bir enerjide elde edilen pik verimi ile çarpılması sonucu, aynı enerjide gerçek numuneye ait verim değeri elde edilir. Kendiliğinden soğurum düzeltmeleri, numunenin geometrisine, kompozisyonuna, yoğunluğuna ve dedektör parametrelerine bağlıdır. Doğal bir sonuç olarak, bu düzeltmeler, düşük enerjili fotonlar için daha geniş hacimli, daha yüksek atom ağırlıklı ve daha yüksek yoğunluklu numunelerde daha yüksektir.

DETEFF Yazılımıyla Dedektör Modellemesi:

DETEFF (Şekil 3.7), sintilatörler (NaI veya CsI) veya yarı iletken dedektörler (Ge (Li), HpGe ya da Si (Li)) olabilen koaksiyal dedektörlere sahip gama ışını spektrometri sistemlerinde, gama dedektör verimi hesaplamaları için Object Pascal'da programlanan bir Monte Carlo kodudur. Kod, 10.0 keV ile 2.0 MeV arasında gama ışını enerjilerini kabul eder. Numune konfigürasyonları silindirik, dikdörtgen ve Marinelli kaplardır. Numunelerin dedektöre göre aksenel olarak ortalandığı kabul edilir, böylece kaynak konumu kaynak-dedektör mesafesi ile tanımlanır.



Şekil 3.7 DETEFF

3.2 Yöntem

3.2.1 Laboratuvar ölçümleri ve modellemeler ile verim değerinin belirlenmesi

Dedektörün Standart Kaynaklar Kullanılarak Modellenmesi:

Bu tez çalışmasında, dedektör bir sehpa yardımıyla yerden dedektör aktif yüzeyine 11 cm mesafede, yere yönelimli olarak pozisyonlandırılmıştır. Bütün çalışmalar bu yönelim pozisyonunda gerçekleştirilmiştir.

Sahada kullanılan bu geometri ile laboratuvarında Çizelge 3.3'te özellikleri tanımlanan nokta kaynaklar kullanılarak ölçümler yapılmıştır.

Standart kaynakların referans aktivitesine, ölçüm zamanı dikkate alınarak Eşitlik 3.1, 3.2 ve 3.3 kullanılarak zaman düzeltmesi uygulanmıştır.

$$A = A_{ref} * e^{-\lambda \cdot \Delta t} \quad (3.1)$$

$$\Delta t = \text{Başlangıç zamanı} - \text{Referans zamanı} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (3.3)$$

Spektrum analizleri Isotopic Supervisor 4.0 programı ile yapılmıştır. Her enerjinin altındaki sayım değeri belirlenmiştir.

Referans nokta kaynakların Çizelge 3.3'te gösterilen enerjilerindeki fotopik verimleri Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N/t}{A \cdot f_\gamma(E) \cdot m \cdot K} \quad (3.4)$$

$\varepsilon_p(E)$: E enerjisindeki fotopik verimi

N: E enerjisindeki fotopikin net sayımı

t: Ölçüm süresi

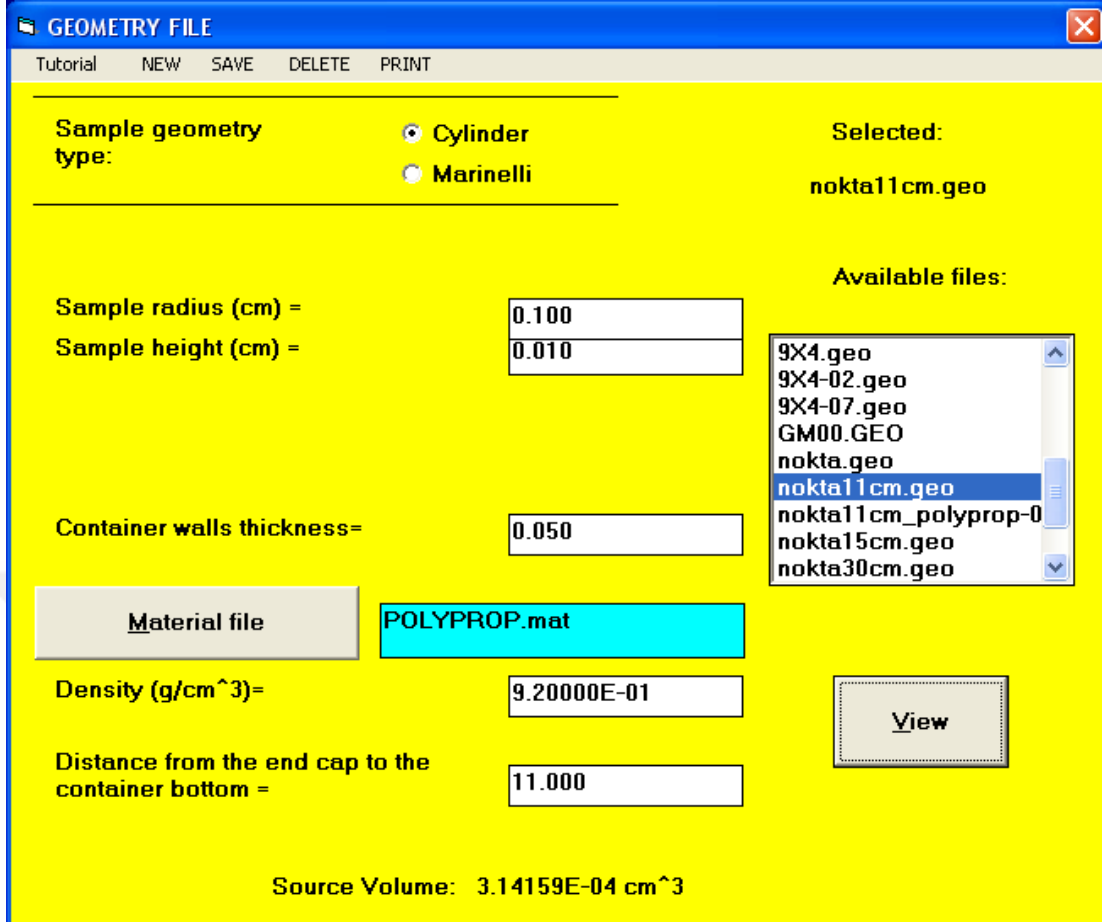
f_γ : Radyonüklitin E enerjisindeki gama ışını yayınlama olasılığı.

A: Ölçüm zamanındaki aktivite

m: Kütle

K: Düzeltme faktörü (Burada TCC düzeltmesi de uygulanmıştır)

Gespecor yazılımı ile üretici bilgisi olan ve Çizelge 3.1-3.2'de sunulan geometrik özellikler kullanılarak dedektör, nokta kaynaklar ve ölçüm geometrisi modellenmiştir. (Şekil 3.8)



Şekil 3.8 Gespecor yazılımı ile nokta kaynak modellenmesi

Nokta kaynakların ölçülen mutlak verim değeri ve sistemin modellenmesi ile Gespecor yazılımından elde edilen verim değeri arasındaki bağıl fark (%Fark) Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% Fark = \frac{Verim_{Gespecor} - Verim_{Mutlak}}{Verim_{Mutlak}} \quad (3.5)$$

Dedektörün karakterizasyonu, Gespecor yazılımı ile elde edilen verim değerlerinin, sertifikalı nokta kaynakların aktiviteleri referans alınarak elde edilen mutlak verim (deneysel verilerin) değerleri ile karşılaştırılmak yoluyla gerçekleştirilmiştir.

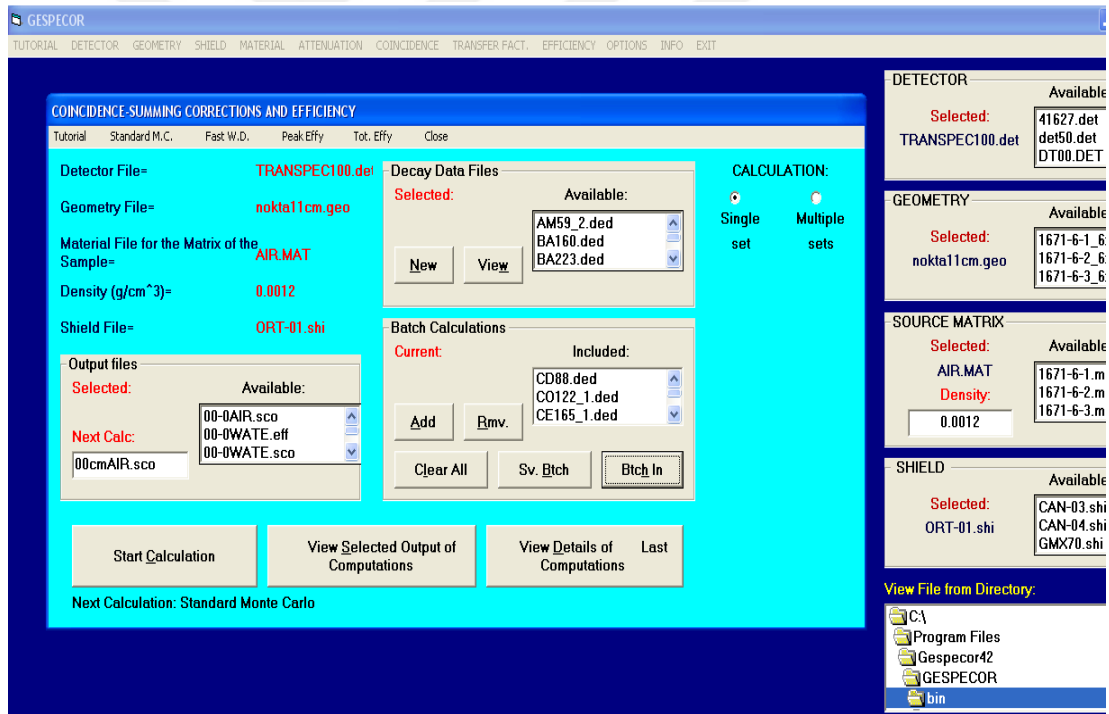
Dedektör kristalinin boyutlarının geometrik bilgileri üretici firmadan temin edilen ve Çizelge 3.1 ve 3.2’de sunulan bilgilerdir.

Ancak dedektör kristalinin ön ve yan ölü bölge boyutlarının fabrika değerlerinden farklı olduğu, modelleme ile elde edilen verimin mutlak verim ile karşılaştırılması ile tespit edilmiştir.

Dedektör kristalinin ön ve yan ölü bölge boyutlarının gerçek değerlerinin belirlenmesi için, üretici firma değerinden küçük adımlar (0.05 mm) ile boyut değişikliği yapılmıştır. Bu işlemler, modelden elde edilen verim ile deneysel olarak elde edilen verim arasındaki bağıl fark %5 aralığında kalana kadar devam ettirilmiştir.

Bu şekilde elde edilen en son boyut değerleri ile dedektörün modeli sabitlenmiş ve bu tez çalışmasında kullanılan bütün modellerde bu geometri parametreleri kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekilde Gespecorda verim hesaplanırken kullanılan parametreler gösterilmiştir (Şekil 3.9)



Şekil 3.9 Gespecor yazılımı ile verim hesaplarında kullanılan parametreler

Dedektörün geometri parametreleri belirlendikten sonra, Çizelge 3.3'te özellikleri tanımlanan PTB nokta kaynaklardan çok enerjili olan ¹³³Ba, ¹⁵²Eu, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs ve ¹²⁵Sb'in gama yayınlama olasılığı (f_γ) %1'den büyük olan enerjileri dikkate alınarak, Gespecor yazılımı ile TCC (Gerçek Çakışma Düzeltmesi) değeri elde edilmiş ve verim

değeri K düzeltme faktörü olarak kullanılan bu değere bölünerek düzeltilmiştir (Çizelge 4.1).

Verim Transfer Yaklaşımı ile Verim Elde Edilmesi:

Dedektörün geometrik özellikleri nokta kaynaklar kullanılarak tam olarak belirlendikten sonra silindirik numune kabı içerisinde bulunan UAEA RGK, RGU, RGTh kaynakları kullanılarak, aynı dedektör- kaynak geometrisi ile (yerden dedektör aktif yüzeyine olan mesafe 11 cm ve dedektör baş aşağı pozisyon) laboratuvarında ölçümler yapılmıştır.

RGK, RGU, RGTh'un tercih edilmesinin nedeni, kalibrasyon blokları ile aynı radyonüklitlere (^{238}U , ^{226}Ra , ^{40}K , ^{232}Th) sahip olması ve ilgilenilen enerjilerin aynı olması nedeniyle, fotopik verim değerinin ve TCC düzeltme katsayılarının elde edilmek istenmesidir.

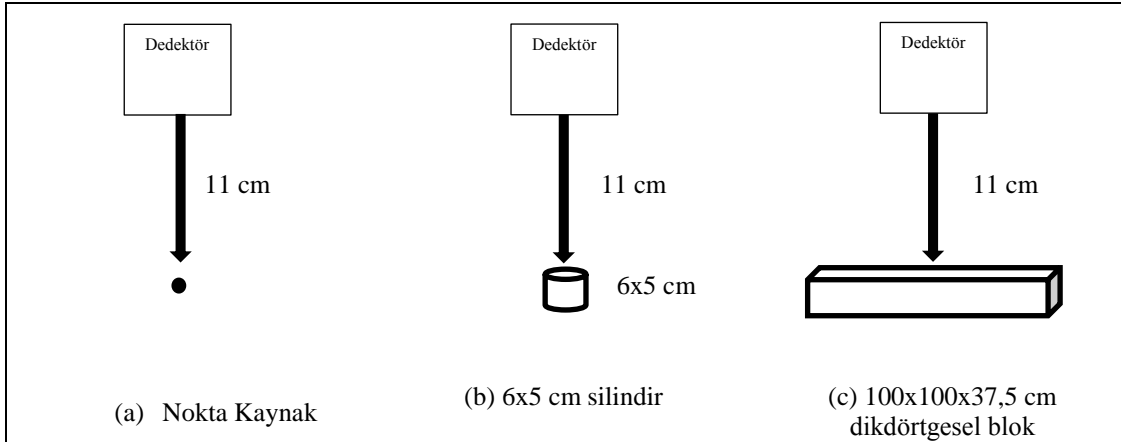
İlgilenilen radyonüklitler (U, Th, K) doğal kaynaklı olduğu için bütün ölçümler öncesi aynı geometrik koşullarda doğal fon sayımı yapılarak, net sayım Eşitlik 3.6'e göre belirlenmiştir.

$$\text{Net sayım hızı} = \frac{N}{t_{\text{ölçüm}}} - \frac{N_{\text{doğal fon}}}{t_{\text{doğal fon}}} \quad (3.6)$$

Gespecor yazılımı ile doğrulanan dedektör geometrisi ile birlikte, silindirik numune kabı içinde bulunan UAEA RGU, RGTh ve RGK'nın yoğunluk değeri ve kompozisyonları kullanılarak bu yeni kaynak geometrisi Gespecorda modellenmiş ve TCC düzeltme faktörü sabitleri ilgilenilen enerjilerde belirlenmiştir. Çizelge 3.5'te verilen referans aktivite değerleri ve TCC düzeltme sabitleri kullanılarak mutlak verim değeri hesaplanmıştır.

Gespecor yazılımından elde edilen verim değeri mutlak verim değeri ile karşılaştırılarak bağıl fark belirlenmiştir. Bu şekilde Gespecor yazılımı ile kalibrasyon blokları ile aynı radyonüklitlere sahip RGK, RGU ve RGTh kullanılarak yapılan ölçümler ile hem kullanılacak enerjilerdeki TCC katsayıları belirlenmiş hem de daha sonra EFT hesabında kullanılmak üzere verim değeri elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

Şematik olarak Şekil 3.10'da gösterildiği gibi kalibrasyon bloklarının dikdörtgenel yapıya sahip olması nedeniyle, silindirik geometriden dikdörtgenel geometriye ETF yaklaşımı ile geçilerek kalibrasyon blokları için verim değeri hesaplanmıştır.

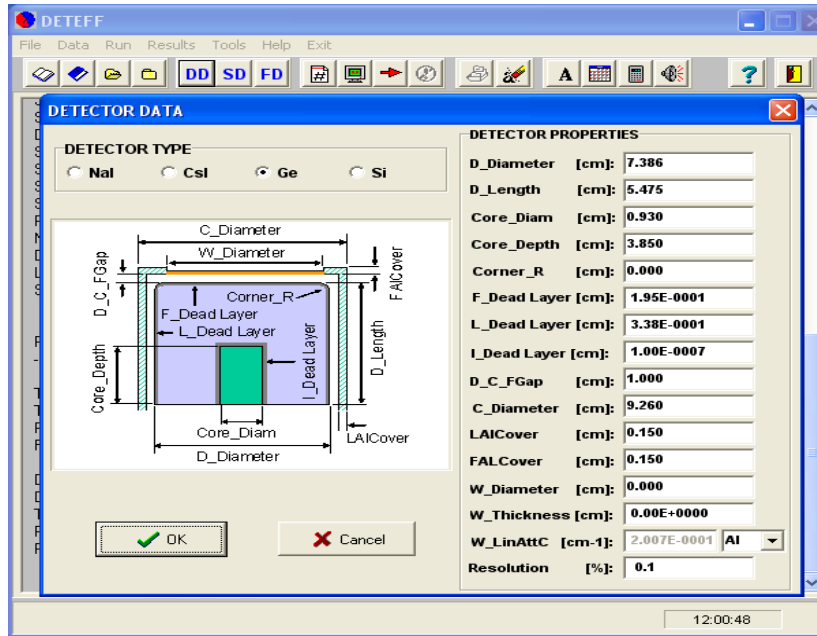


Şekil 3.10 Kaynak dedektör geometrileri

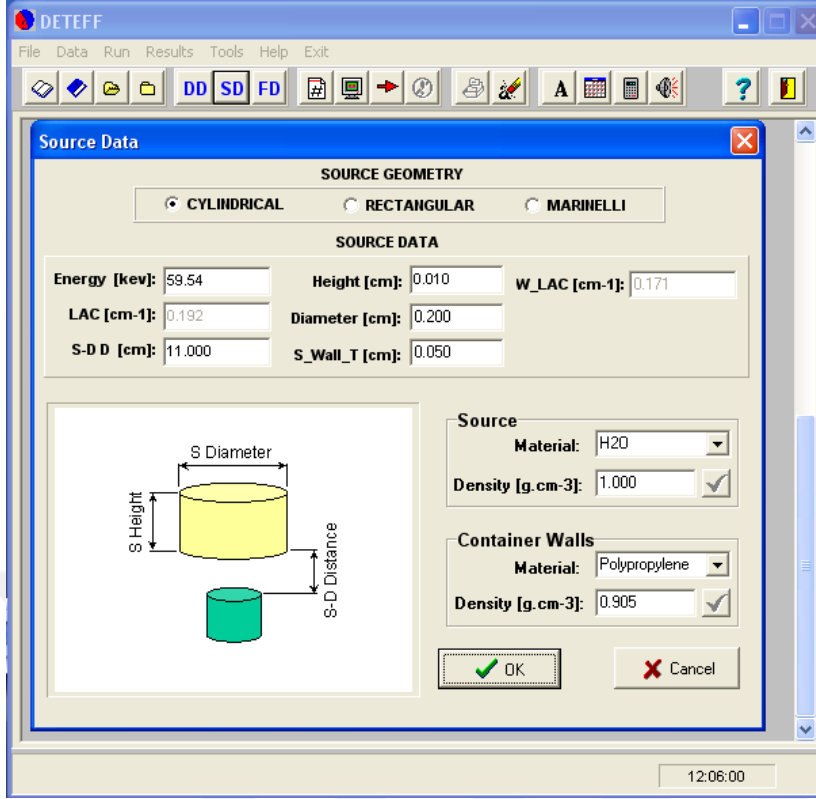
Bunun için dikdörtgenel yapıda modelleme imkanı veren DETEFF yazılımı kullanılmıştır.

Gespecor yazılımı ile yapılan ve doğrulanan Ge dedektör geometrisi ile nokta ve hacim kaynak (silindirik numune kabı) geometri parametreleri dönüştürülerek DETEFF’de modellemeler yapılmıştır.

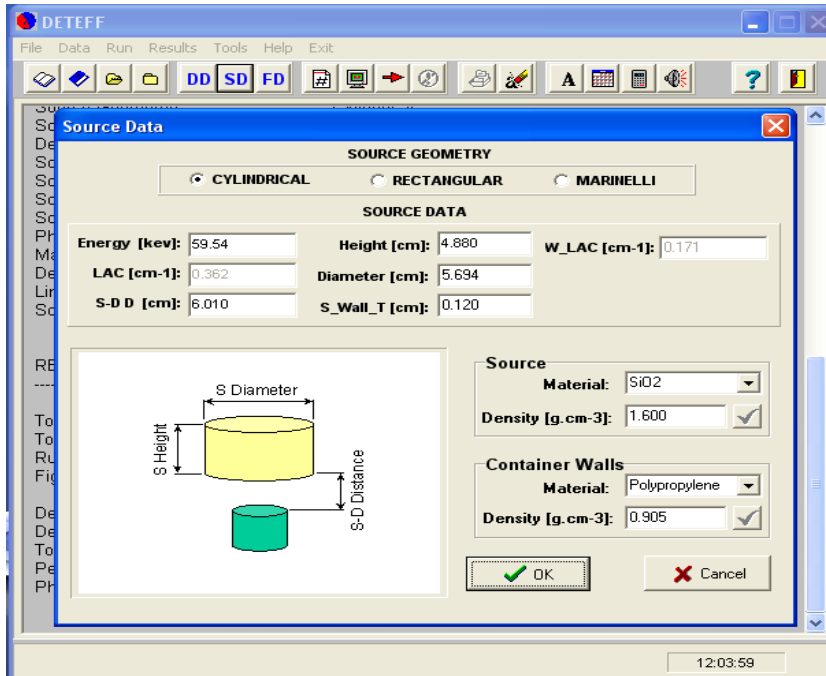
Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12’de DETEFF’te modelleme yapılırken kullanılan geometrik parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.11 DETEFF yazılımı ile HpGe dedektör geometrisinin modellenmesi



Şekil 3.12 DETEFF yazılımı ile nokta kaynak geometrisinin modellenmesi



Şekil 3.13 DETEFF yazılımı ile hacim kaynak geometrisinin modellenmesi

Verim Transfer Faktörü (ETF) yaklaşımı önce nokta kaynaktan silindirik geometriye hem Gespecor yazılımı ile hem de DETEFF yazılımı ile yapılmıştır. Elde edilen ETF değerleri kullanılarak DETEFF yazılımı Gespecor yazılımı ile doğrulanmıştır.

Bunun için hem silindirik geometride kum matrisinde ^{134}Cs , ^{137}Cs içeren bir hacim kaynak ile ^{134}Cs , ^{137}Cs nokta kaynaklar ile ölçüm yapılmıştır. Yazılımlar ile elde edilen verim değerleri önce ölçülen mutlak verim ile, daha sonra birbirleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Nokta kaynaktan hacim kaynağa ETF ve verim Eşitlik 3.7 ve 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

$$ETF = \frac{\varepsilon_{hacim(model)}}{\varepsilon_{nokta(model)}} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{hacim} = \varepsilon_{nokta(mutlak)} \cdot ETF \quad (3.8)$$

4. BULGULAR

4.1 Verim Kalibrasyon Sonuçları

Tez çalışmasında öncelikle, HPGe dedektör geometri parametreleri Gespecor yazılımında modellenerek elde edilen verim, nokta kaynak ölçümleri ile elde edilen mutlak verim ile karşılaştırılarak dedektör modeli doğrulanmıştır. Dedeksiyon verim değeri Gespecor yazılımı ile elde edilen TCC düzeltme faktörleri ile düzeltilerek kullanılmıştır. Modeli onaylanan dedektör parametreleri ve sahada kullanılan ölçüm geometrisi ile hacim kaynak (silindirik numune kabı) geometrisi de Gespecor yazılımı ile modellenmiştir. Kalibrasyon blokları ile aynı radyonüklitleri içeren RGK, RGU ve RGTh için TCC Gespecor yazılımında elde edilmiştir. Gespecor yazılımı ile nokta kaynaktan hacim kaynağa ETF elde edilmiş ve yöntem kullanılan kaynakların mutlak verimi ile doğrulanmıştır. Dikdörtgenel geometrinin modellenmesine imkan veren DETEFF yazılımı ile dedektör, nokta ve hacim kaynak Gespecor yazılımında kullanılan aynı parametreler ile modellenmiştir. Model, standart kaynakların mutlak verimi ile doğrulanmıştır. Nokta kaynaktan hacim kaynağa ETF, DETEFF'te elde edilen verim ile hesaplanmış ve bu ETF değerleri Gespecor yazılımı ile elde edilen ETF değerleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Nokta kaynaklar laboratuvar ortamında saha koşulları ile aynı geometride 11 cm kaynak dedektör mesafesinde 3600 saniyelik periyotlarda ölçülmüştür. Ölçümler 2 kere tekrarlanarak, sayım hızı değerleri ortalama değer alınarak kullanılmıştır. Spektrum analizleri **Isotopic Supervisor 4.0** programı ile yapılmıştır.

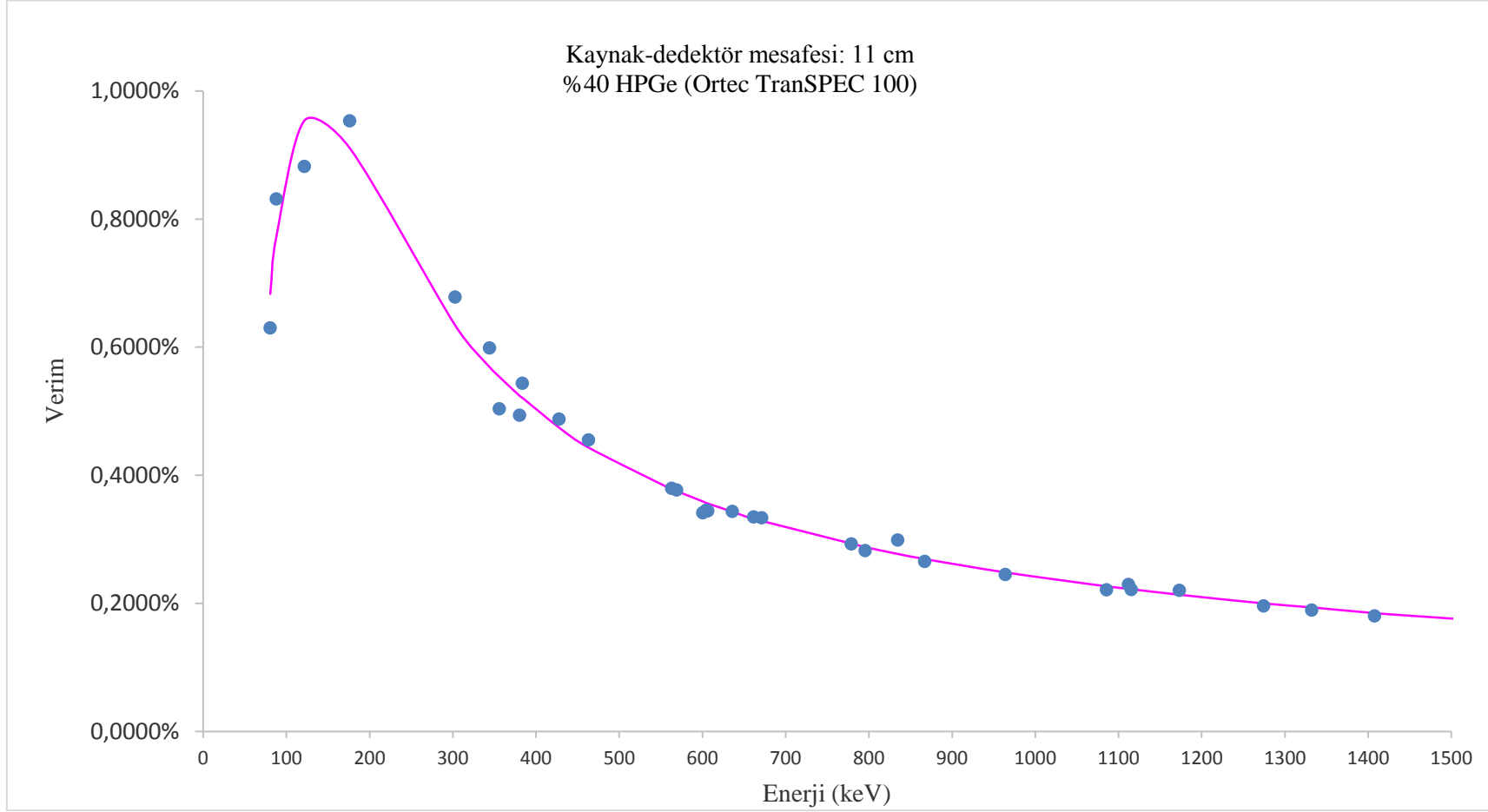
HPGe dedektörün her ölçümde stabil kaldığının kontrolü her spektrumdaki ^{40}K 1460.82 keV'deki enerji, tepe noktası, sayım hızı ve FWHM (Yarı yükseklikteki tam genişlik) değerinin kaydedilmesi ve birbiri içindeki uyumunun değerlendirilmesi ile takip edilmiştir. Gespecor yazılımı ile dedektör ve nokta kaynak numune geometrisi modellenerek TCC düzeltme faktörleri elde edilmiştir. Mutlak verim değeri TCC düzeltmesi ($1/\text{TCC}$) uygulanarak yapılmıştır. Aynı zamanda Gespecor yazılımı ile hesaplanan verim değeri de elde edilmiştir. Gespecor yazılımından elde edilen verim, mutlak verim ile karşılaştırılarak bağıl fark belirlenmiştir. Bu şekilde Gespecor yazılımında modellenen dedektör geometrisi doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1, Şekil 4.1 ve 4.2'de sunulmuştur

Çizelge 4.1 Nokta kaynak için belirlenen verim değerleri.

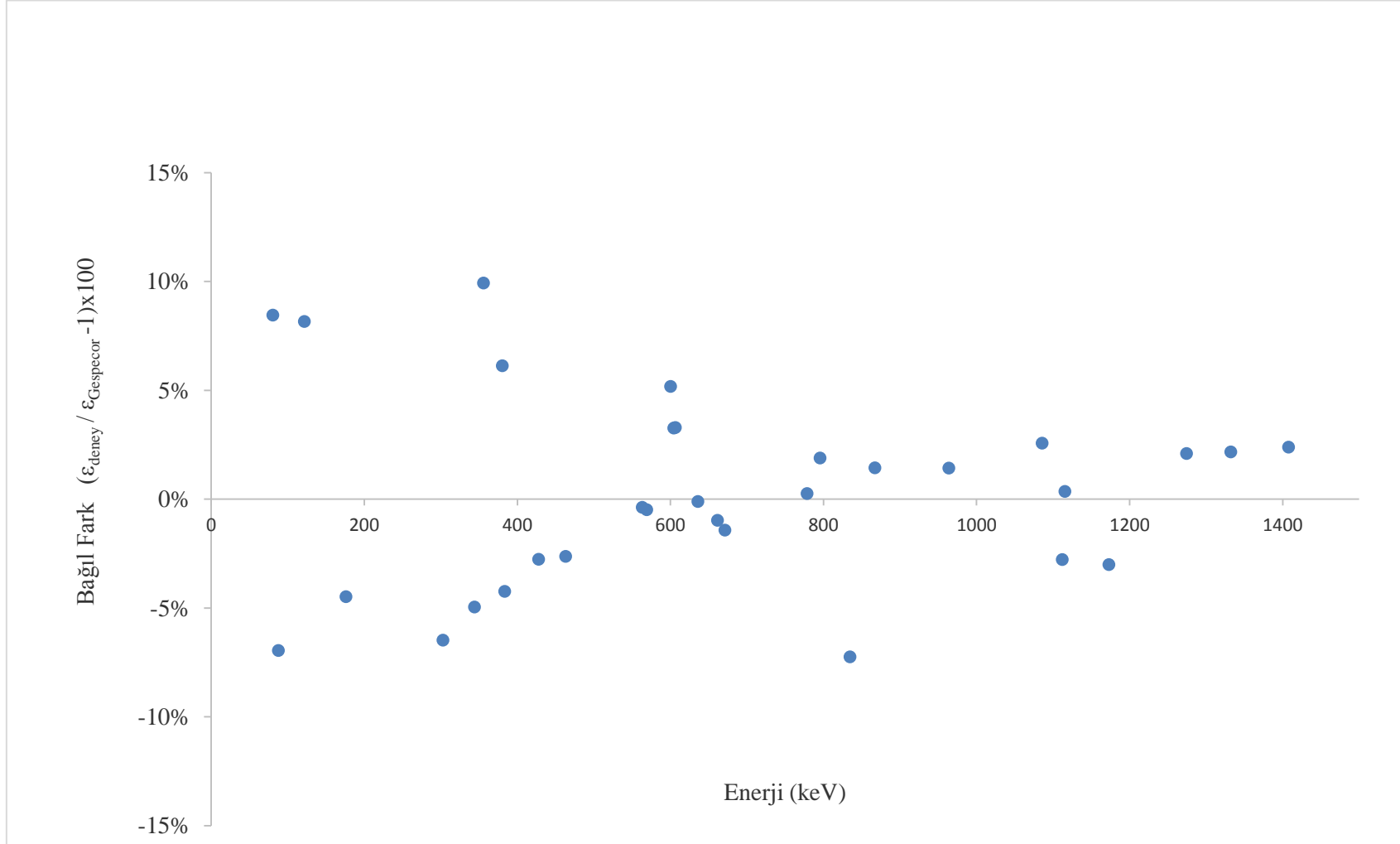
Radyonüklit	Enerji (keV)	F_γ (%)	K_{TCC}	Verim (%) (Mutlak)	Verim (%) (Gespecor)	Fark (%)
¹³³ Ba	80,00	35,94	0,98699	0,6300	0,6832	8,45
¹⁰⁹ Cd	88,03	3,66	1,00000	0,8315	0,7736	-6,95
¹⁵² Eu	121,78	28,41	0,98556	0,8821	0,9541	8,16
¹²⁵ Sb	176,31	6,82	0,99882	0,9531	0,9104	-4,48
¹³³ Ba	302,85	18,31	0,99701	0,6779	0,6340	-6,48
¹⁵² Eu	344,28	26,59	0,99011	0,5985	0,5688	-4,96
¹³³ Ba	356,01	62,05	0,99751	0,5035	0,5535	9,92
¹²⁵ Sb	380,45	1,52	1,00050	0,4935	0,5237	6,12
¹³³ Ba	383,85	8,94	1,00630	0,5436	0,5205	-4,24
¹²⁵ Sb	427,87	29,55	0,99986	0,4877	0,4742	-2,76
¹²⁵ Sb	463,37	10,48	0,99986	0,4549	0,4430	-2,63
¹³⁴ Cs	563,25	8,34	0,97526	0,3793	0,3779	-0,38
¹³⁴ Cs	569,33	15,37	0,97504	0,3768	0,3750	-0,49
¹²⁵ Sb	600,60	17,76	1,00010	0,3413	0,3590	5,18
¹³⁴ Cs	604,72	97,63	0,98423	0,3452	0,3565	3,27
¹²⁵ Sb	606,71	5,02	1,00010	0,3444	0,3557	3,29
¹²⁵ Sb	635,95	11,32	1,00020	0,3433	0,3430	-0,11

Çizelge 4.1 Nokta kaynak için belirlenen verim değerleri (devamı)

¹³⁷ Cs	661,66	84,99	1,00000	0,3345	0,3312	-0,97
¹²⁵ Sb	671,44	1,78	1,00090	0,3333	0,3285	-1,43
¹⁵² Eu	778,90	12,97	0,98781	0,2925	0,2932	0,26
¹³⁴ Cs	795,86	85,47	0,98498	0,2824	0,2877	1,89
⁵⁴ Mn	834,85	99,98	1,00000	0,2987	0,2771	-7,25
¹⁵² Eu	867,38	4,24	0,98147	0,2653	0,2691	1,43
¹⁵² Eu	964,08	14,5	0,99233	0,2448	0,2483	1,42
¹⁵² Eu	1085,84	10,13	1,00530	0,2208	0,2265	2,57
¹⁵² Eu	1112,08	13,41	0,98221	0,2291	0,2228	-2,78
⁶⁵ Zn	1115,54	50,22	1,00000	0,2213	0,2221	0,35
⁶⁰ Co	1173,23	95,85	0,98831	0,2200	0,2134	-3,01
²² Na	1274,54	99,94	1,00000	0,1958	0,1998	2,09
⁶⁰ Co	1332,49	99,98	0,98771	0,1895	0,1936	2,17
¹⁵² Eu	1408,01	20,85	0,99463	0,1803	0,1846	2,39



Şekil 4.1 In-situ nokta kaynak verim kalibrasyonu eğrisi



Şekil 4.2 Nokta kaynak mutlak verim-Gespecor verim yüzde fark dağılımı

RGK, RGU ve RGTh silindirik numune kabı içindeki standart kaynaklar, laboratuvar ortamında saha koşulları ile aynı geometride 11 cm kaynak dedektör mesafesinde ölçülmüştür. Ölçüm süresi ilgilenilen enerjilerdeki sayım belirsizliği %5'in altında kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle ölçümler, standart kaynakların referans aktivitesi dikkate alınarak en az 1 gün (86400 s) olacak şekilde yapılmıştır.

Net sayımın belirlenmesi için aynı geometride doğal fon sayımları yapılmıştır. Doğal fon ölçüm süresi ilgilenilen enerjilerdeki sayım belirsizliği %5'in altında kalacak şekilde en az 2 gün olarak belirlenmiştir.

Spektrum analizleri **Isotopic Supervisor 4.0** programı ile yapılmıştır.

Dedektörün her ölçümde karalı kaldığının kontrolü her spektrumdaki ^{40}K 1460.82 keV'deki enerji, tepe noktası, sayım hızı ve FWHM (Yarı yükseklikteki tam genişlik) değerinin kaydedilmesi ve birbiri içindeki uyumunun değerlendirilmesi ile takip edilmiştir.

Ölçümler 2 kere tekrarlanarak, mutlak verim ile karşılaştırıldığında en küçük % fark değerini veren verim değeri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Hacim kaynak için belirlenen verim değerleri.

Kaynak	Enerji (keV)/ Radyonüklit	K (TCC)	Verim (Mutlak)		Verim (Gespecor)	Fark (%)
RGU	186 keV ^{226}Ra	1,0000	0,014447	± %2,91	0,009117	-36,9
	241 keV ^{214}Pb	0,9998	0,006942	± %3,58	0,007945	14,4
	295 keV ^{214}Pb	1,0001	0,006859	± %1,95	0,006933	1,1
	352 keV ^{214}Pb	0,9998	0,006148	± %0,65	0,006105	-0,7
	609 keV ^{214}Bi	0,9837	0,004034	± %0,61	0,004072	0,9
	1120 keV ^{14}Bi	0,9824	0,002599	± %3,57	0,002690	3,5
	1764 keV ^{14}Bi	1,0004	0,001756	± %0,93	0,001922	9,5
RGTh	238 keV ^{212}Pb	0,9999	0,007010	± %1,06	0,008041	14,7
	583 keV ^{208}Tl	0,9803	0,004314	± %2,29	0,004227	2,0
	911 keV ^{228}Ac	0,9964	0,003075	± %1,89	0,003106	1,0
RGK	1460 keV ^{40}K	1,0000	0,002065	± %1,35	0,002163	4,8

ETF yaklaşımı ile verim hesabı için nokta ve hacim geometrilerinde ölçümleri yapılan kaynaklar kullanılmıştır. ^{134}Cs kaynağının 604 keV ve 795 keV'deki enerjileri dikkate alınmıştır. Çok enerjili olan bu radyonüklit için mutlak verim değeri hesaplanırken

Gespecor yazılımı ile elde edilen TCC düzeltme faktörleri dikkate alınmıştır. Aşağıdaki çizelgede, aynı dedektör ve numune (nokta ve hacim kaynak) geometrileri ile Gespecor ve DETEFF ile yapılan modellemeler ile elde edilen ETF faktörleri gösterilmiştir. Hesaplanan ETF değerlerindeki % fark değerleri incelendiğinde, DETEFF yazılımının Gespecor yazılımı ile çok yakın sonuçlar verdiği ve bu şekilde Gespecor yazılımı ile karşılaştırılarak doğrulandığı görülmektedir.

HPGe dedektör ve referans kaynak parametrelerinin DETEFF yazılımı ile doğru sonuç verdiğini ve aktivite hesabında Verim Transfer Yaklaşımının, Gespecor yazılımı ve DETEFF yazılımı ile başarılı bir şekilde uygulandığı Çizelge 4.3'ten görülmektedir.

Çizelge 4.3 DETEFF ve Gespecor ile elde edilen ETF değerlerinin karşılaştırılması.

Radyonüklit	Enerji (keV)	ETF (Gespecor)	ETF (DETEFF)	Göreceli Fark (%)
¹³⁴ Cs	604	1,122	1,118	-0,35
	795	1,154	1,150	-0,34
¹³⁷ Cs	661	1,132	1,129	-0,29

Benzer şekilde, U, Th ve K kalibrasyon Blokları DETEFF ile 11 cm dedektör kaynak mesafesinde modellenmiştir. Dikdörtgenel numune geometrisine imkan veren DETEFF yazılımında verim değeri elde etmek için malzemenin o enerjideki lineer soğurma katsayılarının (μ , cm^{-1}) belirlenmesi gerekmektedir.

Bir yazılım ile kaynak modellemesi yapılırken, kullanılan standart kaynağın matrisini oluşturan elementlerin lineer soğurma katsayısının (μ , cm^{-1}) bilinmesi gerekmektedir. Nokta ve hacim kaynakların modellemeleri yapılırken (Gespecor ve DETEFF) standart kaynak kompozisyonları bilindiği için ve bu maddelerin lineer soğurma katsayıları yazılımda yüklü olduğu için yazılımın verdiği değerler kullanılmıştır.

Kalibrasyon bloklarının element bileşimi (kompozisyonu) ise tam olarak bilinmemektedir. Beton blokların elementel kompozisyonunun bilinmesi modellemeler ile verim elde edilmesi için gereklidir. Ancak elementel analiz için kalibrasyon bloklarından numune almak mümkün olmadığı için blokların beton olduğu bilgisi ile (MTA 2014) NIST XCom'da beton için yaklaşık bir yapı alınmıştır.

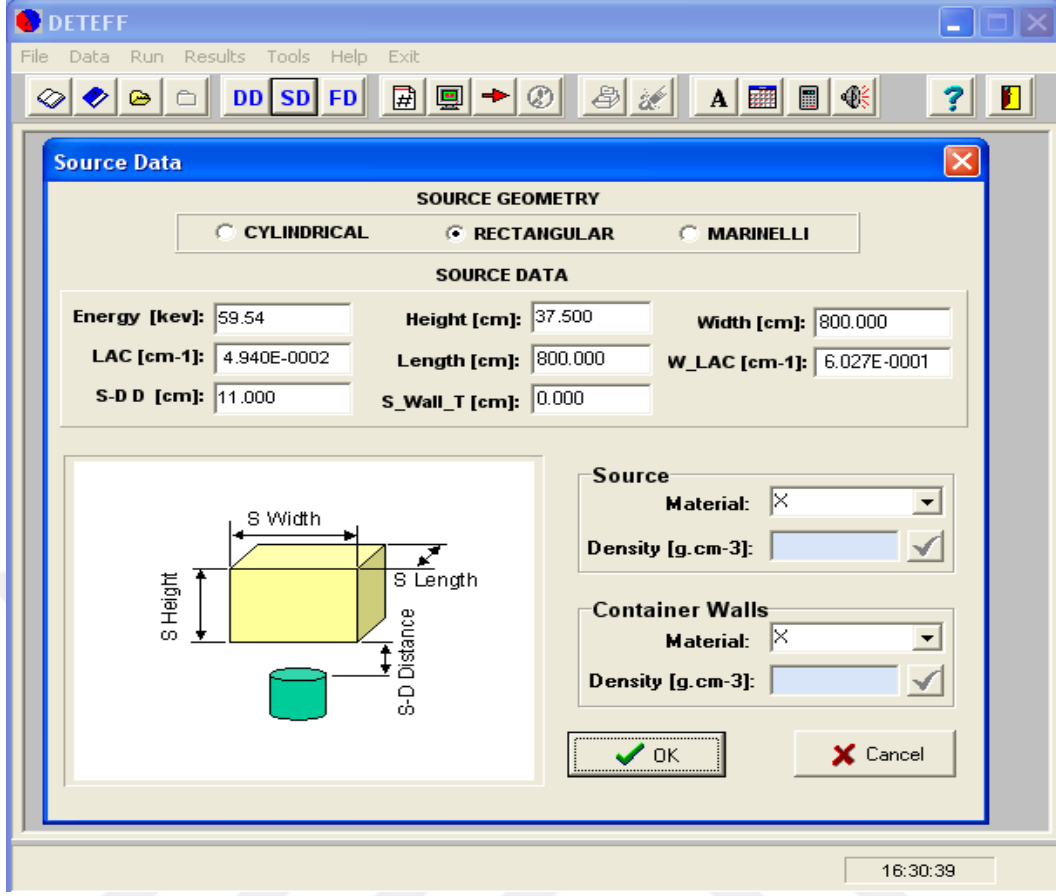
Çizelge 4.4 Adi betona ait elementel yapı (<https://physics.nist.gov/>)

Element	Derişim	Element	Derişim
Na	0,807 %	Co	298,9 ppm
Mg	1,124 %	Ni	554,4 ppm
Al	4,323 %	Cu	120,6 ppm
Si	18,425 %	Zn	188,1 ppm
P	0,117 %	Rb	105 ppm
S	0,301 %	Sr	925,9 ppm
K	1,462 %	Y	38,3 ppm
Ca	25,085 %	Zr	357,8 ppm
Ti	0,568 %	Ba	841 ppm
Cr	545,9 ppm	W	0,112 %
Mn	0,153 %	Pb	130,5 ppm
Fe	5,608 %	Co	298,9 ppm

Elde edilen veriye göre elementel yapı NIST XCom programında tanımlanmıştır (<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>). Bu tanımlamada yüksek derişim değeri olan elementler dikkate alınmıştır. Bu şekilde enerjiye karşı kütle soğurma katsayıları belirlenmiştir.

Elde edilen kütle soğurma katsayısının birimi $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dir. DETEFF'te kullanılan lineer soğurma katsayısının birimi cm^{-1} dir. Kalibrasyon bloklarının beton yapıda olduğu kabul edilerek yoğunluğu $2,46 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ olarak alınmıştır. NIST XCom'dan alınan değerler yoğunluk ile çarpılarak DETEFF'te cm^{-1} mertebesinde kullanılmıştır.

U, Th, K ve boş kalibrasyon bloklarının geometrik özellikleri ve kullanılacak enerjiye yönelik NIST XCom'dan elde edilen kütle soğurma katsayıları kullanılarak DETEFF'te ölçüm sistemi modellenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kalibrasyon bloklarının DETEFF yazılımı ile modellenmesi.

^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Çizelge 3.4'te verilen nükleer veri bilgileri, Çizelge 3.6'da MTA tarafından verilen U, Th, ve K derişimleri kullanılarak kalibrasyon bloklarının $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ cinsinden aktivite değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 Kalibrasyon bloklarının aktivite içerikleri.

Kalibrasyon Bloğu	^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	^{232}Th ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	^{238}U ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)
^{232}Th	370,36±0,01	203,95±0,43	31,98±0,04
^{238}U	386,19±0,01	28,39±0,11	288,55±0,27
^{40}K	2228,51±0,09	4,03±0,10	6,91±0,05
Boş	386,19±0,01	28,39±0,11	20,37±0,04

Daha önce silindirik numune kabı geometrisinde yapılan geometrik model ile RGK, RGU ve RGTh da DETEFF de modellenerek hacim kaynak için verim değerleri ilgilenilen enerjilerde elde edilmiştir.

DETEFF ile modellenerek elde edilen hacim kaynak ve kalibrasyon bloğu verim değerleri ile Eşitlik 4.1 kullanılarak ETF değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

$$ETF = \frac{\varepsilon_{kal.bloğu(model)}}{\varepsilon_{hacim(model)}} \quad (4.1)$$

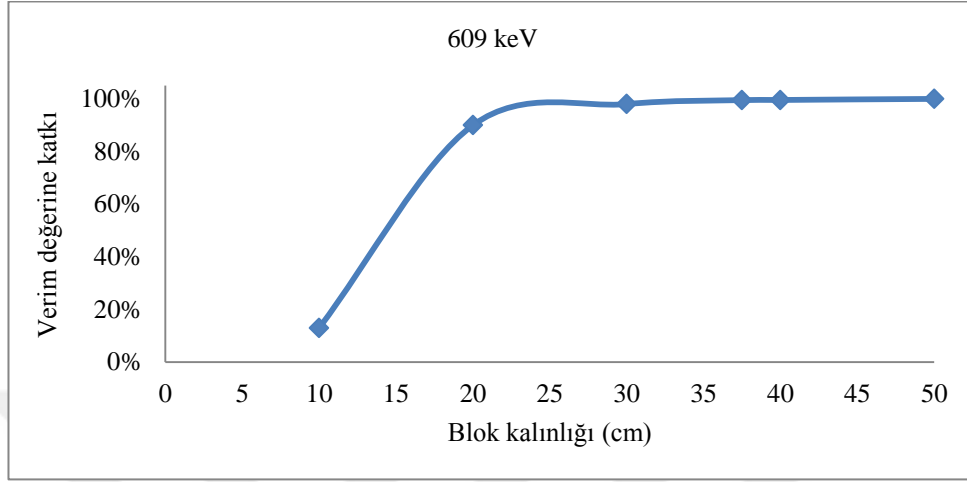
Çizelge 4.6 Kalibrasyon bloklarında elde edilen ETF değerleri.

	E (keV)	μ (cm ⁻¹)	Verim _{DETEFF} (hacim kaynak)	Verim _{DETEFF} (kalibrasyon bloğu)	ETF
²³⁸ U	186	0,325980	0,009983	0,000001309	0,00013112
	241	0,296713	0,008910	0,000001289	0,00014467
	295	0,272138	0,007860	0,000001184	0,00015064
	352	0,254678	0,006965	0,000001075	0,00015434
	609	0,201489	0,004761	0,000000960	0,00020140
	1120	0,151653	0,003180	0,000000826	0,00025987
	1764	0,120590	0,002310	0,000000765	0,00033117
²³² Th	238	0,298078	0,008972	0,000001216	0,00013553
	583	0,205445	0,004900	0,000000969	0,00019769
	911	0,167790	0,003639	0,000000863	0,00023702
⁴⁰ K	1460	0,132128	0,002582	0,000000771	0,00029841

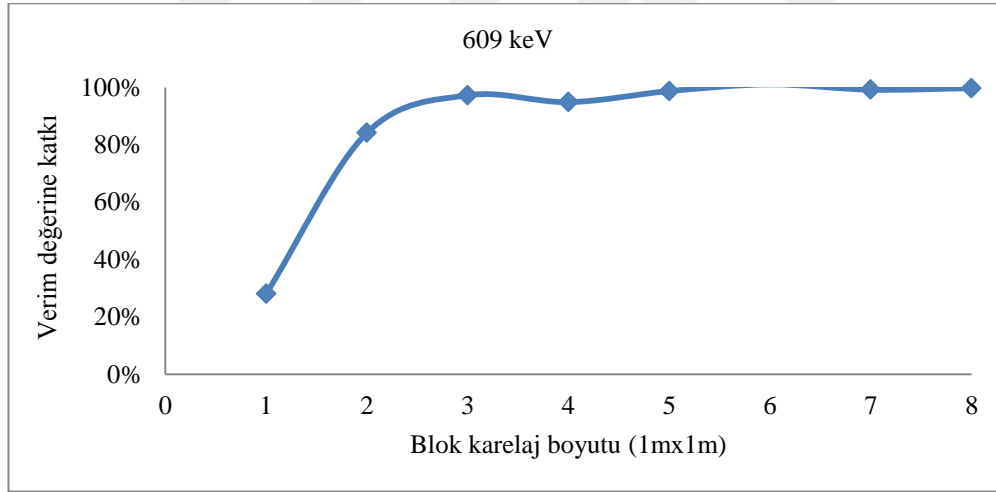
Kalibrasyon bloklarının modellemeye kullanılan geometrik boyutlarının (8m x 8m x 0,375m), 11 cm kaynak-dedektör mesafesinde verime etkisinin değerlendirilmesi için, kalibrasyon bloklarının kalınlığının ve genişliğinin dedektör sayım sistemi verim değerine yüzdesel katkısı DETEFF ile hesaplanmıştır.

Genişlik testi için 37,5 cm sabit alınıp blok genişliği 1m x 1m artırılarak, kalınlık testi analizi için de 4m x 4m genişlik sabit alınıp blok kalınlığı 10 ar cm artırılarak,

ilgilenilen bütün enerjilerde verim değeri hesaplanmıştır. Temsili grafiksel sonuç 609 keV enerjisi için Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.4 Kalibrasyon bloklarının kalınlığının sayım sistemi verimine yüzdesel katkısı



Şekil 4.5 Kalibrasyon bloklarının genişliğinin sayım sistemi verimine yüzdesel katkısı

Yaklaşık 25 cm kalınlıktan sonraki ilave kalınlığın ve yaklaşık 3 m blok genişliğinden sonraki ilave genişliğin verim değerine katkısı % 3'ün altında kalmaktadır. Bu sonuçlar, MTA tarafından raporlanan ve modelleme için seçilen 37,5 cm blok kalınlığının ve 8 m x 8 m blok genişliğinin verim değerinin hesabı için yeterli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle boyuta ilişkin ilave düzeltme gerekmemektedir.

4.2. Kalibrasyon Blokları ile Sahada Yapılan Ölçümler

In-situ ölçümlerde, dedektörün en etkin kullanımı için pozisyonu, aşağı yöne bakan durumdur. Bu nedenle bir tripod yardımı ile kullanılır. Genel olarak kabul edilen dedektörün 1 m yukarıda ölçüm yapılmasıdır (ICRU REPORT 53, 1994).

Bu tez çalışmasında düşük aktiviteli kalibrasyon blokları kullanıldığı için dedektörün en etkin cevabını alabilmek için dedektör aktif yüzeyinden itibaren 11 cm mesafede dedektörün yerleştirildiği bir sehpa kullanılmıştır. Deney 11 cm yükseklikte dedektör baş aşağı pozisyonda iken yapılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Kalibrasyon bloku üzerinde in-situ HPGe dedektör ile ölçüm sistemi.

Şekil 4.6'da görülen sehpa ile en etkin mesafe ve süre belirlendikten sonra kalibrasyon blokları 1m x 1m'lik 64 parçaya bölünmüştür. Her bir 1m x 1m'lik karenin köşesi ölçüm noktası olarak belirlenmiş ve 49 noktada 600 s lik ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.7).

Çizelge 4.7 Kalibrasyon bloklarının ETF yaklaşımı ile belirlenen aktivite değerleri

	Enerji (keV)/ Radyonüklit	Mutlak Verim (Hacimsel kaynak için*)	ETF	Aktivite (Bq·kg ⁻¹)	Çizgisel Ağırlıklı Ortalama Aktivite (Bq·kg ⁻¹)
²³⁸ U	186 keV ²²⁶ Ra	0,014447	0,00013112	285,6	211,7±%2,6
	241 keV ²¹⁴ Pb	0,006942	0,00014467	199,1	
	295 keV ²¹⁴ Pb	0,006859	0,00015064	219,6	
	352 keV ²¹⁴ Pb	0,006148	0,00015434	224,8	
	609 keV ²¹⁴ Bi	0,004034	0,00020140	195,2	
	1120 keV ²¹⁴ Bi	0,002599	0,00025987	204,7	
	1764 keV ²¹⁴ Bi	0,001756	0,00033117	216,5	
²³² Th	238 keV ²¹² Pb	0,007010	0,00013553	169,4	172,0±%5,5
	583 keV ²⁰⁸ Tl	0,004314	0,00019769	173,6	
	911 keV ²²⁸ Ac	0,003075	0,00023702	174,5	
⁴⁰ K	1460 keV ⁴⁰ K	0,002065	0,00029841	1799,5	1799,5±%3,3

*Silindirik kaynak

4.3 Sarayköy’de Sahada Yapılan Ölçümler

Kalibrasyon bloklarında yapılan ölçüm şartları ile aynı koşullarda (dedektör kaynak mesafesi 11 cm) olacak şekilde, TAEK’in Sarayköy yerleşkesinde belirli bir alanda toprak yüzeyinde kontaminasyon ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan alan taş, ot vb. kaynaklardan temizlenmiştir. 10mx10m olacak şekilde bir alan hazırlanmıştır. Bu alanın merkezinde, ölçüm süresi en az 1 saat olacak şekilde ölçüm 4 kez tekrarlanmıştır. Sayım hızı değeri, bu dört ölçümde elde edilen sayım hızlarının ortalaması alınarak kullanılmıştır.

Ölçüm yapılan sahada, yüzeyden 0-10 cm derinlikten alınan toprak numunesi, TAEK-RHTD Gama Spektrometri Laboratuvarında (GML) silindirik geometrideki numune kabı içerisine hazırlanmış ve aynı geometride verim kalibrasyonu olan, zırlı konvansiyonel yöntem ile kullanılan %110 bağıl verimli HPGe dedektör ile sayılmıştır. Kullanılan dedektörün verim kalibrasyonu kum matrisinde, aynı geometride olan izlenebilir standart kaynakla yapılmıştır. Elde edilen spektrum Genie-2000 yazılımı ile analiz edilmiştir.

Kalibrasyon blokları üzerinde in-situ dedektör ile yapılan ölçümlerin analizlerinden elde edilen ortalama sayım hızı değerleri ve MTA tarafından verilen aktivite değerleri (Çizelge 4.5’te sunulan) Eşitlik 4.3’te kullanılarak ilgilenilen enerjilerde verim değeri elde edilmiş ve buradan SANAEM yüzey toprağının aktivite değeri hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N/t}{A \cdot f_\gamma(E)} \quad (4.3)$$

Sonuçlar ilgilenilen enerjilerde ağırlıklı ortalama alınarak Çizelge 4.8’de sunulmuştur

Çizelge 4.8 TAEK SANAEM yüzey toprağının analiz sonuçları

	SANAEM toprak aktivitesi (GML-konvansiyonel dedektör*) (Bq·kg ⁻¹)	SANAEM toprak aktivitesi (Bu tezde kullanılan in situ dedektör**) (Bq·kg ⁻¹)	GML sonucu ile fark (%)
²³⁸ U	22,0±3,3	27,1±4,1	+23,0
²³² Th	30,4±4,3	29,0±4,0	-4,7
⁴⁰ K	530,0±69,0	535,5±69,6	+1,0
¹³⁷ Cs	4,9±0,6	4,1±0,7	-17,4

* %110 bağıl verimli, p-tipi koaksiyel Canberra HPGe,

**%40 bağıl verimli, p-tipi koaksiyel Ortec Trans-SPEC 100

TAEK-SANAEM yüzey toprağının, kalibrasyon bloklarının bu tezde kullanılan %40 bağıl verimli Ortec Trans-SPEC 100 HPGe in-situ dedektör ile elde edilen analiz sonuçları ve MTA tarafından verilen aktivite değerleri kullanılarak elde edilen verime göre hesaplanan aktivite değeri, GML laboratuvarındaki %110 bağıl verimli konvansiyonel HPGe dedektör ile yapılan analiz sonucu elde edilen aktivite değeri ile iyi bir uyum göstermiştir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, saha şartlarında (in-situ) gama spektrometrik aktivite ölçümü için yüksek enerji ayırma güçlü bir in-situ HPGe dedektörünün 8mx8mx0,375m ebatlı özel kalibrasyon blokları (pad) kullanılarak kalibrasyonu yapılmış ve daha sonra bu sistemin radyoaktif kirlenmiş madde gömülü bir sahada uygulaması yapılmıştır. %40 bağıl verimli in-situ amaçlı HPGe dedektörün kalibrasyonu, MTA tarafından 1987 yılında Ankara Etimesgut Askeri Havaalanında cevher numunelerinin betona karıştırılarak elde edilen 8mx8mx0,375m boyutlarındaki dört farklı blok kullanılarak yapılmıştır. Mucur taban serilerek kurulan beton bloklar üzerinde, 1mx1m boyutunda çizgiler çizilerek 64 karelaja bölünmüş ve her blok üzerinde 49 ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

Kullanılan dedektör, %40 bağıl verimli ve elektrik soğutmalı p- tipi HPGe in situ dedektördür. (OrtecTransSPEC 100). U, Th ve K elementel içerikleri bilinen cevher numunelerinin betona karıştırılarak oluşturulan 8mx8mx0,375m boyutlarındaki dört farklı blokun doğrudan sayım hızları ve MTA tarafında verilen aktivite değerleri kullanılarak dedektörün verim kalibrasyonu yapılmıştır.

Bu çalışmada öncelikli hedef olarak, kalibrasyon bloklarının MTA tarafından verilen aktivite değerlerinin, HPGe dedektörle daha hassas ölçümleri yapılarak doğrulaması yapılmıştır.

Çizelge 5.1 Kalibrasyon bloklarının bu tez çalışmasında elde edilen aktivite değerlerinin MTA tarafından verilen değer ile karşılaştırılması

Kalibrasyon Bloğu	MTA Hesaplanan Değer*	Bu çalışmada ölçülen	MTA değeri ile fark (%)
²³² Th (Bq·kg ⁻¹)	203,9	223,5±31,3	9,6
²³⁸ U (Bq·kg ⁻¹)	288,5	254,8±38,2	-11,7
⁴⁰ K (Bq·kg ⁻¹)	2229	2296,1±298,5	3,0

*Beton kalibrasyon blokları için U, Th ve K derişimleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

DETEFF yazılımı ile ölçüm geometrisinde blok genişliği 1 m'den 10 m'ye ve blok kalınlığı 10 cm'den 60 cm'e kadar değiştirilerek verim değerinin değişimi incelenmiştir. Mevcut blok boyutlarının ölçüm geometrisinde kalibrasyon için yeterli olduğu görülmüştür.

SANAEM yüzey toprağının aktivitesi belirlenirken, kalibrasyon bloklarında yapılan ölçümlerde ve bilinen aktivite değerlerinde boş bloğun ölçümleri doğal fon olarak kullanılmıştır. Kalibrasyon bloğunun çevre toprak ve radon/toron ürünlerinden kaynaklanan doğal fon katkısı düşünülerek, bu katkının azaltılması açısından böyle bir yaklaşım yapılmıştır.

%40 bağıl verimli Ortec TransSPEC 100 HPGe in-situ dedektör, TAEK'in SANAEM yerleşkesinde tespit edilen test sahasında kullanılmıştır. Sahadan alınan numunelerin laboratuvar analizleri GML laboratuvarındaki %110 bağıl verimli konvansiyonel HPGe dedektör ile analiz edilerek, saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta kontamine sahada ¹³⁷Cs için de aktivite değeri bulunmuştur.

Bu tez çalışması, söz konusu bloklara HPGe sistemiyle elde edilen güncel aktivite değerleri; yerinde U, Th, K cevher aramaları veya jeolojik araştırmalar öncesinde ya da havadan tarama araçlarına entegre kullanılacak radyasyon ölçüm cihazlarının deneye dayalı kalibrasyonlarının yapılması için önemlidir.

İlk defa spektral çözünürlüğü yüksek p-tipi elektrik soğutmalı olan HPGe dedektör, ölçümlerde bir akü yardımıyla beslendiği için maximum 6-7 saatlik günlük çalışma fırsatı vermiş, geceleri dedektör ve akü tekrar şarj edilerek ölçümler yapılmıştır. Bu sistemin en önemli gereksinimi taşınabilir güç kaynağıdır. Sisteme yönelik bir taşınabilir güç kaynağı olmadığı için klasik bir otomobil aküsü ile çalışmalar yürütülmüştür.

Dedektör 11 cm yerden yüksekliğe yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Mesafenin bu kadar yakın olmasının en önemli avantajı dedektör cevabının açıya bağımlılığının azaltılmasıdır.

Bu tez çalışmasının, gelecekte farklı ölçüm geometrilerinde (beton blok-dedektör mesafesi=100cm'ye kadar) yapılan ölçümlere uyarlanması, in-situ gama spektrometrik ölçümlerin kaza durumlarında standardizasyonunu sağlayacaktır. Özellikle, dedektörün katı açı bağımlılığı incelenebilir ve saha-kaynak çeşitliliğine (toprak, beton, otlu kırsal alan vb.) göre verim kalibrasyonları yapılabilir. Ayrıca, spektral enerji ayırma gücü düşük, ancak dedeksiyon verimi yüksek NaI(Tl) ve LaBr₃(Ce) esaslı ölçüm cihazlarının in-situ gama spektrometrik ölçüm kabiliyetlerinin araştırılması da önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Boson, J., Ågren, G., Johansson, L., 2008. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 587, 304–314.
- Boson, J., 2008. Improving accuracy of in situ gamma-ray spectrometry. Department of Radiation Sciences, Radiation Physics. Umeå University, Sweden. Medical dissertation No. 1201. ISBN 978-91-7264-621-6.
- Boson, J., Plamboeck, A.H., Rameback, H., Ågren, G., Johansson, L., 2009. Evaluation of Monte Carlo-based calibrations of HPGe detectors for in situ gamma-ray spectrometry. J. Environ. Radioact. 100, 935–940.
- Boson, J., Lidström, K., Nylén, T., Ågren, G., Johansson, L., 2006. In-situ gamma-ray spectrometry for environmental monitoring: a semi empirical calibration method. Radiat. Prot. Dosim. 121, 310–316.
- Cornejo Diaz, N., Jurado Vargas, M., 2008. DETEFF: an improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors. Nucl. Instrum. Meth. A 586, 204–210.
- H.L. Beck, W.J. Gondon, W.M. Lowder, 1964. Spectrometric Technique for Measuring Environmental Gamma Irradiation, USAEC HA5L-150 1964.
- H.L. Beck, I. DeCampo, C. Gogolak, 1972. In situ Ge/Li/ and NaI/Tl/ Gamma-Ray Spectrometry, IJ3AEC HASL-258 /1972.
- H.Yücel, 2013. İleri Gama Spektroskopisi Ders Notları.
- IAEA-TECDOC566 Use of gamma ray data to define the natural radiation environment.
- IAEA-TECDOC1363 Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data.
- IAEA-TECDOC1092 Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency
- ICRU REPORT 53, 1994. Gamma Ray Spectrometry in the Environment.
- I.K.Helfer and K.M.Miller, 1988. Calibration Factors for Ge Detectors Used for Field Spectrometry, HealthbPhys., 55, 15-29,
- J.C.Gonzalez, N.C.Diaz, M.J.Vargas, Application of the Monte Carlo code DETEFF to efficiency calibrations for in situ gamma-ray spectrometry, Applied Radiation and Isotops

- MTA, 2014. Kalibrasyon Bloklarının Kullanılması ile İlgili 11. Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı ile MTA Gn. Md. lüğü arasında yapılan onaylı protokol, 2014.
- Knoll, 2000. G. F. Radiation Detection and Measurement, 3rd Edition.
- Kocsy Gabor, 2008. Efficiency of the detection in-situ gamma spectrometry.
- Laraweb Nucleide-Lara. <http://www.nucleide.org/Laraweb/>, Library for gamma and alpha emissions, erişim: 10 Temmuz 2019.
- Marouf B.A., Mohamed A.S., Taha J.S., 1993. Assessment of exposure rate and collective effective dose equivalent in the city of Baghdad due to natural gamma radiation, Sci.Tot.Environm. 133,133-137.
- UNSCEAR, 2000. United Nation Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation Sources, Effects and risk of ionizing radiation, Report of UNSCEAR to the General Assembly UN - New York.
- User's Manuel, trans-SPEC Series Portable Integrated HPGe Spectrometer Systems, ORTEC Part No. 931009 0208 Manual Revision H.
- XCOM <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, Photon Cross Section Data, erişim: 10 Temmuz 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mine ÖZGÜR

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 02.09.1978

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Aydınlıkevler Lisesi, 1995

Lisans: Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü, 1999

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 2004

Çalıştığı Kurumlar (Kurum ve Yıllar)

Kırıkkale Üniversitesi Fizik Bölümü 2000-2001

Milli Savunma Bakanlığı 2001-2010

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu 2010-Halen