

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

²³⁵U ZENGİNLİK TAYİNİNDE EŞ- EKSENLİ GRİD ELEKTROTLU CdZnTe
DEDEKTÖRLERİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE
MASKELENMİŞ GAMA SPEKTRUMLARININ ÇÖZÜMLENMESİ İÇİN
ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ

SEFER BALCI

MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI
SAĞLIK FİZİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ANKARA

2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

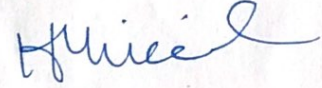
SEFER BALCI tarafından hazırlanan “ ^{235}U Zenginlik Tayininde Eş- Eksenli Grid Elektrotlu CdZTe Dedektörlerin Uygulanabilirliğinin İncelenmesi Ve Maskelenmiş Gama Spektrumlarının Çözümlemesi İçin Algoritma Geliştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimleri 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

İmza

Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü

İmza



Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU

Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

19.06.2019



Sefer BALCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

²³⁵U ZENGİNLİK TAYİNİNDE EŞ-EKSENLİ GRİD ELEKTROTLU CdZnTe DEDEKTÖRLERİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE MASKELENMİŞ GAMA SPEKTRUMLARININ ÇÖZÜMLENMESİ İÇİN ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ

Sefer BALCI

Ankara Üniversitesi

Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Uranyum zenginliği tayini uranyum teknolojilerinde büyük öneme sahiptir. Özellikle nükleer tesislerde, nükleer madde akışında kayıtların tutulması, nükleer güvenlik, nükleer emniyet ve nükleer güvence denetimlerinde kullanılan veya bir yerden başka bir yere taşınan uranyumların zenginlik değerlerinin doğru ve hızlı bir şekilde belirlenmesi saha çalışmalarında önemlidir. Ayrıca uranyum veya plütonyum gibi özel nükleer bölünebilir malzemelerin yasal olmayan yollardan nakli ve ticareti gibi durumları engellemek için gümrüklerde ya da limanlarda yapılacak olan hızlı ve doğru bir uranyum tespiti, uranyum kaçakçılığının tespitinde hayati öneme sahiptir.

Bu tezde saha çalışmalarına herhangi bir soğutmaya ihtiyaç duymaması ve enerji ayırma gücünün NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerine kıyasla daha iyi olan eş-eksenli grid elektrotlu CdZnTe dedektörleri kullanılarak, ²³⁵U zenginlik tayininin yapılabilmesi ve farklı ölçüm koşullarında (ölçüm süresi, ölçüm mesafesi ve diğer radyoaktif malzemeler ile maskeleme etkileri) uygulanabilir hızlı ve doğru sonuç veren bir algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı ²³⁵U zenginlik derecesine sahip uranyum standart referans malzemeler kullanılarak, 15x15x7,5 mm³ CdZnTe dedektörüyle belirli bir ölçüm geometrisinde uranyum spektrumları elde edilmiştir. Yapılan gama analizleri sonrasında yeni bir spektrum çözümleme algoritması geliştirilmiştir. Saha şartlarını simüle etmek için radyometrik benç üzerine kurulan CdZnTe ölçüm sistemi ile farklı ölçüm sürelerinde ve farklı ölçüm mesafelerinde ve diğer radyoaktif kaynaklar tarafından maskelenerek alınan tüketilmiş uranyum(DU),doğal uranyum (NU) ve kütlece %4.5 ²³⁵U'e kadar düşük zenginlikteki uranyumlar (LEU) için yapılmıştır. Elde edilen deneysel bulgulara göre, uranyum numunelerindeki ²³⁵U izotopunun bolluğu, geliştirilen algoritma ile referans değerlerine kıyasla % 10'dan düşük sapmalar ile doğru bir şekilde belirlenmiştir. ²³⁵U tayininde, farklı ölçüm şartları etkisiyle oluşan farklılıklar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Bu tez çalışması, "ABH67390007- J02012 kodlu "Nükleer Madde Karakterizasyonunda ²³⁵U İzotopik Bolluğunun HPGe ve CdZnTe Dedektörlü Gama Spektroskopisiyle Belirlenmesi-Method Development for HpGe and CdZnTe Detector Based Gamma Spectroscopic Determination of Isotopic Abundance in Nuclear Material Characterization (2017-2020)" UAEA koordineli araştırma projesi(CRP) tarafından desteklenmiştir.

2019, 84 sayfa

Anahtar Kelimeler: CdZnTe dedektörleri, ²³⁵U, uranyum zenginlik tayini, maskeleme, gama spektrumu, uranyum zenginlik ölçer prensibi

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF COPLANAR GRID CdZnTe DETECTORS TO DETERMINE ^{235}U ENRICHMENT IN SAMPLES AND DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM TO ANALYZE OF THE MASKED GAMMA-RAY SPECTRUM

Sefer BALCI

Ankara University

Institute of Nuclear Sciences

Department of Medical Physics

Supervisor: Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Accurate and rapid determination of uranium enrichment is very important in uranium processing technologies. In addition, fast and accurate detection of uranium at border check-points to prevent illegal trafficking and trade of special nuclear materials, such as uranium or plutonium, is crucial in nuclear material security.

In this thesis, an algorithm has been developed for quick and accurate determination of uranium enrichment with a room temperature, co-planar grid CdZnTe detectors which has better resolution than NaI(Tl) scintillation detectors. This spectrum de-convolution algorithm was tested for different measuring parameters such as measurement time, source-to-detector distance and masking of other radioactive materials.

To validate the algorithm implementation of ^{235}U enrichment determination, uranium enrichment analysis was carried out from the uranium spectra taken with a $15 \times 15 \times 7.5 \text{ mm}^3$ CdZnTe detector at a given measurement geometry using uranium standard reference materials. After these analyses, field conditions were simulated on a radiometric bench and uranium enrichment determination for natural uranium (0.72% ^{235}U) and for low enriched uranium (up to 4.5% wt. ^{235}U) and the materials masked by other radioactive sources was made by using newly developed spectrum de-convolution algorithm. The difference between the calculated enrichment values and the reference values were less than 10%. The difference becomes much lower in favorable conditions such as long counting time, ideal detector-sample distance, and masked by other radioactive materials. The interpretation of discrepancies in the ^{235}U enrichment results due to the effect of different measuring conditions are discussed in detail.

This thesis is fully supported by ABH67390007- J02012 coded IAEA Coordinated Research Project “Method Development for HpGe and CdZnTe Detector Based Gamma Spectroscopic Determination of Isotopic Abundance in Nuclear Material Characterization”.

2019, 84 pages

Key Words: CdZnTe, coplanar grid, ^{235}U , uranium, uranium enrichment determination, gamma-ray spectrum, masking

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez araştırma konumu belirleyen ve çalışmam boyunca bana araştırma yapma imkânı sağlayan, etik anlayışı ve deneyimi ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e;

Başta Nükleer Bilimler Enstitüsü Müdürü Sayın Prof. Dr. Niyazi MERİÇ olmak üzere tez çalışmam boyunca desteğini veren Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü personeline;

Tezimin hazırlanması süresince yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Selin SAATCI, Neslihan Ceren KAPLAN ve Ayşen BARUT'a;

Her koşulda manevi ve maddi desteklerini esirgemeyerek her zaman yanımda olan başta babam Nurettin BALCI ve annem Perihan BALCI olmak üzere tüm aile üyelerime;

Çalışmalarım boyunca bana her zaman yardımcı olan ve sabırla yanımda olan eşim Nefise BALCI'ya

En içten dileklerle teşekkür ederim.

Sefer BALCI

Ankara, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. Kadmiyum Çinko Tellür (CdZnTe) Dedektörlerinin Genel Özellikleri	4
2.2. CdZnTe Dedektörlerinin Çalışma Prensipleri.....	6
2.3. Ölçüm Sistemi Kalibrasyonları	7
2.3.1. Enerji kalibrasyonu	7
2.3.2. Puls şekli kalibrasyonu	8
2.3.3. Verim kalibrasyonu	9
2.4. Uranyum Zenginlik Ölçer Prensibi.....	10
2.4.1. Net pik alanı belirleme	12
2.4.2. Net pik alanındaki belirsizlik hesabı.....	14
2.5. Uranyum Zenginlik Tayininde Mutlak Yöntem	15
2.6. Uranyum Zenginlik Tayininde Bağlı (relative) Yöntem	16
2.7. Lineer Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi.....	16
2.8. Uygun Ölçütü	17
3. MATERYAL YÖNTEM	20
3.1. CdZnTe Dedektörlü Gama Ölçüm Sistemi	20
3.2. Enerji Kalibrasyonu	24
3.3. Spektroskopi Sistemi Verim Kalibrasyonu	24
3.4. Kullanılan Uranyum Standart Referans Malzemeleri	24
3.5. Uranyum Zenginlik Ölçer Prensibi.....	27
3.6. Deney Düzenegi.....	28
3.7. Pik Alanı Hesabı için Nümerik Yaklaşım.....	30
3.7.1. Yeni algoritma ile pik eğri uyarlaması	31

4. BULGULAR	33
4.1. Verim Kalibrasyonu Bulguları	33
4.2. Ölçüm Süresinin Sayım İstatistiğine Etkisi	36
4.3. Ölçüm Mesafesi Değişimi	60
4.4. Maskeleyici Radyoizotop Kaynakların Etkisi	74
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	77
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	84



SİMGELER DİZİNİ

ADC	Analogdan Dijitale Dönüştürücü
CdZnTe	Kadmiyum Çinko Tellür
CRP	Kordineli Araştırma Projesi
DU	Tüketilmiş Uranyum
FOM	Uyum Ölçütü (Figure of Merit)
LEU	Düşük Zenginlikteki Uranyum
MCA	Çok Kanallı Analizör
MFOM	Modifiye Uyum Ölçütü
NaI(Tl)	Talyum aktivatörlü Sodyum İyodür
NRM	Nükleer Referans Malzeme
NU	Doğal Uranyum
UAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
%wt.	Ağırlıkça Yüzde
%at.	Atom Yüzdesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 CZT Dedektörünün tasarımları şematik gösterim	6
Şekil 2.2 Katı malzemelerde enerji bantları şematik gösterim	6
Şekil 2.3 Uranyum zenginlik ölçer prensibi ölçüm geometrisi şematik gösterimi	11
Şekil 2.4 Net pik alanı hesabı.....	13
Şekil 3.1 Eş-eksenli grid yapılı CdZnTe dedektör grid yapısı, ön yükselteç ve elektronik bağlantıları (Schlesinger vd, 2001).....	20
Şekil 3.2 CdZnTe Dedektör elektroniğinin şematik gösterimi	21
Şekil 3.3 CdZnTe Dedektörü gama spektroskopi sistemi.....	22
Şekil 3. 4 ⁵⁷ Co (122 keV) ve ¹³⁷ Cs (662 keV) kaynak spektrumları.....	23
Şekil 3.5 Standart uranyum kaynaklarının alüminyum kabının özellikleri (Bièvre, 1986)	26
Şekil 3.6 Sertifikalı NRM171 kodlu uranyum standart referans malzemeleri.....	27
Şekil 3.7 CdZnTe kurulumu yapılan radyometrik benç şematik gösterimi	28
Şekil 3.8 Geliştirilen algoritmanın akış şeması.....	30
Şekil 4.1 15x15x7,5 mm ³ CdZnTe dedektör – silindir U ₃ O ₈ kap geometri için d = 5cm’de ölçülen deneysel verim	35
Şekil 4.2 15x15x7,5 mm ³ CdZnTe dedektör – silindir U ₃ O ₈ kap geometri için d = 5cm’de EFFTRAN programı ile hesaplanan verim.....	35
Şekil 4.3 15x15x7,5 mm ³ CdZnTe dedektör – silindir U ₃ O ₈ kap geometri için EFFTRAN programı ile hesaplanan verimin mesafe ile değişimi	36
Şekil 4.4 ²³⁵ U izotopunun 185,72 keV enerjili fotopiki için 15x15x7,5 mm ³ CdZnTe dedektör – silindir U ₃ O ₈ kap geometrinde EFFTRAN programı ile hesaplanan verimin mesafe ile değişimi.....	36
Şekil 4. 5 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM 171-071) için dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	37
Şekil 4. 6 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	37
Şekil 4. 7 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	38
Şekil 4. 8 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	38

Şekil 4. 9 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	39
Şekil 4.10 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	39
Şekil 4.11 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	40
Şekil 4.12 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	40
Şekil 4.13 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	41
Şekil 4.14 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	41
Şekil 4.15 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	42
Şekil 4.16 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	42
Şekil 4.17 Düşük zenginlikte uranyum ((LEU % 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	43
Şekil 4.18 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	43
Şekil 4. 19 Düşük zenginlikte uranyum ((LEU % 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	44

Şekil 4.20 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	60
Şekil 4.21 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	61
Şekil 4.22 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	61
Şekil 4.23 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	62
Şekil 4.24 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	62
Şekil 4.25 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	63
Şekil 4.26 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği	63
Şekil 4.27 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için dedektör 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	64
Şekil 4.28 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ²³⁵ U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği.....	64
Şekil 5.1 Yeni algoritma MFOM ölçütüne göre 185,72 keV ve 1001,02 keV pikleri için eğri uyarlaması	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 CdZnTe kristalinin karakteristik özellikleri (Sordo vd. 2009)	5
Çizelge 3.1 15 mm x 15 mm x 7,5 mm CPG CdZnTe dedektörünün karakteristik özellikleri	21
Çizelge 3.2 Ölçüm spektroskopisi parametreleri	23
Çizelge 3.3 Enerji kalibrasyonunda kullanılan radyoaktif izotoplar ve bozunma (decay) özellikleri	24
Çizelge 3.4 Kullanılan uranyum standart referans malzemeleri özellikleri (Bièvre, 1986)	25
Çizelge 3.5 EC-NRM171 kodlu uranyum standart referans malzemeleri alüminyum taşıma kabı özellikleri (Bièvre, 1986)	26
Çizelge 3.6 Ölçüm planı.....	29
Çizelge 4.1 Nokta kaynaklar kullanılarak deneysel verim için elde edilen veri noktaları ve uyarlanan eğri fonksiyonundan elde edilen verim değerleri.....	33
Çizelge 4.2 Deneysel verilerin alüminyum kabında U ₃ O ₈ ortamına efftran ile transfer edilerek elde edilen verim değerleri ve bu verim noktaları için uyarlanan eğriden elde edilen verim değerleri	34
Çizelge 4.3 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları	45
Çizelge 4.4 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları.....	45
Çizelge 4.5 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,7 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	46
Çizelge 4.6 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,7 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	46
Çizelge 4.7 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	47
Çizelge 4.8 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	47
Çizelge 4.9 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	48
Çizelge 4.10 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	48
Çizelge 4.11 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	49
Çizelge 4.12 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	49
Çizelge 4.13 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları	50

Çizelge 4.14 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları.....	50
Çizelge 4.15 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	51
Çizelge 4.16 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	51
Çizelge 4.17 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	52
Çizelge 4.18 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	52
Çizelge 4.19 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	53
Çizelge 4.20 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	53
Çizelge 4.21 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	54
Çizelge 4.22 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	54
Çizelge 4.23 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları.....	55
Çizelge 4.24 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları.....	55
Çizelge 4.25 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	56
Çizelge 4.26 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	56
Çizelge 4.27 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	57
Çizelge 4.28 NRM171-295 (% 2,99 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	57
Çizelge 4.29 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	58
Çizelge 4.30 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	58
Çizelge 4.31 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	59
Çizelge 4.32 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	59
Çizelge 4.33 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	65
Çizelge 4.34 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	65
Çizelge 4.35 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	66

Çizelge 4.36 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	66
Çizelge 4.37 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	67
Çizelge 4.38 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	67
Çizelge 4.39 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	68
Çizelge 4.40 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	68
Çizelge 4.41 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	69
Çizelge 4.42 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	69
Çizelge 4.43 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	70
Çizelge 4.44 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	70
Çizelge 4.45 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	71
Çizelge 4.46 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 600s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	71
Çizelge 4.47 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	72
Çizelge 4.48 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 900s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	72
Çizelge 4.49 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için algoritma bulguları	73
Çizelge 4.50 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵ U) Örneği için ölçüm süresi 1800s'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları	73
Çizelge 4.51 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	74
Çizelge 4.52 Doğal uranyum (% 0,72 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	74
Çizelge 4.53 Düşük zenginlikteki uranyum (% 1,97 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	75
Çizelge 4.54 Düşük zenginlikteki uranyum (% 1,97 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	75
Çizelge 4.55 Düşük zenginlikteki uranyum (% 2,98 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	75

Çizelge 4.56 Düşük zenginlikteki uranyum (% 2,98 ²³⁵ U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları.....	76
---	----



1. GİRİŞ

Uranyum zenginliği tayini uranyum teknolojilerinde büyük öneme sahiptir. Özellikle nükleer tesislerde, nükleer madde akışında kayıtların tutulması, nükleer güvenlik, nükleer emniyet ve nükleer güvence denetimlerinde kullanılan veya bir yerden başka bir yere taşınan uranyumların zenginlik değerlerinin doğru ve hızlı bir şekilde belirlenmesi saha çalışmalarında önemlidir(Yücel 2007). Ayrıca uranyum veya plütonyum gibi özel nükleer bölünebilir malzemelerin (special nuclear materials) yasal olmayan yollardan nakli ve ticareti gibi durumları engellemek için gümrüklerde ya da limanlarda yapılacak olan hızlı ve doğru bir uranyum tespiti, uranyum kaçakçılığının tespitinde hayati öneme sahiptir (Yücel vd. 2009). Uranyum zenginliğinin belirlenmesinde geleneksel olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektroskopisi sistemine(Mortreau ve Berndt 2004) alternatif olabilecek, mevcut olan yarı iletken teknolojisiyle geliştirilen eş-eksenli grid elektrotlu CdZnTe (CPG CZT) dedektörlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunun en temel nedeni, CdZnTe dedektörleri herhangi bir soğutmaya ihtiyaç duymaması ve enerji ayırma gücünün sintilasyon dedektörlerine kıyasla daha iyi olması, bu tip dedektörlerin saha çalışmalarında kullanılabilirliğini cazip hale getirmektedir (Yücel vd. 2012). Bu tez kapsamında düşük zenginlikteki uranyum (LEU), tüketilmiş uranyum (DU) ve doğal uranyum (NU) numunelerinde eş-eksenli grid elektrotlu CdZnTe dedektörü kullanılarak uranyum zenginleştirme derecesinin tayininin yapılabilirliğinin incelenmesi ve başka radyoaktif kaynaklar tarafından maskelenen uranyum spektrumlarının çözümlenmesi için bir algoritma geliştirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen bu tez çalışması uranyum zenginlik tayini sırasında karşılaşılan farklı ölçme koşulları göz önünde bulundurarak (sayım istatistiğinin etkilerini, dedektör kaynak mesafesi etkilerini ve farklı radyoaktif izotopların maskeleyen etkilerini) gerçekleştirilen zenginlik tayininin hızlı ve doğru bir biçimde yapılmasını amaçlamaktadır. Uranyum zenginlik tayininde, önemli etkenlerden birisi de alınan gama spektrumlarında “ilgilenilen pik alanın”, örneğin 185.7 keV(²³⁵U) karakteristik gama pik sayım değerinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Yapılan bu tez çalışması iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamasında 15mmx15mmx7,5mm CdZnTe dedektör düzeneği hareketli bir radyometrik benç üzerine kurulmuştur. Bu aşamada tüketilmiş uranyum (DU), doğal uranyum (NU) ve zenginlik derecesi kütlece %4,5 ²³⁵U'e kadar olan düşük zenginlikteki standart uranyum örnekleri

farklı koşullarda (ölçüm periyotları, dedektör kaynak mesafesi, diğer radyoaktif kaynaklar tarafından maskeleyme vb.) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde uranyum spektrumunun düşük enerji bölgesini (< 300 keV'e kadar) sırasıyla ¹³³Ba (53-383 keV), ⁵⁷Co (122-136 keV) ve ¹⁵²Eu (40-244 keV) gibi radyoaktif kaynakların maskeleyme etkileri için detaylı deneyler yapılmıştır. Tezin ikinci aşamasında elde edilen gama spektrumlarından kantitatif (nicel) ²³⁵U bolluk derecesine ulaşmak için ilgilenilen enerji bölgesinde, uranyumun analitik piklerinden en şiddetlisi 185, keV(% 57,0) pikinden en doğru ve kesin sayım değerlerini belirleyebilmek için yeni bir spektrum ayırma(de-convolution) algoritması geliştirmiştir Marqurt Levenberg en küçük kareler Yöntemi (Moré, 1978) temelinde, seçilen modifiye FOM (Figure-of-Merit) uyum kriteri minimize edilerek pik uyarlaması yapılmıştır. Özellikle CdZnTe dedektörünün en temel dezavantajı deşik mobilitesinin (~80 cm²/Vs), elektronların mobilitesine göre (~1350 cm²/Vs) daha düşük olmasından dolayı alınan spektrumlarda oluşan fotopiklerin düşük enerji bölgesinde deşiklerin daha yavaş sürüklenme hızlarından kaynaklı bir kuyruk oluşumu gözlemlenmektedir (Knoll, 2012, Yücel vd. 2012). Bu etki, pikin sol tarafındaki pik-vadi oranını (P/V) değiştirmekte ve oluşan pikin ideal gauss biçiminden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu durum ise kristal içindeki elektron-deşik hareketlerine bağlı olan "kuyruklanma (tailing)" olarak spektrumda gözlenen etkinin fotopik alanın doğru bir şekilde belirlenmesi için dikkate alınmasını gerektirmektedir. Diğer bir ifadeyle, CdZnTe dedektör tepkilerinin hem NaI(Tl) sintilasyon hem de HPGe yarıiletken dedektörlerinde farklı olması, elde edilen gama spektrumlarının çözümlenmesi için daha özel algoritmaların uygulanmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışmasında, fotopik alanlarının daha iyi belirlenmesi için MATLAB platformunda bir algoritma geliştirilerek pik alanlarının daha doğru hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Algoritma çıktıları hem kullanılan Genie 2000 yazılımı hem de pik belirlemede kullanılan Colegram yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan iki farklı yazılımla ve bu tezde geliştirilen algoritma ile elde edilen 185.7 keV fotopik alanları kullanılarak uranyum zenginlik ölçer prensibine dayalı, ölçülen uranyum standartlarındaki ²³⁵U zenginleştirme derecesi için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kullanılan standart numunelerin yapılan ölçüm koşullarına bağlı zenginlik tayinin nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. Daha sonra bu uranyum numuneleri, farklı ölçüm koşullarında (numunenin önünde, arkasında ve yan taraflarında) farklı radyoizotop kaynakları konularak

spektrumların maskelenme durumları incelenmiştir. Maskelenme deneylerinde elde edilen girişimli gama spektrumları çözümlenerek, elde edilen 185,7 keV fotopik alanlarından uranyum zenginlik ölçer prensibine göre zenginlik tayinine olan etkileri nicel olarak belirlenmiştir.

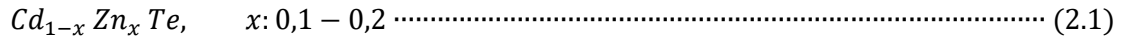
Tezin giriş bölümünde bilimsel problemin tanımı yapılmış ve gerekçesi verilmiştir. Literatür özetine yer verilmiştir. İkinci bölümünde ise kuramsal temelleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümünde kullanılan radyasyon dedeksiyon cihazları, sertifikalı uranyum referans malzemeler ve uygulanan yöntem açıklanmıştır. Dördüncü bölümde de elde edilen bulgular sunulmuştur. Sonuç ve tartışma bölümünde elde edilen bulgular tartışılarak geliştirilen spektrum çözümleme algoritmasının CdZnTe dedektöründe uygulanabilirliği konusunda öneriler sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu tez çalışmasında uygulanan tekniklerin ve geliştirilen algorithmada kullanılan yöntemlerin kuramsal temelleri açıklanacaktır.

2.1. Kadmiyum Çinko Tellür (CdZnTe) Dedektörlerinin Genel Özellikleri

İlk olarak Van Heerden 1945 yılında radyasyon ölçümlerinde kristalleri kullanmak için AgCl kristalleri üzerinde çalışmalar başlamıştır. Sonrasında ise geniş bant aralığına sahip yüksek atom numaraları olan kristallerde gama spektroskopisinde kullanmak için araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalarda öncelikle ikili bileşimler incelenip geliştirilirken sonralarında CdZnTe gibi üçlü bileşimlerde geliştirilmeye başlanmıştır (Sordo vd. 2009). CdZnTe dedektörleri yüksek atom numaraları, yoğunlukları ve oda sıcaklığındaki performansları sayesinde X ve gama ışını spektroskopisi için tercih edilen bir dedektör haline gelmiştir. Kadmiyum Çinko Tellür, kısaca (CdZnTe ya da CZT) dedektörleri yarı iletken prensibine göre çalışan katı hal dedektörleridir. Dedektör kristalinin formülü eşitlik 2.1 de verildiği gibidir. (Schlesinger vd, 2001)



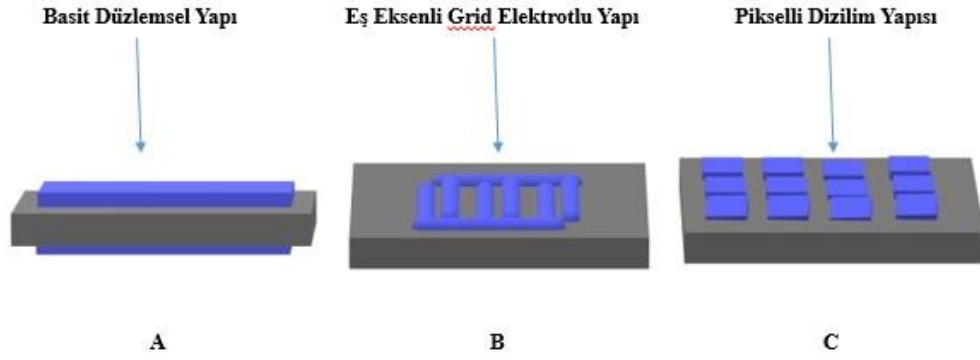
Burada x, kristal içindeki Zn miktarının %'sini ifade etmektedir ve farklı kristal üreticileri bu x değerini genelde %10 civarında belirlemektedir. CdZnTe, herhangi bir soğutmaya ihtiyaç duymaksızın oda sıcaklığında çalışmaktadırlar. Bu durum ise bu dedektörlerin saha çalışmalarında avantajlı duruma geçmelerini sağlamıştır. Etkin atom numarası yaklaşık olarak 50 civarındadır. Etkin atom numaralarının yüksek oluşu X ve Gama ışını ölçümlerinde tercih edilir hale gelmesinde etkili olmuştur. Dedektör kristalinin özellikleri Çizelge-2.1 de verilmiştir. Çizelge 2.1'de verile elektron mobilite-ömür çarpım değerinin $\mu_e \tau_e$ (cm²/V) yüksek olması, kristal içinde oluşan yük tuzaklamalarının düşük olduğunu ve dolayısıyla üretilen kristalin dedektör kalitesi açısından iyi olduğunu gösterir (Yücel

vd 2019) ve özdirencin yüksek olması da kaçak akımların düşük olacağını ve dolayısıyla sinyal-gürültü oranının iyi olduğu anlamındadır (Schlesinger vd, 2001).

Çizelge 2.1 CdZnTe kristalinin karakteristik özellikleri (Sordo vd. 2009)

Malzeme Özellikleri	Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te
Kristal Yapısı	Kübik
Atom Numaraları	48, 30, 52
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	5,78
Bant Genişliği (eV)	1,57
İyon Çifti Oluşum Enerjisi (eV)	4,6
Özdirenc (Ω cm)	10 ¹⁰
Elektron mobilite- ömür çarpımı $\mu_e \tau_e$ (cm ² /V)	10 ⁻³ -10 ⁻²
Deşik mobilite- ömür çarpımı $\mu_h \tau_h$ (cm ² /V)	10 ⁻⁵

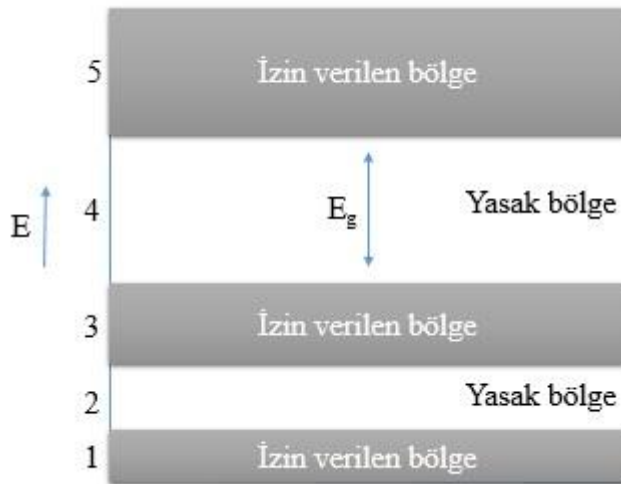
CdZnTe dedektörlerinin anot elektrot yapısal tasarımı, yük toplanmasını optimize etmek için farklı şekilde tasarımlanabilmektedir. Aşağıda üç farklı anot elektrot tasarımı şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 2.1). Bunlar sırası ile basit düzlemsel elektrot yapısı (planar, eş eksenli grid (coplanargrid) elektrotlu ve pikseli (pixelated) elektrot dizilimde konfigürasyonlarda yapılar oluşturularak, dedektör performansı iyileştirilebilmekte ve farklı amaçlarda kullanılabilir (Schlesinger vd, 2001).



Şekil 2.1 CZT Dedektörünün tasarımları şematik gösterim

2.2. CdZnTe Dedektörlerinin Çalışma Prensipleri

CZT dedektörleri katı hal dedektörleri olup yarı iletken yapıda bir kristale sahiptirler. Katı yapılar elektrik iletkenliğine göre üç gruba ayrılmışlardır. Bu gruplar iletken, yalıtkan ve yarı iletkenlerdir. Bu katı malzemeden düşük sıcaklarda akım geçiyor veya sadece yüksek sıcaklıklarda geçiyorsa bu tip katı malzemeler yarı iletken olarak tanımlanır (Tsoufanidis ve Landsberger, 2011). Serbest bir atomda elektronlar sadece belli enerji düzeylerinde bulunabilirler, katı malzemelerde ise bu enerji düzeyleri enerji bantlarına genişlemiş durumdadırlar. Elektronlar sadece bu enerji bantlarında bulunabilmektedirler (Şekil-2.2)



Şekil 2.2 Katı malzemelerde enerji bantları şematik gösterim

Yarı iletken kristallerde değerlik bandında bulunan elektronlar, sıcaklık ve radyasyon gibi dış etkenlerle yasak bölgeyi aşıp iletkenlik bandına ulaşabilmektedirler, elektronların uyarılması ile geride kalan kısımda deşik adi verilen pozitif yüklü boşluklar oluşmaktadır. Kristale uygulanan gerilimden kaynaklı oluşan elektriksel alanda elektron ve deşikler ters elektrotlarda toplanırlar. Hem elektronlar hem de deşiklerin sayısı gelen radyasyon bilgisini içeren yük taşıyıcılarıdır (charge carriers) (Knoll, 2010). Bu iki yükün toplamı da gelen radyasyondan kaynaklı oluşan pulsun genliğini oluştururlar.

2.3. Ölçüm Sistemi Kalibrasyonları

Ölçüm sisteminin performansını ve belirlemek ve ölçüme hazır hale getirmek için sistem enerji, puls şekli ve verim kalibrasyonları yapılarak kullanıma hazır hale getirilir.

2.3.1. Enerji kalibrasyonu

Ölçüm sisteminde alınan spektrumlarda kullanılacak pikleri doğru bir şekilde belirlemek için yayınladığı enerjileri belli olan radyoaktif kaynaklar kullanılarak sistemde hangi kanala hangi enerjinin karşılık geldiğini belirlemek için enerji kalibrasyonu yapılmaktadır. Tüm ölçüm sistemi belirli bir kazanç değerine (Yükselteç kazancı, ADC dönüştürme kazancı ve MCA spektrum kaydetme kanal sayısı) ayarlanır. Sistemin puls şekillendirme zamanına karar ve verilir ve uygun bir kaynakla (örneğin ^{137}Cs , ^{60}Co) sıfır kutup yarı yapılır. Daha sonra kalibrasyon için enerjileri bilinen radyoaktif kaynaklarla alınan ölçümler ile elde edilen verilerden, spektrumda gözlenen çok kanallı analizör hafızasında kaydedilen kanal sayısı ile enerji arasındaki ilişki, uygun bir fonksiyona (lineer, kuadratik veya bir polinomial fonksiyon) uyarlama ile yapılır.(Eşitlik 2.2)

$$E(keV) = \sum_{n=0}^m (a_n \cdot (x)^n) \dots\dots\dots (2.2)$$

Burada x bağımsız değişken kanal sayıları, a_n kalibrasyon sabitleri, m ise yapılan kalibrasyonun derecesidir. . Bu fonksiyon $n = 0, 1, 2, \dots$ şeklinde birinci dereceden bir fonksiyona çok iyi uyum gösteriyorsa, dedektör tepkisi oldukça lineer bir davranış gösteriyor anlamına gelir.

2.3.2. Puls şekli kalibrasyonu

Radyasyon ölçüm sisteminin çözümlemesinin toplam göstergesinden olan Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik, YYTG(FWHM) tir. Dedektörün ve dolayısıyla tüm ölçüm sisteminin enerji ayırımının, $R(\%)=YYTG/E$ da bir ölçüsü olan bu kalibrasyonun yapılması, bir izotopun tanımlanmasında birbirine yakın iki veya daha fazla fotopikin ayrıştırılmasında çok önemlidir. Bu nedenle, bir fotopikin sol tarafından meydana gelen herhangi bir kuyruk oluşumunun etkilerinin de göz önüne alınarak pik alanı hesabı yapılması veya sağdan-soldan çok yakın piklerin girişim etkilerinin dikkate alınarak yapılması gerekir. Bu bağlamda, YYTG(E), enerjiye bağlı bir fonksiyon şeklinde bir puls şekli kalibrasyonu yapılır. Bu fonksiyon dedektör karakteristiklerine göre seçilir. Örneğin bir YYTG puls şekli kalibrasyon eğrisi Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

$$YYTG(keV) = A \cdot \sqrt{E} + B \dots\dots\dots (2.3)$$

Burada A ve B kalibrasyon sabitleridir.

2.3.3. Verim kalibrasyonu

Teknik anlamda verimin anlamı sistemin ne kadar etkili ve etkin bir şekilde çalıştığının bir ölçüsüdür. Radyasyon ölçüm sistemlerinde verim denildiğinde, bağıl verim, dedeksiyon verimi, mutlak verim, özgün verim, toplam verim ve tüm enerji pik verimi olarak ifade edilebilir. Bu kavramların hepsi birbirleri ile ilişkilidir. Kullanıldıkları durumlara göre öncelik kazanırlar (Yücel, 2009).

Bağıl verim; ^{60}Co kaynağının standart NaI(Tl) dedektörünün (7,62cmx7,62cm) kristal yüzeyinden 25 cm mesafeye konularak 1332,5 keV (^{60}Co) enerjili gama pikinin net sayım hızının ^{60}Co aktivitesine oranıdır. Bu oran 0,0012cps/Bq'dir. Diğer dedektörlerde aynı ölçüm mesafesinden ölçüm alınarak eşitlik 2.4'e göre kullanılan dedektörlerin bağıl verimleri hesaplanabilir.

$$\text{Bağıl verim}(\%) = \frac{1332,5 \text{ keV pikinin net sayım hızı}}{60\text{Co kaynağının aktivitesi} \cdot 0.0012} \cdot 100 \quad \text{..... (2.4)}$$

Mutlak (fotopik) verim belirli bir sayım geometrisinde belirli bir enerjide dedektörde sayılan pulsların radyoaktif kaynaktan salınan fotonların sayısına oranıdır. Aktivite hesabı yapılabilmesi için mutlak verimin hesaplanması gerekmektedir. (Eşitlik 2.5).

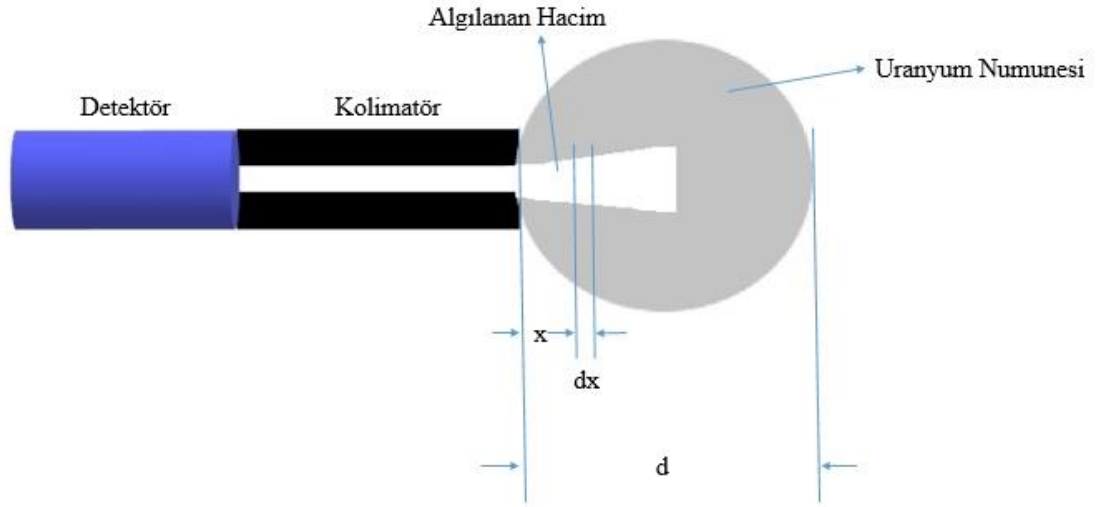
$$\varepsilon_{abs} = \frac{Cps}{A \cdot f_{\gamma}} \quad \text{..... (2.5)}$$

İçsel verim yani özgün verim ise herhangi bir fotopik sayımının dedektör yüzeyinde meydana gelen ışınma sayısına olan oranıdır. Mutlak verim ile geometriyi temsil eden bir katı açı faktörü ile orantılıdır $\varepsilon(E) \propto \varepsilon_{int} \cdot \Omega$ (Debertin ve Helmer, 1988).

2.4. Uranyum Zenginlik Ölçer Prensibi

Uranyum zenginlik ölçer prensibi kullanılan örnek ya da kaynağı tahribatsız olarak inceleme imkânı sağlamak ile birlikte en az iki zenginlik derecesine sahip iki referans uranyum malzemesine ihtiyaç duymaktadır. Uranyum zenginlik ölçer prensibi ^{235}U izotopunun %57,0 (%6) (NNDC 2019) yayınlanma olasılığına sahip 185,72 keV enerjili pikini kullanarak örnek içerisindeki ^{235}U miktarını dolayısı ile zenginliğini belirleme esasına dayanır. (Mattusek 1985; Yücel ve Dikmen, 2009) Bunun yanında bu yöntemin kullanılabilmesi için kullanılacak malzemelerin iki önemli gereksinimi sağlaması gerekmektedir. Bunlardan ilki kullanılacak numune ya da örneğin uranyum zenginliğini hesaplayabilmek için örneğin içinde bulunan uranyumun bozunum serilerinde yer alan diğer izotoplar (^{235}U - ^{231}Th radyoaktif dengesi gibi) ile dengede olması gereklidir. Diğer gereksinim ise örneklerin yeterli kalınlıkta (quasi infinite thickness) olması gerekmektedir (Gilmore, 2008; Yücel, 2017).

Yeterli kalınlık (quasi infinite thickness) numunenin daha iç kesimlerinde oluşan gama fotonlarının soğurulmalarından dolayı yüzeydeki foton akısının etkilenmediği, ilgilenilen 185,72 keV enerjili gama fotonlarının yüzeyde dengede olduğu yani % 99,9 unun soğurulmadan numunenin ön yüzeyinde gözlenen foton akısı olduğu kalınlığa karşılık gelmektedir (Yücel, 2017). Uranyum zenginlik ölçer prensibinin şematik ölçüm geometrisi Şekil-2.2 de verildiği gibidir.



Şekil 2.3 Uranyum zenginlik ölçer prensibi ölçüm geometrisi şematik gösterimi

Uranyum numunesi içerisindeki ^{235}U izotopunun bolluğunu atomik olarak gösteren ifade E_a (% atom). Zenginlik derecesi E_a ile 185,72 keV pikinin net pik sayım hızı arasındaki bağıntı ise aşağıdaki denklem 2.6'daki gibidir (Mattusek 1985, Yücel, 2017).

$$E_a(\% \text{ atom}) = 100 \cdot \dot{N}_{185,72} \cdot \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_{1/2}}{\ln(2) \cdot f_{185,72}} \cdot \frac{1}{S \cdot \Omega \cdot \varepsilon_{int}} \cdot F_{Ma} \cdot F_{Wa} \cdot F_{elk} \cdot F_{inf} \dots (2.6)$$

Burada

$\dot{N}_{185,72}$: net pik sayım hızı

$\sigma(\text{cm}^2)$: 185,72 keV için zayıflatma tesir kesiti

$T_{1/2}$: ^{235}U izotopunun yarı ömrü

$f_{185,72}$: 185.72 keV enerjili gama pikinin yayınlanma olasılığı

S: Kolimatör kesiti

Ω : Dedektör ve kolimatörden kaynaklı örnek ya da kaynak üzerinde oluşan katı açı

ε_{int} : Kullanılan dedektörün ilgilenilen enerji için özgün (intrinsic) verimi

F_{Ma} : Numune malzemesinin ne den olduğu soğurma katsayısı düzeltme faktörü

F_{Wa} : Numune kabı duvar kalınlığı nedeni ile soğurma katsayısı düzeltme faktörü

F_{elk} : sistem elektroniği nedeni ile sayımlarda oluşan azalma için düzeltme faktörü

F_{inf} : Numune içerisinde ^{235}U izotopu dışındaki izotopların 185,72 keV pikine girişimi için düzeltme faktörüdür.

Burada $\varepsilon = S \cdot \Omega \cdot \varepsilon_{int}$ toplam verimdir. Sayım sistemi sabit bir katı açı ile yeterince kalın numuneyi görür ve numune homojen olarak matris içinde dağıldığı kabul edilmektedir.

Uranyum ve farklı bir malzeme ile karıştırılarak homojen bir matris malzemesinden oluşan iki bileşenli ve kalınlığı d (cm) olan bir numune için uranyum yoğunluğu ρ_U diğer malzemenin yoğunluğu ise ρ_M dir. Bu malzemelerin sırası ile kütle soğurma katsayıları da μ_U ve μ_M olduğunda numunenin vereceği sayım hızı aşağıda verilen eşitlik 2.7'deki gibidir.

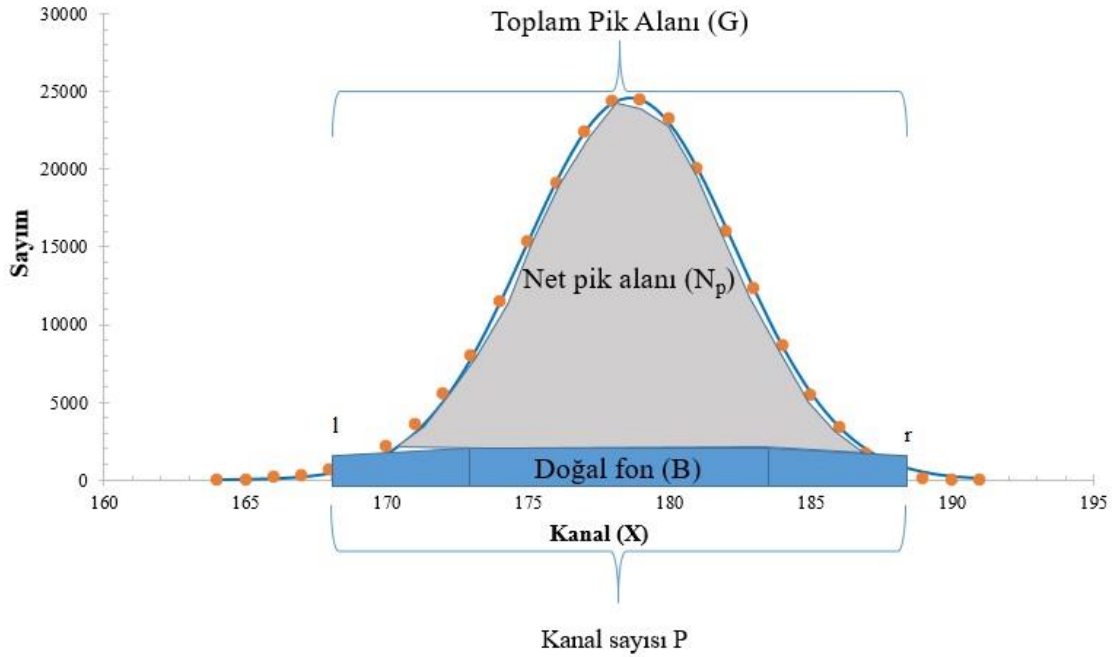
$$\dot{N}_{185,72} = \frac{N_{185,72}}{t_c} = \rho_{235} \cdot \Gamma \cdot P_c \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \int_0^d \exp[-(\rho_U \cdot \mu_U + \rho_M \cdot \mu_M) \cdot x] \cdot dx \dots\dots\dots (2.7)$$

Burada $N_{185,72}$: ilgili pikin alanı, t_c : sayım süresi (live time), ρ_{235} : ^{235}U izotopunun yoğunluğu, Γ : ^{235}U izotopunun spesifik sayım şiddeti sabiti, ε : ölçüm sisteminin toplam verimi, $P_c = \exp(-\rho_c \mu_c p_c)$: numune ve standart malzemenin kalınlığı p_c olan özdeş numune kaplarına konulacağı varsayımına göre kabın gama transmisyon katsayısı, A : numunenin dedektör tarafından görülen etkin alanı ve x ise numunenin ön yüzeyinden içine doğru şekil 2.3'de verildiği bir derinliktir (Yücel, 2017).

2.4.1. Net pik alanı belirleme

Uranyum zenginlik ölçer prensibinde en önemli noktalardan birisi de ilgilenilen 185,72 keV enerjili karakteristik gama pikinin alanını hassas bir şekilde belirlemektir. Bu alanı

doğru bir şekilde belirlemek için ise doğal fon sürekliliğinin hassas olarak belirlenip çıkartılması gereklidir. Bunun nedeni ise hem uranyumun doğada bulunması nedeni ile doğal fonda (background) olması, ölçümlerde yüksek enerjili gama ışınlarının saçılarak ilgilenilen fotopike katkı vermesi ve radyasyon etkileşimlerinde Compton saçılmaları ile ilgilenilen fotopik enerjisi altına katkı vermesi gibi etkilerin çıkartılarak sadece ölçülen numunenin yine sadece ilgilenilen pik enerjisinde ki foto elektrik etki sebebi ile oluşan pikin belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak toplam pik alanından doğal fon sürekliliğinin çıkartılması ile net pik alanı elde edilir. Şekil 2.4’de bir spektrumun gösterilen bölgesinin (burada 160-195 kanallarındaki sayım değeri verilmiştir) şematikte toplam alan ve net pik alanı gösterilmiştir. İlgilenilen kanal sayısı, P ve toplam (gross) sayım ise G ile ifade edilmiştir. Eşitlik 2.8 ve eşitlik 2.9’da ise toplam alan hesabı ve net pik alanı verilmiştir.



Şekil 2.4 Net pik alanı hesabı

$$G = \sum_{i=l}^r c_i \dots\dots\dots (2.8)$$

Burada c_i ile gösterilen i 'inci kanaldaki sayım olan “c” anlamındadır. l pikin başlangıç ve r 'de pikin bitiş kanallarıdır. Bu iki nokta arasında kalan kanallarda biriken toplam sayım değeri eğrinin altındaki toplam alanı temsil etmektedir. Elde edilen toplam sayımdan (G) doğal fon (B) değerinin çıkartılması ile net pik alanı, N_p hesaplanır (eşitlik 2.9).

$$N_p = G - B \dots\dots\dots (2.9)$$

Net pik alanı hesaplaması için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan en basiti “iki pencere” integrasyon yöntemi, “üç pencere” integrasyon yöntemi, basamak fonksiyonlu doğal fon çıkartma yöntemi ve daha karmaşık hesap gerektiren en küçük kareler yöntemi ile pik uyarlaması yaparak pik çözümü (de-convolution) ile net pik alanı belirlenmesidir (Yücel, 2017).

2.4.2. Net pik alanındaki belirsizlik hesabı

Herhangi bir hesaplanan ya da ölçümlerden elde edilen sayım değeri, belirsizliği ile birlikte verilmelidir. Farklı ölçümlerden elde edilen sayım sonuçları ise, ölçüm belirsizlikleri hesaba katılarak hesaplanan ortalama değer (ağırlıklı ortalama) ile birlikte verilebilir. Aynı şekilde hesaplamalar sonucu bulunan nihai veriler ile birlikte hesaplamada kullanılan her bir değişken için belirsizliklerini kullanarak nihai veri ile birlikte belirsizlikleri de belirtilmelidir.

Tek bir fotopik dikkate alındığında, net pik alanı (sayım değeri) hesabı ölçüm ve ardından bir doğal fon çıkartımı ile elde edilmektedir. Bu ölçümün ve hesaplamaların her birinin belirsizliği hesaba katılarak net pik alanındaki belirsizlik hesaplanabilir. Eşitlik 2.9'da verilen net pik alanı hesabı için belirsizlik hesabı eşitlik 2.10'da verilmiştir.

$$U_{Np} = \sqrt{u_G^2 + u_B^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.5. Uranyum Zenginlik Tayininde Mutlak Yöntem

Uranyum zenginlik tayini için kullanılan yöntemlerden bir diğeri de mutlak (absolute) yöntemidir. Mutlak yöntem uranyum numunelerinde içerisindeki ^{235}U izotopunun toplam uranyum miktarına oranı içinde bulunan izotopların aktivitelerini kullanarak hesaplanmasıdır.

Uranyum zenginliği kütlece olarak yazmak gerekirse eşitlik 2.11'deki gibidir. (Korob ve Nuño, 2005)

$$\varepsilon_{235}(\%) = \frac{m_{235}}{m_{234} + m_{235} + m_{238}} \cong \frac{1}{1 + \frac{m_{238}}{m_{235}}} \times 100 \dots\dots\dots (2.11)$$

Burada m_{235} ^{235}U izotopunun kütlesi ve m_{238} ^{238}U izotopunun kütlesidir. Burada, m_{234} ^{234}U miktarı çok az (%0,0054 olduğundan ihmal edilmiştir. Doğal uranyumda, bu izotopik bolluklar %0,00548 ^{234}U , %0,7200 ^{235}U ve 99.2745 ^{238}U olarak kabul edilir. Bu nedenle izotop aktivitesi, yarılanma süresi ve kütlesi arasındaki bağıntı için eşitlik 2.12 ve eşitlik 2.13 kullanılabilir (Van Loat vd, 2013).

$$A = \frac{\ln 2 \times N}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2 \times m \times N_A}{T_{1/2} \times M_a} \dots\dots\dots (2.12)$$

Burada $T_{1/2}$: izotopun yarı ömrü, M_a : atom kütlesi, N_a : avagadro sayısıdır. $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$: bozunma (decay) sabitidir.

$$m_{234} = \frac{M_{234} \cdot A_{234}}{\lambda_{234} \cdot N_A}; m_{235} = \frac{M_{235} \cdot A_{235}}{\lambda_{235} \cdot N_A}; m_{238} = \frac{M_{238} \cdot A_{238}}{\lambda_{238} \cdot N_A} \dots\dots\dots (2.13)$$

Eşitlik 2.13'te kütle ile aktivite arasındaki bağıntı verilmiştir. Bu bağıntıyı kullanarak eşitlik 2.11'deki yapılan yaklaşım zenginlik tanımı, eşitlik 2.14 olarak ifade edilebilir.

$$\varepsilon_{235}(\%) = \frac{1}{1 + \left(\frac{M_{238} \cdot \lambda_{235}}{M_{235} \cdot \lambda_{238}} \cdot \frac{A_{238}}{A_{235}} \right)} \cdot 100\% \quad \text{..... (2.14)}$$

2.6. Uranyum Zenginlik Tayininde Bağlı (relative) Yöntem

Uranyum zenginlik tayini yöntemlerinden biri olan dedektörün verimine bağlı olarak sayım fotopiklerin hızları oranlarından yararlanan pik oranları yöntemi olarak da adlandırılan bağlı (relative) yöntemdir (Meleshenkovskii vd, 2019). Bu yöntemde pik oranları iki izotopun bir birleri ile oranlarına orantılı olması esasına göre sistemin verimi ile ilişkilendirilerek eşitlik 2.15'te verilmiştir (Meleshenkovskii vd, 2019).

$$\frac{N_i^j}{N_i^k} = \frac{NPA_i^j}{NPA_i^k} \cdot \frac{T_{1/2}^j}{T_{1/2}^k} \cdot \frac{f_Y^k}{f_Y^j} \cdot \frac{\varepsilon_i^k}{\varepsilon_i^j} \quad \text{..... (2.15)}$$

Burada üst indis olan j ve k izotopları temsil etmektedir. N^j/N^k ise atomik oranları göstermektedir. i alt indisi ise gama enerjisini temsil etmektedir. NPA ise i enerjisindeki net pik alanıdır. $T_{1/2}$ ise izotoplar için yarı ömürleri temsil etmektedir. f_Y ise belirtilen parametre ise k ve j izotoplarının i enerjisindeki gama ışınının yayınlanma olasılığını ifade etmektedir. Son olarak ε k ve j izotoplarını i enerjili gama ışını için kullanılan dedektörün özgül (kristale bağlı) verimlerini ifade etmektedir.

2.7. Lineer Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi

Lineer en küçük kareler yöntemi(linear least squares) ile eğri uyarılama metodunda alınan veri noktalarını tahmin etmeye dayalıdır bunun için ise hesaplanan veri noktaları ile deneysel veri noktaları arasındaki farkın karesini minimum ederek bulma işlemidir.

Lineer olmayan en küçük kareler yönteminde (non-linear least squares) ise bu minimizasyon işlemi iteratif olarak gerçekleştirilmektedir (Chapra ve Canale, 2010). Uyarlaması yapılacak eğri için uygun bir denklem seçilerek (eşitlik 2.16) deneysel olarak elde edilen veriler için en uygun olan eğri denklem yardımı ile iteratif olarak elde edilen veri noktaları ile deneysel noktaların farkları minimize edilerek uyarlama işlemi gerçekleştirilir.

$$y_i = f(x_i; c_0, c_1, \dots, c_n) + e_i \dots\dots\dots (2.16)$$

Burada y_i : x_i bağımsız değişkene bağlı hesaplanan deneysel değer, c_0, c_1, \dots, c_n : lineer olmayan denklem için bağımsız değişkenin parametreleridir. e_i : rastgele belirsizliktir.

Bu denklem ile elde edilen y_i değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerlerin farklarının karelerinin toplamı aşağıda verilen eşitlik 2.17 kullanılarak minimize edilir.

$$\phi = \sum_{i=0}^n \left(\frac{y_i^h = f(x_i; \mathbf{c}) - y_i^d}{\sigma_i} \right)^2 \dots\dots\dots (2.17)$$

Burada ϕ : minimizasyon fonksiyonu, y_i^h : hesaplanan değerler, y_i^d : deneysel değerler, σ_i ise deneysel değer için standart sapmadır.

2.8. Uygun Ölçütü

Uyum ölçütü FOM (Figure of Merit), genelde gama pikleri için yapılan deneysel verilerden uyarlama elde edilen bir eğrinin tümü üzerinden elde edilen uyumun bir ölçüsü farklı biçimlerde ifade edilebilir. Deneysel veri ile hesaplanan veri arasındaki farkın ne kadar küçültülebildiğinin tahmini olarak bir uyum ölçütü (Figure-of-Merit, FOM),

yapılan eğri uyarlamasının uygunluğunun (goodness of fit) bir göstergesidir. Bu tezde, FOM, genelde gama pikleri için yapılan eğri uyarlamalarda (fit) uyumun kontrol edilmesinde, fotopik sayımlarından gelecek olan belirsizlikleri hesaba katmak ile birlikte doğal fonun katkısı olan belirsizlikleri de hesaba katılmaktadır (Balian ve Eddy, 1997). Uyarlanan eğrinin uyumunun kontrol etmek için eşitlik 2.18 yazılabilir.

$$FOM = \frac{\sum_{i=0}^{n_b} |\Delta y_i|}{A_b} + \frac{\sum_{i=0}^{n_p} |\Delta y_i|}{A_p} \dots\dots\dots (2.18)$$

Burada $\sum_{i=0}^{n_b} |\Delta y_i|$ doğal fon değerlerinin deneysel ve uyarlanan değerlerinin farklarının toplamı, $\sum_{i=0}^{n_p} |\Delta y_i|$ ise fotopik değerinin deneysel ve uyarlanan değerlerinin farklarının toplamı, A_b doğal fonun toplam alanı ve A_p ise fotopikin toplam alanıdır. Eşitlik 2.18 basit şekliyle verilen FOM değerini, değiştirerek tekrar iyileştirilme imkânı verir. Eşitlik 2.19'da verilen Geliştirilmiş Uyum Ölçütü (Improved Figure of Merit IFOM) kullanılmıştır (Misra ve Eddy, 1979).

$$IFOM = \frac{1}{n_p + n_b} \cdot \sum_{i=0}^{n_p+n_b} \frac{|\Delta y_i|}{A_p/n_p} \dots\dots\dots (2.19)$$

Burada ise n_p : pikin kanal sayısı, n_b : doğal fonun kanal sayısı, A_p ise uyarlanan fotopikin toplam alanıdır (Croft vd. 2015). IFOM, eşitlik 2.19'dan farklı olarak uyarlamadan elde edilen değer ile deneysel olarak bulunan değerlerin mutlak farklarının fotopik alanına ve fotopik kanal sayısına oranlarının toplamıdır. İncelenen spektrumda birden fazla pik olması bunların incelenmesi gibi durumlarda ya da doğal fon sürekliliğine göre fotopikin daha zayıf olduğu (kanal başına düşen sayım değerlerinin düşük olması) durumlarda IFOM ölçütünün, bu defa eşitlik 2.20 ile verilen bir modifikasyonu olan Değiştirilmiş Uyum Ölçütü ((Modified Figure of Merit, (MFOM)) kullanılmasını daha uygun olduğu ifade edilmektedir (Croft vd. 2015).

$$MFOM = \frac{1}{n\bar{y}_i} \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta y_i| = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta y_i| \dots\dots\dots (2.20)$$

Burada farklı olarak kullanılan A deneysel deneysel verilerden elde edilen fotopik alanıdır. IFOM ise uyarlanan fotopik in alanını kullanmaktadır (Croft vd. 2015).

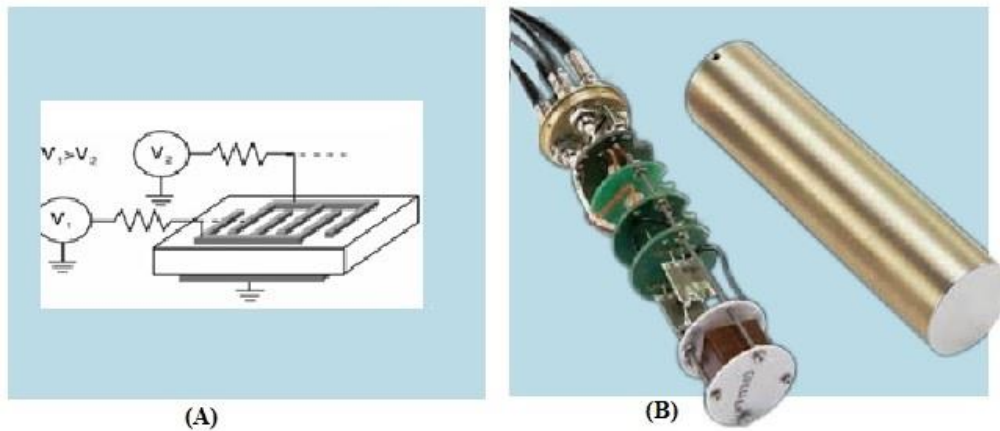


3. MATERYAL YÖNTEM

Bu tezde yapılan çalışmalarda kullanılan ölçüm sistemlerinin teknik özellikleri, kurulumu ve deneysel ayrıntılar açıklanmıştır. Uygulanan analiz yöntemi ve analizlerde kullanılan yaklaşımların test edilmesi ve kullanılması açıklanmıştır.

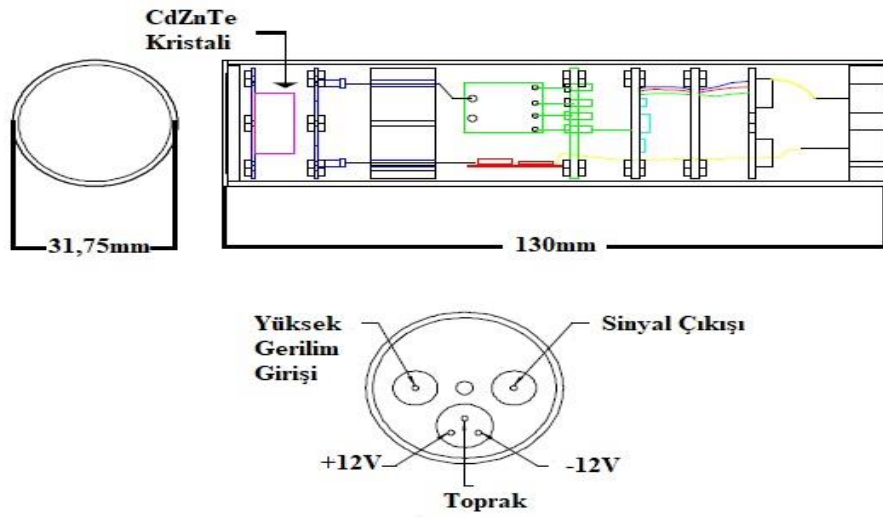
3.1. CdZnTe Dedektörlü Gama Ölçüm Sistemi

Tez kapsamında alınan ölçümler için eVproduct 15mmx15mmx7,5mm eş-eksenli grid (CPG) elektrotlu CdZnTe dedektörü kullanılmıştır. Kullanılan dedektör yarı iletken prensibinde çalışan elektrona hassas, yani yük taşıyıcısı elektronlarla dedektör çıkışındaki indüklenen yüke göre pulslar elde edilmektedir. CPG anot yapılı kristale deşik toplanması farklı bir ön yükseltece iletilerek Şekil 3.1(a)'da gösterildiği gibi toplam indüklenen yükten çıkarılır (Luke 1995; Luke 1996). Kristalin eş eksenli elektrot yapısında anot yüzeyinde iç içe geçmeli şeritlerden bazıları (V_1) toprak (ground) bağlantısına (V_2) göre daha yüksek tutularak $V_1 > V_2$ koşulu sağlanıp elektron ve deşikler (hole) farklı elektrotlar üzerinde toplanıp iki farklı yükseltece gönderilirler. Dedektörün içine birleştirilmiş olarak verilen bir ön yükselteç bulunmaktadır. Son tarafında ise üç farklı giriş bulunmaktadır.



Şekil 3.1 Eş-eksenli grid yapılı CdZnTe dedektör grid yapısı, ön yükselteç ve elektronik bağlantıları (Schlesigner vd, 2001)

Bunlar sinyal kablosu çıkışı, ön yükselteç beslemesi ve yüksek gerilim girişidir (Şekil 3.2). Dedektörün çalışma gerilimi negatif 1000 voltur. Ön yükselteç beslemesi yükselteç üzerinden haricen sağlanmaktadır. Dedektörde toplanan yük ön yükselteçten geçerek yükseltece bağlanır.



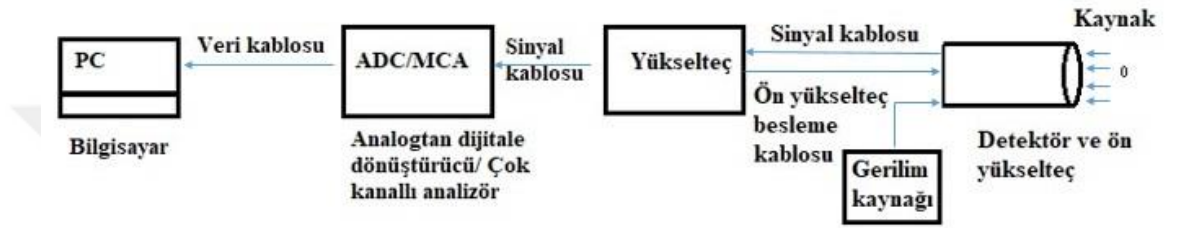
Şekil 3.2 CdZnTe Dedektör elektronığının şematik gösterimi

Dedektörün karakteristik özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

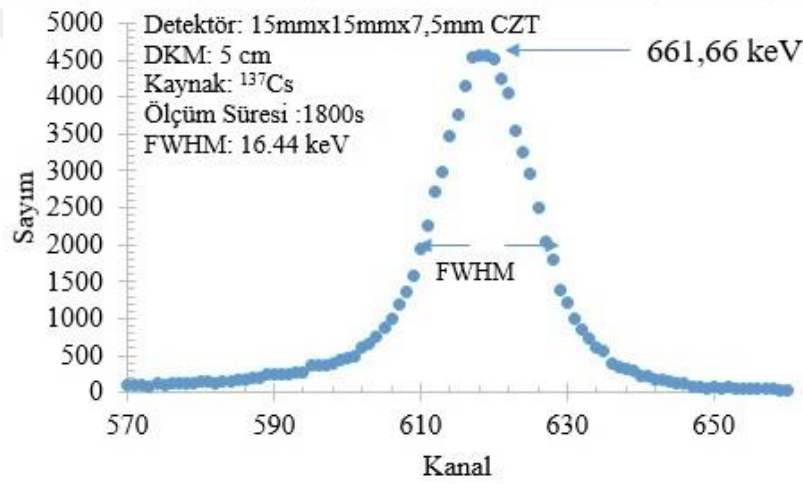
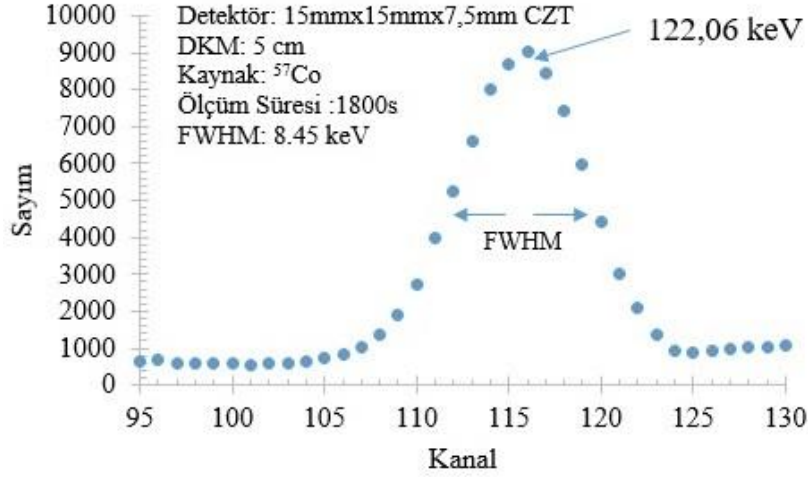
Çizelge 3.1 15 mm x 15 mm x 7,5 mm CPG CdZnTe dedektörünün karakteristik özellikleri

Marka	Model Numarası	Aktif Yüzey (mm ²)	Kalınlık (mm)	Ölçülen Çözünürlük		
eV product USA	CPG 10048	15x15	7,5	İzotop	⁵⁷ Co	¹³⁷ Cs
				Enerji (keV)	122,06	661,66
eV product USA	16K ADC/MCA Multport 2	Genie 2000 yazılımı ile bilgisayar ortamında çalışmaktadır		FWHM (keV)	8,47 keV (%2,48)	16,44 keV (%6,94)

Yapılan ölçümlerin her biri için sistemin çalışma parametreleri (yükselteç kazancı, ADC dönüşüm kazancı, şekillendirme zaman sabiti, kutup sıfır ayarı, kanal sayısı, vb.) 30-2100 keV enerji aralığında spektrumları verecek şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan analogdan dijitale dönüştürücü/çok kanallı analizör (ADC/MCA) dönüşüm kazancı ve kanal sayısı da 2048 olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçümlerde Genie 2000TM V 3.1 yazılımı kullanılarak spektrumlar elde edilmiştir. (şekil 3.3)



Şekil 3.3 CdZnTe Dedektörü gama spektroskopi sistemi



Şekil 3. 4 ^{57}Co (122 keV) ve ^{137}Cs (662 keV) kaynak spektrumları

Şekil 3.4'teki spektrumları elde etmek için çizelge 3.2'de belirtilen spektroskopi sistemi parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Ölçüm spektroskopisi parametreleri

Ölçüm Spektroskopisi	Parametreleri	Parametre Değeri
2025 Spektroskopi Yükseltici Canberra	Kaba ayar kazanç	21,5x
	İnce ayar kazanç	
	Şekillendirme zamanı	1 μ s
	ADC Dönüşüm kazancı	4096
16K ADC/MCA Multiport II	Alt düzey ayırıcı (LLD)	% 0,5
	Üst düzey ayırıcı (ULD)	% 100
	MCA Hafızası	2048

3.2. Enerji Kalibrasyonu

Ölçüm sisteminin performansı belirlemek ve alınan spektrumlarda kullanılacak pikleri doğru bir şekilde belirlemek için laboratuvarında bulunan radyoizotop kaynaklar kullanılarak sistemde hangi kanala hangi enerjinin karşılık geldiğini belirlemek için enerji kalibrasyonu yapılmıştır. Tez kapsamında enerji kalibrasyonu için kullanılan kaynaklar ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{22}Na 'dur. (Çizelge 3.3)

Çizelge 3.3 Enerji kalibrasyonunda kullanılan radyoaktif izotoplar ve bozunma (decay) özellikleri

Nüklit	Enerji (keV)	$f_r(\%)$	Yarı ömür $t_{1/2}$	Referans Aktivite (kBq)	Referans Tarihi
^{241}Am	59,537	35,92	432,6 yıl	16,09	10.01.2002
^{109}Cd	88,01	3,62	461,9 gün	271,7	15.10.2017
^{57}Co	122,06	85,51	271,81 gün	190,2	01.04.2015
^{137}Cs	661,66	84,99	30,05 yıl	38,41	01.12.2008
^{54}Mn	834,85	99,98	312,19 gün	190,2	01.04.2015
^{22}Na	1274,54	99,94	2,60 yıl	103,5	15.10.2017

3.3. Spektroskopi Sistemi Verim Kalibrasyonu

Tezde kullanılan dedektörün verim kalibrasyonu için standart nokta kaynaklar kullanılmıştır. (Çizelge 3.3) Nokta kaynaklardan elde edilen verimler daha sonra Efftran algoritması kullanılarak tezde kullanılan ölçüm geometrisi için transfer edilmiştir. Hem transfer edilen verim değerleri hem de deneysel olarak elde edilen verim değerleri verilen eşitlik 4.1 parçalı eğrisine uyarlanmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de verilmiştir.

3.4. Kullanılan Uranyum Standart Referans Malzemeleri

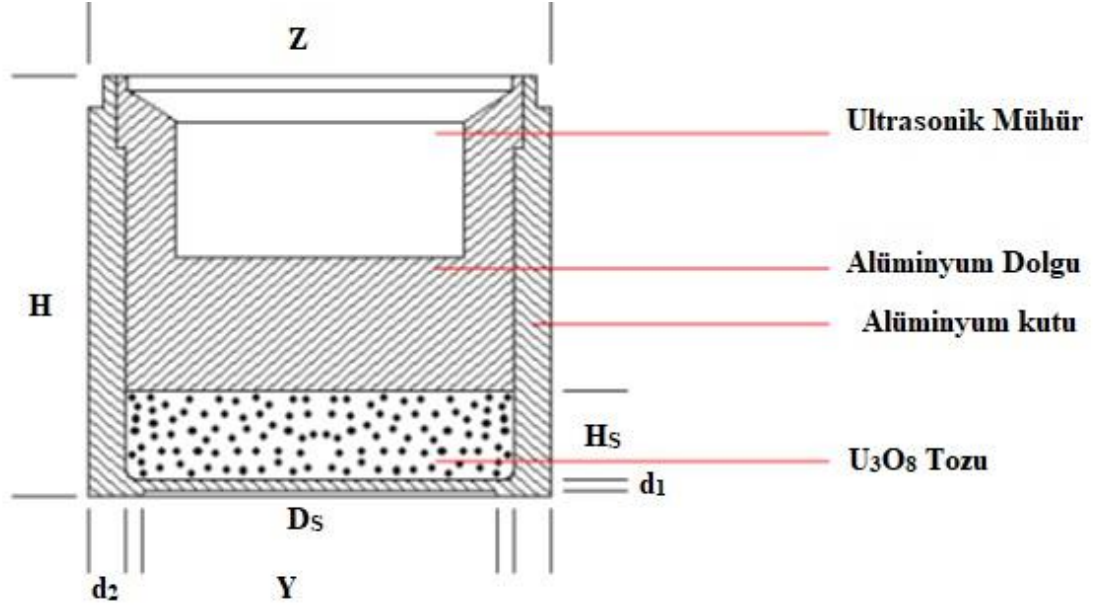
Kullanılan kaynaklar, NRM171 kodlu tüketilmiş (DU), doğal (NU) ve düşük zenginlikte (LEU) U_3O_8 tozu dolgulu standart kaynaklarıdır. Kaynak kodları sırası ile NRM171-031,

NRM171-071, NRM171-195, NRM171-295 ve NRM171-446 şeklindedir. Kullanılan kaynakların özellikleri aşağıda Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Kullanılan uranyum standart referans malzemeleri özellikleri (Bièvre, 1986)

Sertifikalı Referans Malzemeler	İzotopik Bolluk (% at.)		Ağırlıkça İzotopik Bolluk (% wt.)	
	$^{235}\text{U}/\text{U}$	$^{238}\text{U}/\text{U}$	$^{235}\text{U}/\text{U}$	$^{238}\text{U}/\text{U}$
EC-NRM171-031	0,3205±0,0002	99,6627±0,0004	0,3166±0,0002	99,6668±0,0004
EC-NRM171-071	0,7209±0,0005	99,2738±0,0002	0,7119±0,0005	99,2828±0,0002
EC-NRM171-194	1,9664±0,0014	98,0159±0,0009	1,9420±0,0014	98,0406±0,0009
EC-NRM171-295	2,9857±0,0021	96,9826±0,0015	2,9492±0,0021	97,0196±0,0015
EC-NRM171-446	4,5168±0,0032	95,4398±0,0016	4,4623±0,0032	95,4950±0,0016

Beş farklı zenginlik derecesine sahip olan Uranyum örnekleri 8 cm dış çap değerine sahip bir alüminyum kap içerisine 200 g olacak şekilde U_3O_8 tozu konulmuştur. Alüminyum kabın gösterimi ve özellikleri Çizelge 3.5 ve Şekil 3.5 te verilmiştir. Şekilde belirtilen d_1 kalınlığı 185,72 keV enerjili gama pikini ölçebilmek için ayarlanmıştır.



Şekil 3.5 Standart uranyum kaynaklarının alüminyum kabının özellikleri (Bièvre, 1986)

Çizelge 3.5 EC-NRM171 kodlu uranyum standart referans malzemeleri alüminyum taşıma kabı özellikleri (Bièvre, 1986)

EC-NRM171- Standart Uranyum Kaynaklarının Alüminyum taşıma Kabı	Dış Çap (Z)	$80,00 \pm 0,05$ mm
	Yükseklik (H)	$90,00 \pm 0,20$ mm
	Duvar Kalınlığı (d_2)	$5,00 \pm 0,05$ mm
	İç Çap (D_s)	$70,00 \pm 0,02$ mm
	Pencere Çapı (Y)	$66,00 \pm 0,05$ mm
	Pencere Kalınlığı (d_1)	$2,00 \pm 0,02$ mm
	U_3O_8 Toz Kalınlığı (H_s)	$20,80 \pm 0,50$ mm ya da $15,80 \pm 0,50$ mm

Kullanılan uranyum standart referans malzemeleri NRM171-031, -071, -194 ve -295 kodlu numunelerin yoğunlukları $2,5 \text{ g/cm}^3$ ve U_3O_8 tozu 20.8 mm kalınlığına kadar sıkıştırılmıştır. % 4,51 izotopik bolluğa sahip kaynak ise 15,8 mm kalınlığına kadar sıkıştırılmış olup yoğunluğu $3,3 \text{ g/cm}^3$ tür. (şekil 3.6)



Şekil 3.6 Sertifikalı NRM171 kodlu uranyum standart referans malzemeleri

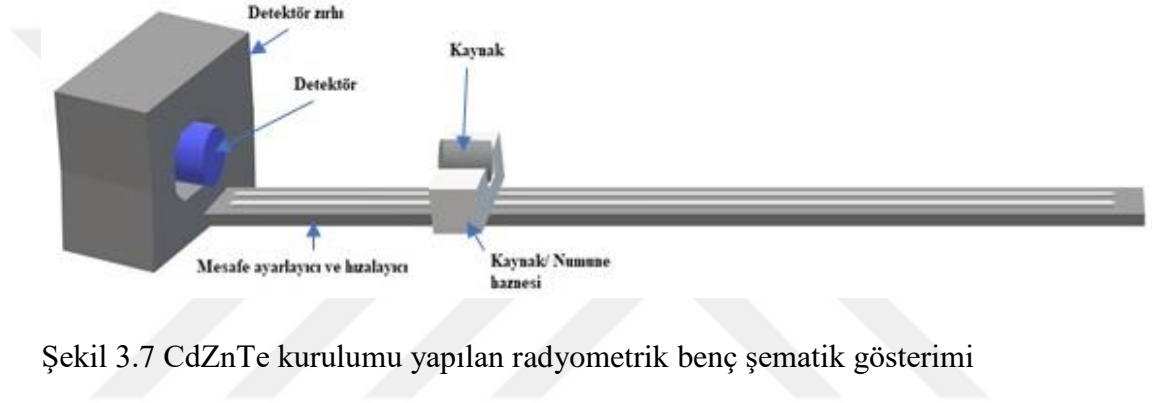
Uranyum standart referans malzemeleri oluşturulmasında U_3O_8 tozunun kalınlıklarının belirlenmesinde daha iç tarafta meydana gelen fotonların yolları boyunca soğrulmaması ve yüzdeki foton akısında herhangi bir azalmaya yol açmaması için seçilmiş yeterince kalın (quasi infinite thickness) olması sağlanmıştır. 185,72 keV için kaynak içerisinde oluşan bu enerjideki fotonların % 99,9' u yüzeyden çıkmaktadır ve öz soğurma düzeltilmesine ihtiyaç duymamaktadır.

3.5. Uranyum Zenginlik Ölçer Prensibi

Uranyum zenginlik ölçer prensibi ^{235}U izotopunun 185,72 keV enerjili pikinin sayımı hızının numunedeki ^{235}U zenginliği ile doğru orantılı olmasına dayanmaktadır ve en az iki farklı zenginlik derecesine sahip referans uranyum malzemesinin kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için kullanılan uranyum malzemeleri ise ölçülecek numunenin yeterli kalınlıkta (quasi infinite thickness) olması gerekmektedir (Mattusek, 1985, Yücel, 2017). Yeterli kalınlığın (quasi infinite thickness) olması öz soğurma düzeltilmesi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

3.6. Deney Düzenegi

Deney düzenegi uzakliğa bağlı ölçüm yapılabilecek şekilde kullanılan kaynağın mesafesini değişebilen bir raylı sistem (radyometrik benc) olarak tasarlanmıştır. Sistem içerisinde dedektör ise yine dedektör için tasarlanılan kurşun bir zırh içerisinde konularak sabitlenmiştir. Kaynak yuvası içerisinde yerleştirilen örnekler aktif yüzeyleri hizalarından dedektöre olan mesafeleri lazer mesafe ölçümü ile uzaklıkları ayarlanarak yine lazer sistemi ile hizalanmaktadır (şekil 3.7).



şekil 3.7 CdZnTe kurulumu yapılan radyometrik benc şematik gösterimi

Yapılan tez çalışmasında farklı sayım istatistiklerinde ölçümler yapabilmek için çeşitli ölçüm mesafelerinde ölçümler alınmıştır. Farklı sayım istatistikleri için kullanılan Ölçüm planı aşağıdaki gibidir. (Çizelge 3.6)

Çizelge 3.6 Ölçüm planı

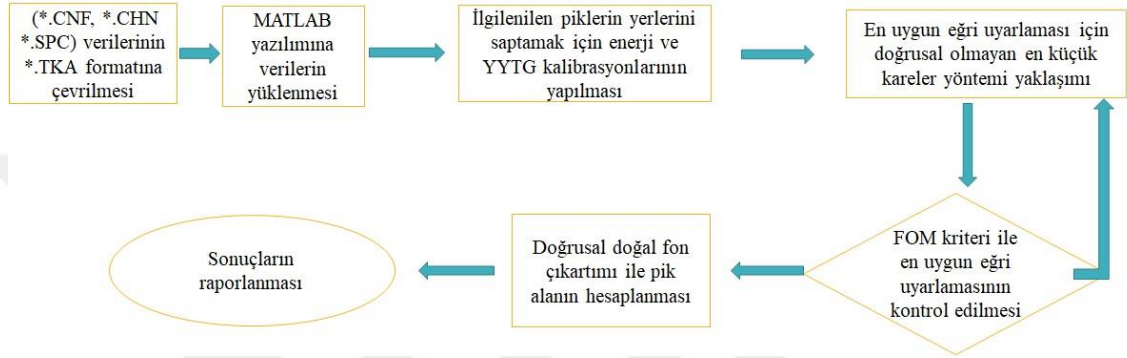
Uranyum Standart Referans Malzemeler	Ölçüm Süresi (s)	Ölçüm Tekrarı	Ölçüm Mesafesi (cm)	Maskeme etkileri
NRM171-031 (%0,32 ²³⁵ U)				
NRM171-071 (%0,72 ²³⁵ U)	600		0 (yüzeyden)	¹³³ Ba
NRM171-194 (%1,96 ²³⁵ U)	900	En az 3	3,72	
NRM171-295 (%2,99 ²³⁵ U)	1800		5	⁵⁷ Co
NRM171-446 (%4,52 ²³⁵ U)			10	
			15	¹⁵² Eu

- Ölçüm zamanı: dedektör kaynak mesafesi sabit tutularak 600s, 900s ve 1800s farklı ölçüm sürelerinde ölçümler üçer kez tekrarlanarak alınmıştır.
- Ölçüm mesafesi: sayım süreleri aynı tutularak kaynağın dedektöre olan mesafesi değiştirilmiştir. Ölçümlerdeki dedektör kaynak mesafeleri sırası ile 0cm (dedektör yüzeyinden), 3,7cm, 5cm, 10cm ve 15cm olarak beş farklı mesafede ölçümler 600s, 900s ve 1800s olarak üçer kez ölçümler tekrarlanmıştır.
- Radyoizotop kaynaklı maskeli ölçümler: Dedektör kaynak mesafesi sabit tutularak üç farklı geometri de maskeme etkisi yapan noktasal ¹³³Ba, ⁵⁷Co ve ¹⁵²Eu kaynaklarının yerleştirilmesi: ilgilenilen pik bölgesinde doğal fonu yükseltebilen ya da pik alanı hesaplarında negatif etki yaparak zenginlik tayini maskeme yapması nedeni ile etkileyen radyoizotopları yerleştirilerek ölçümler alınmıştır.

Bu ölçümlerinin tamamlanmasının ardından elde edilen gama spektrumlarının analizleri gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçümlerin pik alanları hesaplamaları geliştirilen algoritma ile hesaplanmıştır. Sonrasında ise Genie-2000 ve Colegram yazılımları kullanılarak pik alanları hesaplanarak, bu tezde geliştirilen algoritma kıyaslanarak test edilmiştir.

3.7. Pik Alanı Hesabı için Nümerik Yaklaşım

Tez kapsamında CdZnTe dedektörünü kullanılarak alınan standart uranyum örneklerinin spektrumlarını analiz etmek ve analizler sonrasında uranyum zenginlik tayinini daha iyi yapabilmek için MATLAB platformu kullanarak bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın akış şeması Şekil 3.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.8 Geliştirilen algoritmanın akış şeması

Algoritmada analizler yapabilmek için öncelikle sayım sisteminden alınan *.CNF, *.CHN, *.SPC formatındaki gama spektrumları, algoritmanın okuyabilmesi için *.TKA formatına dönüştürülmelidir. Sonrasında oluşturulan bu *.TKA formatındaki spektrum verileri algoritma için girdi olarak kullanılacaktır. Algoritma girdi olarak spektrum verilerini alarak, spektrumun enerji kalibrasyon katsayılarının girilmesi için kullanıcıyı yönlendirmektedir. Kullanıcı bu katsayıları girdi olarak sağladığında algoritma, pik enerjisine göre verileri bölgelere ayırmakta ve ^{235}U izotopunun imza piklerinden biri olan 185,72 keV pikini bulmaktadır. Burada Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik (YYTG) değeri de pikin başlangıç ve bitiş noktalarını bulmak için gereklidir. Geliştirilen algoritma tez kapsamında kullanılan 15x15x7,5mm CdZnTe dedektörüne uygun olarak alınan uranyum spektrum verisinde her bir enerji için YYTG değerlerini hesaplayıp ilgilenilen pik enerjisini kullanarak pikin başlangıç ve bitiş noktalarını belirleyip piki spektrumun geri kalanından ayırmaktadır. Daha sonrasında ilgilenilen fotopik için sayım ortamına bağlı olarak gelen doğal fon sayımlarının etkisini gidermek için pikin başlangıç ve bitiş noktaları arasında bir doğrusal doğal fon eğrisi oluşturur. Bu işlemi doğrusal en küçük

kareler yöntemini kullanarak doğal fon eğrisini, eşitlik 3.2 verildiği gibi birinci dereceden bir fonksiyona uyarlamasını (fitting) yapar.

$$\text{Doğal Fon}(X) = a \cdot X + b \dots \dots \dots (3.2)$$

Elde edilen doğal fon eğrisi ile sürekli sayım (continuum) etkilerini çıkarılır ve net pik elde edilir. Uranyum zenginlik tayini için önemli noktalardan bir tanesi de net pik alanın ve doğal fonun doğru bir şekilde bulunmasıdır. Net pik alanını doğru bir şekilde belirlemek için bu veri noktaları kullanılarak veri setleri ve bir matematiksel fonksiyon oluşturulur. Geliştirilen algoritma bu işlemi eğri uyarlaması kısmında gerçekleştirmektedir.

3.7.1. Yeni algoritma ile pik eğri uyarlaması

Bu tezde önerilen algoritma, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemini kullanarak ilgilenilen net piki, bir fonksiyon ile matematiksel bir denklem olarak modelleme yapmaktadır. İlgilenilen fotopikler gama ışınları etkileri ile oluştuğundan bu piklerin dağılımları gauss fonksiyonu dağılımı ile ifade edilmektedir (Balian, ve Eddy, 1977). Bu sebeple elde edilen bu piklerin oluşturduğu pik alanlarının hesaplanması için bir matematiksel düzene bağlı fonksiyonlar yardımı ile pik alanı hesaplanmaktadır. Pik verilerinin dağılımı gauss fonksiyonuna uyduğu için ilk olarak sadece Gauss fonksiyonunu eşitlik 3.3 kullanarak iteratif bir yaklaşım izleyerek en uygun eğriyi uymaktadır.

$$G(E) = \frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[\frac{-(E - E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \dots \dots \dots (3.3)$$

CdZnTe dedektörlerinde yük toplanmasında bu dedektörlerin karakteristik özelliği olarak radyasyon sonucu elektron ve deşik çiftleri oluşmaktadır. Elektronların sürüklenme hızları deşiklere göre yaklaşık 1000 kat daha fazladır. Bu sebepten dolayı oluşan puls düşük enerji bölgesinde bu deşiklerin geç toplanmasından kaynaklı bir kuyruk oluşmaktadır ($\mu_e\tau_e = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V}$, $\mu_d\tau_d = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$). Bu kuyruk oluşumu sadece gauss fonksiyonu kullanılarak yapılan eğri uyarlamalarında, eğrinin uyumu hesaplarında negatif etki yapmaktadır. Bu etki ise pik alanlarının doğru hesaplanamamasına yol açmaktadır. Bu etkinin düzeltilmesi için bir Gauss fonksiyonu ile birlikte bir kuyruk fonksiyonu birleştirilip oluşturulan eğri uyarlaması iyileştirilerek pik alanı daha doğru bir şekilde hesaplanmaktadır. (eşitlik 3. 4)

$$G_T(E) = \frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right] + A \frac{T}{2} \cdot \exp\left[(E - E_0) \cdot \tau - \frac{\sigma^2\tau^2}{2}\right] \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{E - E_0}{\sigma} + \sigma\tau\right)\right] \dots\dots\dots (3.4)$$

İteratif olarak formüllerdeki değişkenler olan sırası ile A (yükseklik, genlik), E (enerji), σ (sigma), ikinci formülde bunlara ek olarak T (görelî kuyruk genliği), τ (kuyruk eğimi), erfc ise hata fonksiyonudur ve parametreleri değiştirerek en uygun eğri uyarlaması oluşturulmaktadır.

4. BULGULAR

Tezin bu bölümünde, elde edilen bulgular ve sonuçlar yer almaktadır.

4.1. Verim Kalibrasyonu Bulguları

Yapılan analizler sonucunda Çizelge 4.1’de verilen nokta kaynakları kullanarak, ilgilenilen enerji aralığında deneysel verimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan deneysel veriler neticesinde bu deneysel verilere en uygun eğri uyarlaması eşitlik 4.1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 4.1 parçalı bir fonksiyon olup eğri farklı enerji aralıklarında farklı bir eğilim sergilemektedir.

$$\% \varepsilon (E) = \begin{cases} a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot (\ln(E))^{-2} + a_3 \cdot (\ln(E))^{-3} & \Rightarrow 0 \text{ keV} \leq E \leq 350 \text{ keV} \\ \sum_{i=1}^2 b_i \cdot \exp(c_i \cdot E) & \Rightarrow 350 \text{ keV} \leq E \leq 1332,5 \text{ keV} \end{cases} \dots (4.1)$$

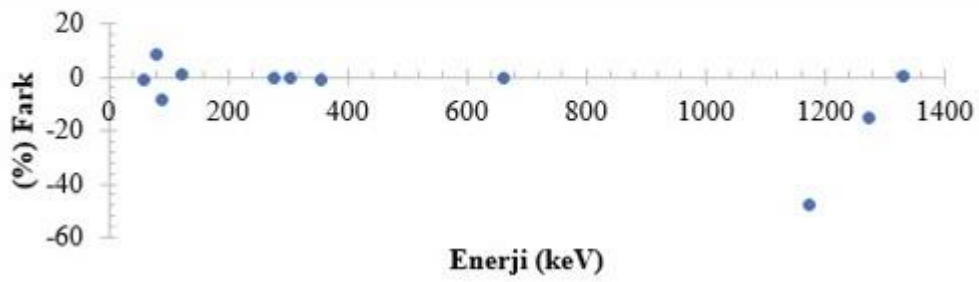
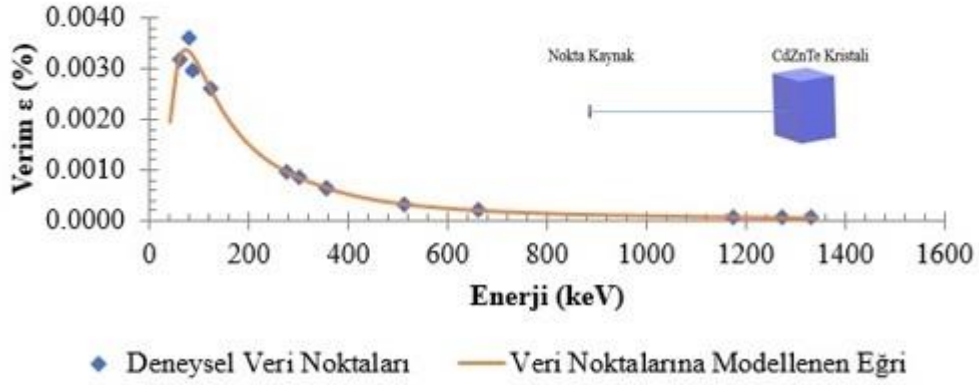
Çizelge 4.1 Nokta kaynaklar kullanılarak deneysel verim için elde edilen veri noktaları ve uyarlanan eğri fonksiyonundan elde edilen verim değerleri

Kaynaklar	Enerji (keV)	Deneysel Verim (%) x10 ⁻³	(%) Belirsizlik	Eşitlik (4.1) Verim Eğrisi ile belirlenen Verileri (%)x10 ⁻³	% Fark
²⁴¹ Am	59,54	3,19	0,63	3,22	-0,94
¹³³ Ba	81,00	3,60	0,92	3,31	8,63
¹⁰⁹ Cd	88,03	2,95	1,42	3,22	-8,23
⁵⁷ Co	122,06	2,60	0,34	2,58	0,83
¹³³ Ba	276,40	0,96	1,31	0,96	-0,38
¹³³ Ba	302,85	0,84	0,85	0,84	-0,32
¹³³ Ba	356,01	0,66	0,45	0,65	0,66
¹³⁷ Cs	661,66	0,21	0,56	0,21	-0,04
⁶⁰ Co	1173,23	0,08	7,28	0,15	-8,26
²² Na	1274,54	0,07	0,69	0,08	-1,10
⁶⁰ Co	1332,49	0,07	0,27	0,07	8,93

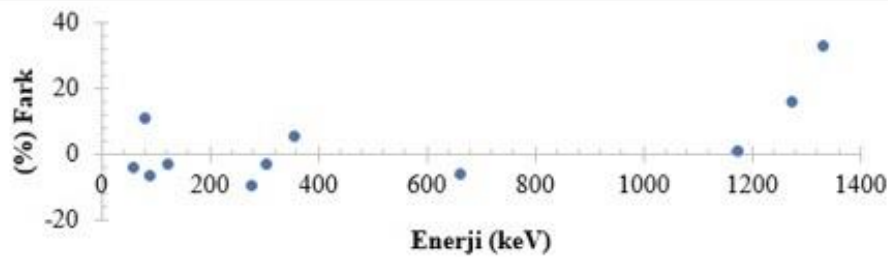
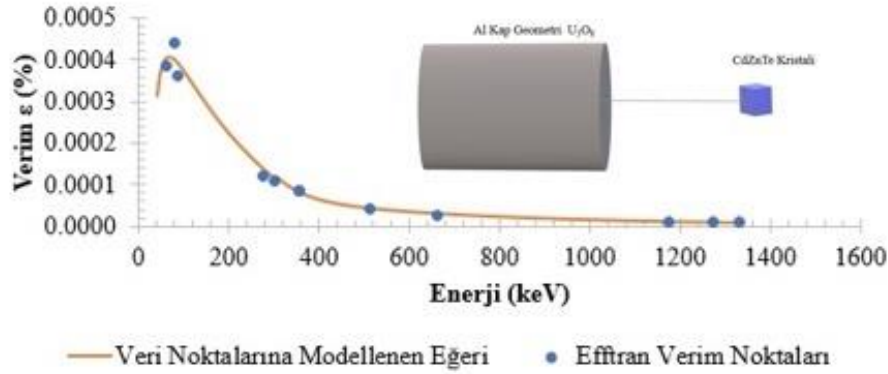
Çizelge 4.1’de gösterilen nokta kaynaklar ile elde edilen verim değerleri Efftran Monte Carlo Simülasyon Programında modellenerek Uranyum standart referans malzemelerinin geometrisine aynı enerjilerin referans verimleri transfer edilmiştir. Deneyselden transfer edilen verim değerleri, hesaplanan verim değerleri ile aynı trendi gösterdiğinden eşitlik 4.1 kullanılarak bir eğri uyarlaması gerçekleştirilmiştir. Transfer edilen verim değerleri ve bu değerler için uyarlanan eğri ile elde edilen verim değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de ise sırası ile deneysel verim ve transfer edilen verimler için uyarlanan eğriler verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deneysel verilerin alüminyum kabında U_3O_8 ortamına efftran ile transfer edilerek elde edilen verim değerleri ve bu verim noktaları için uyarlanan eğriden elde edilen verim değerleri

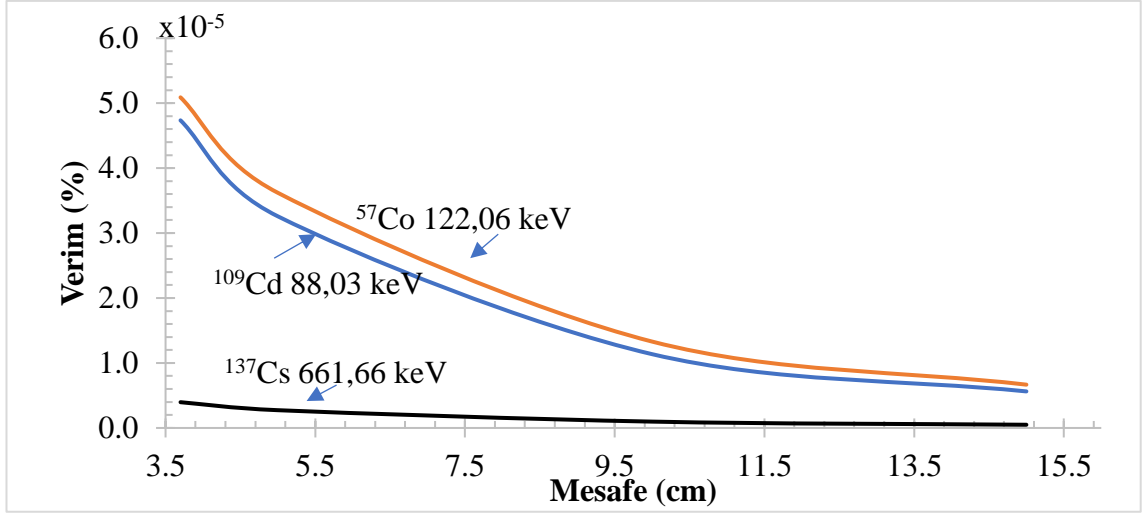
Kaynaklar	Enerji (keV)	Efftran ile Hesaplanan Verim (%) $\times 10^{-4}$	(%) Belirsizlik	Eşitlik (4.1) Verim Eğrisi ile belirlenen Verileri (%) $\times 10^{-4}$	% Fark
²⁴¹ Am	59,54	3,87	3,1	4,02	-3,83
¹³³ Ba	81,00	3,39	3,1	3,96	10,88
¹⁰⁹ Cd	88,03	3,62	3,1	3,88	-6,63
⁵⁷ Co	122,06	3,26	3,1	3,35	-2,75
¹³³ Ba	276,40	1,23	3,1	1,36	-9,40
¹³³ Ba	302,85	1,08	3,1	1,11	-2,75
¹³³ Ba	356,01	8,42	3,1	0,67	26,37
¹³⁷ Cs	661,66	0,27	3,1	0,29	-6,07
⁶⁰ Co	1173,23	0,10	3,1	0,10	0,87
²² Na	1274,54	0,09	3,1	0,08	16,16
⁶⁰ Co	1332,49	0,09	3,1	0,07	33,03



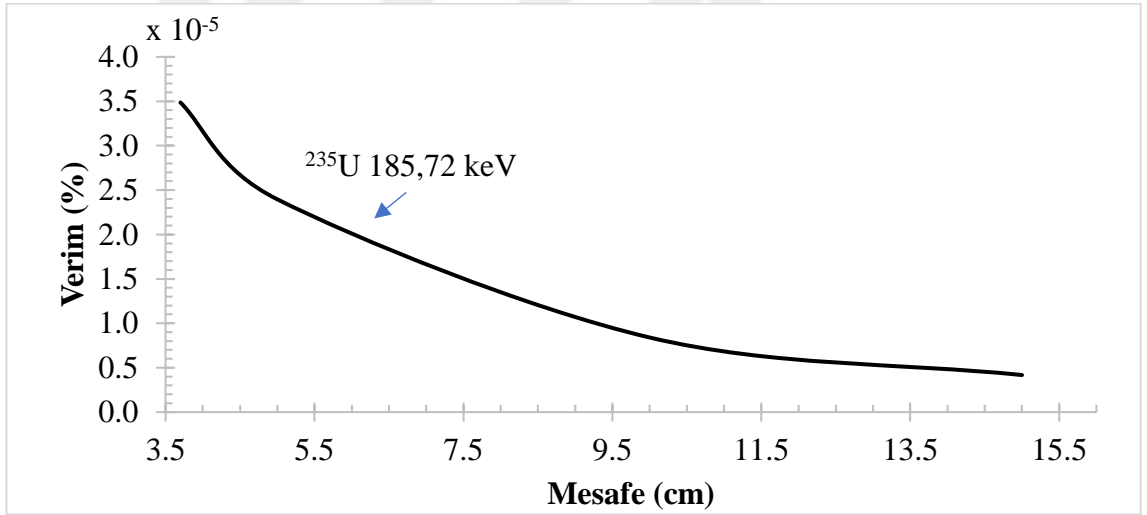
Şekil 4.1 15x15x7,5 mm³ CdZnTe dedektör – silindir U₃O₈ kap geometri için d = 5cm’de ölçülen deneysel verim



Şekil 4.2 15x15x7,5 mm³ CdZnTe dedektör – silindir U₃O₈ kap geometri için d = 5cm’de EFFTRAN programı ile hesaplanan verim



Şekil 4.3 15x15x7,5 mm³ CdZnTe dedektör – silindir U₃O₈ kap geometri için EFFTRAN programı ile hesaplanan verimin mesafe ile değişimi

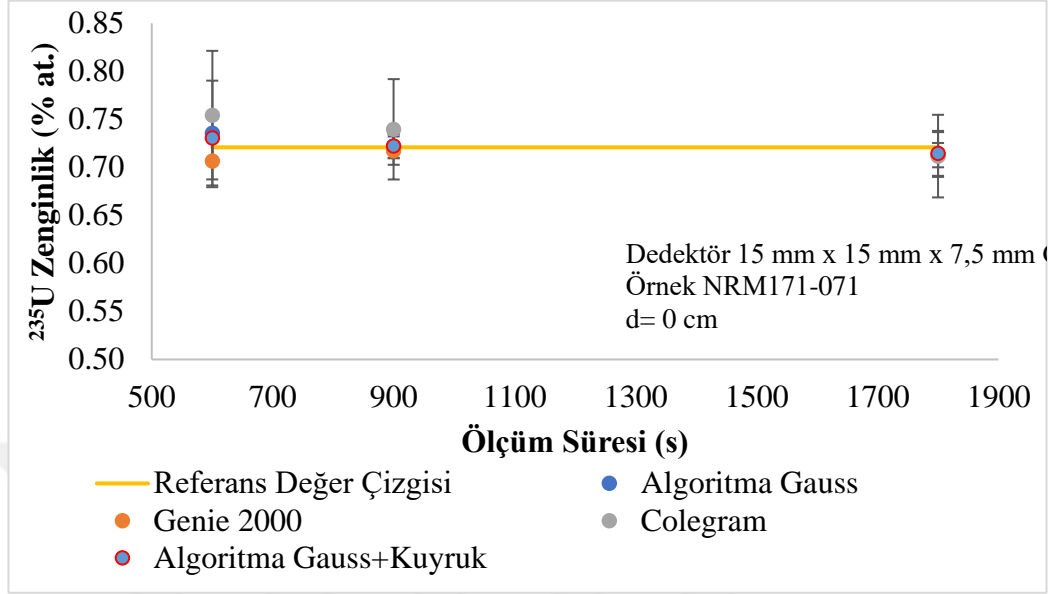


Şekil 4.4 ²³⁵U izotopunun 185,72 keV enerjili fotopiki için 15x15x7,5 mm³ CdZnTe dedektör – silindir U₃O₈ kap geometrinde EFFTRAN programı ile hesaplanan verimin mesafe ile değişimi

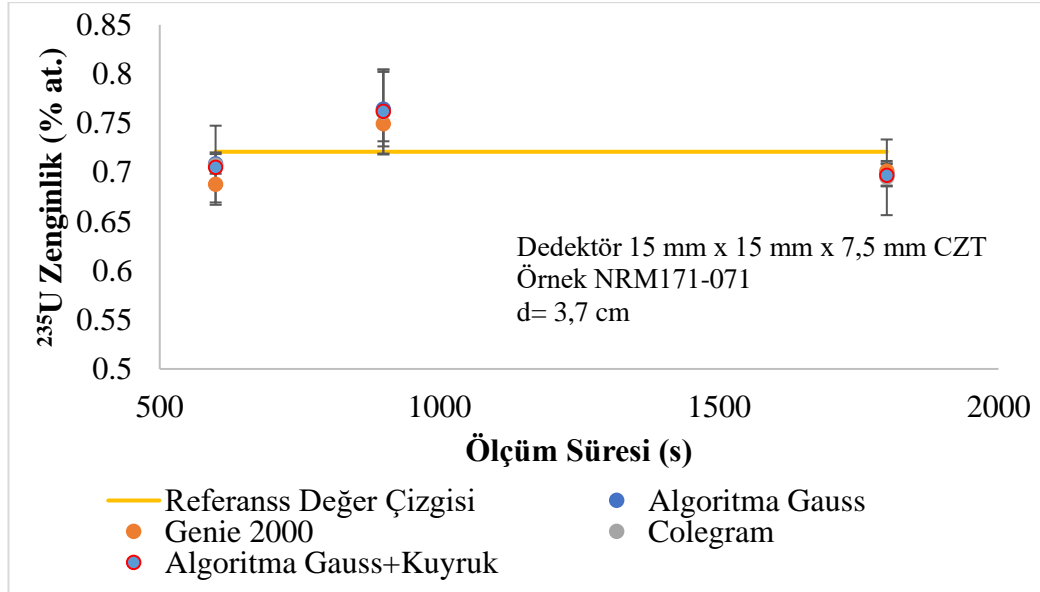
4.2. Ölçüm Süresinin Sayım İstatistiğine Etkisi

Bu kısımda ölçüm planında yer alan ölçüm sürelerinin değiştirilmesiyle, uranyum ²³⁵U zenginlik tayinine etkisini tespit etmek için alınan ölçümlerin analizleri sonucunda elde edilen veriler verilmiştir. Geliştirilen algoritma ile yapılan zenginlik tayinlerinin diğer

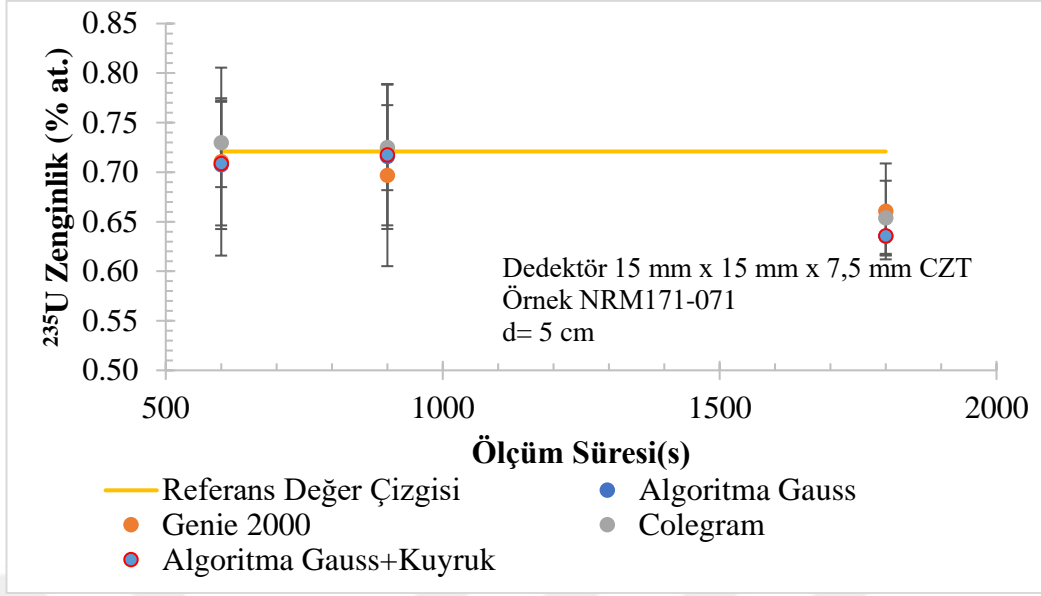
ticari yazılımlar ile yapılan zenginlik tayinleri sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar grafiksel ve çizelge halinde sunulmuştur.



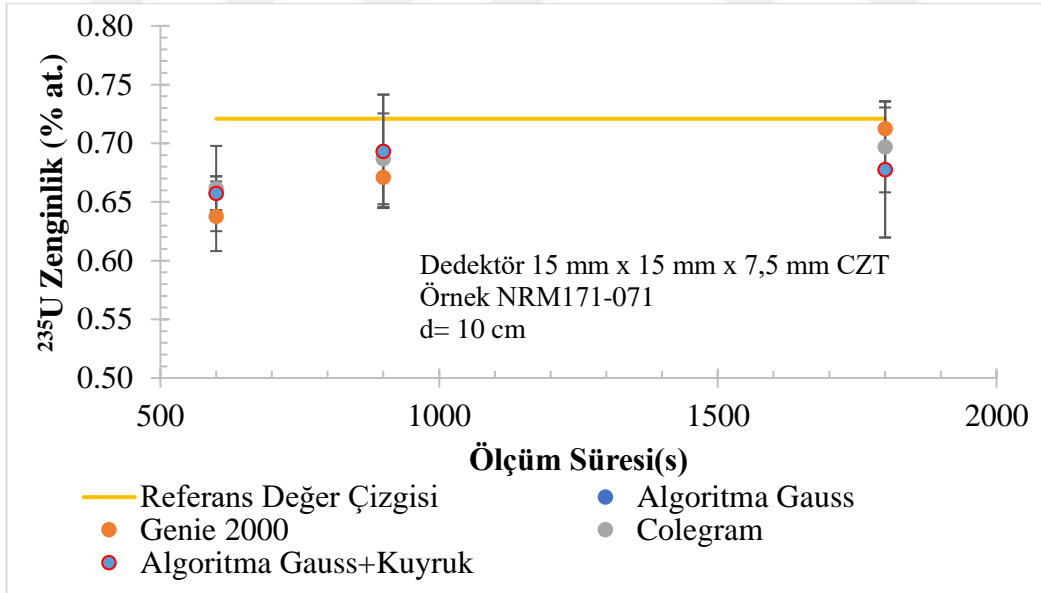
Şekil 4. 5 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM 171-071) için dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



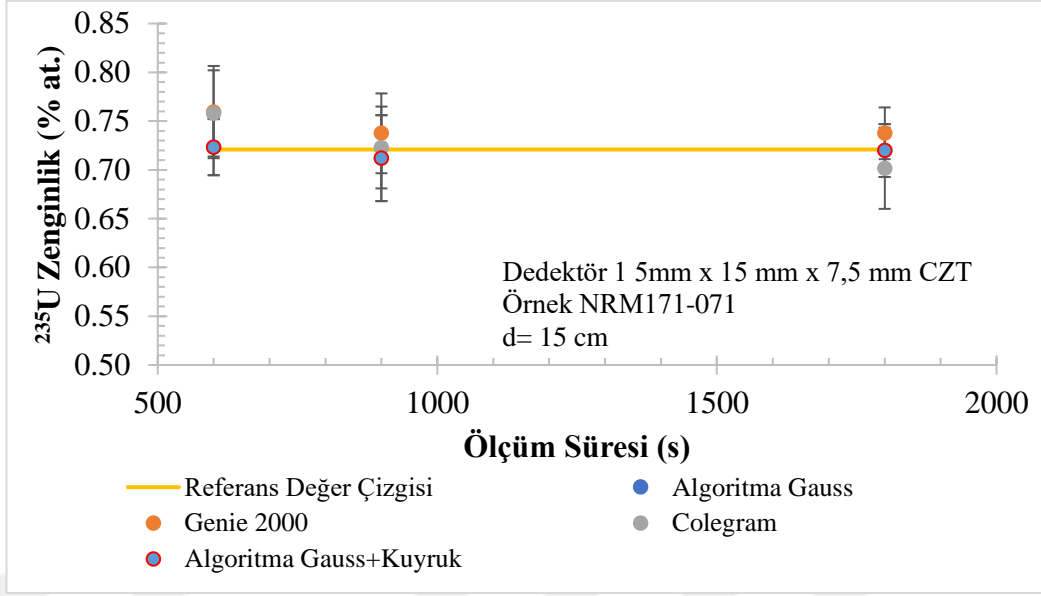
Şekil 4. 6 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



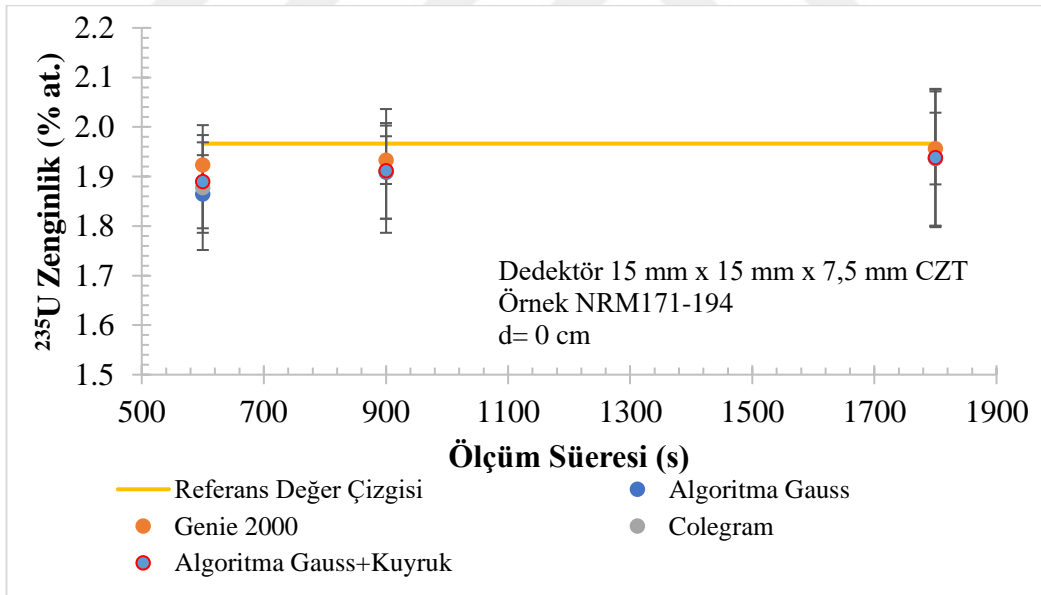
Şekil 4. 7 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



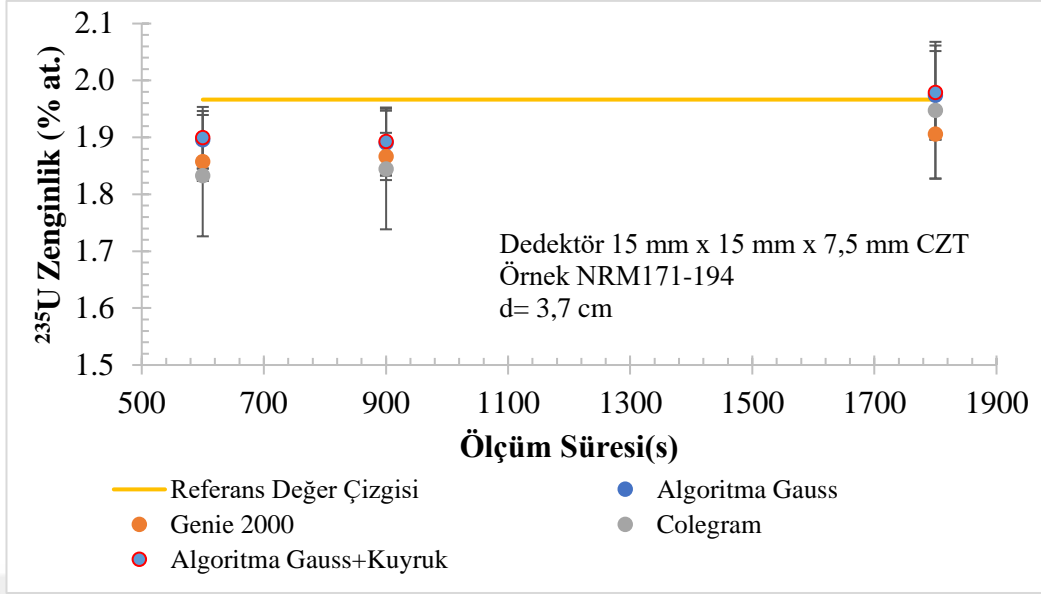
Şekil 4. 8 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



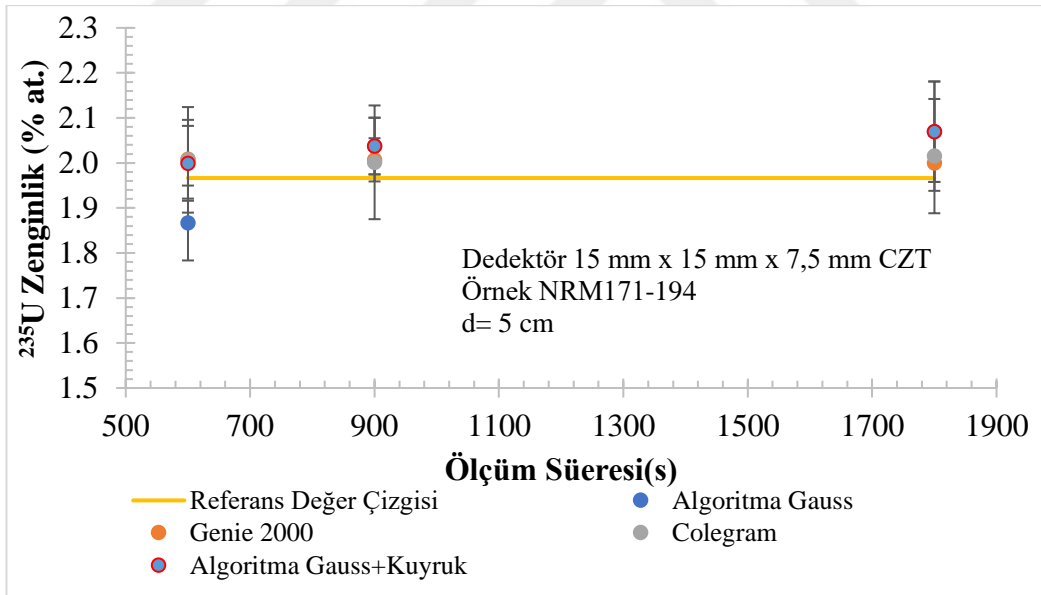
Şekil 4.9 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-071) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



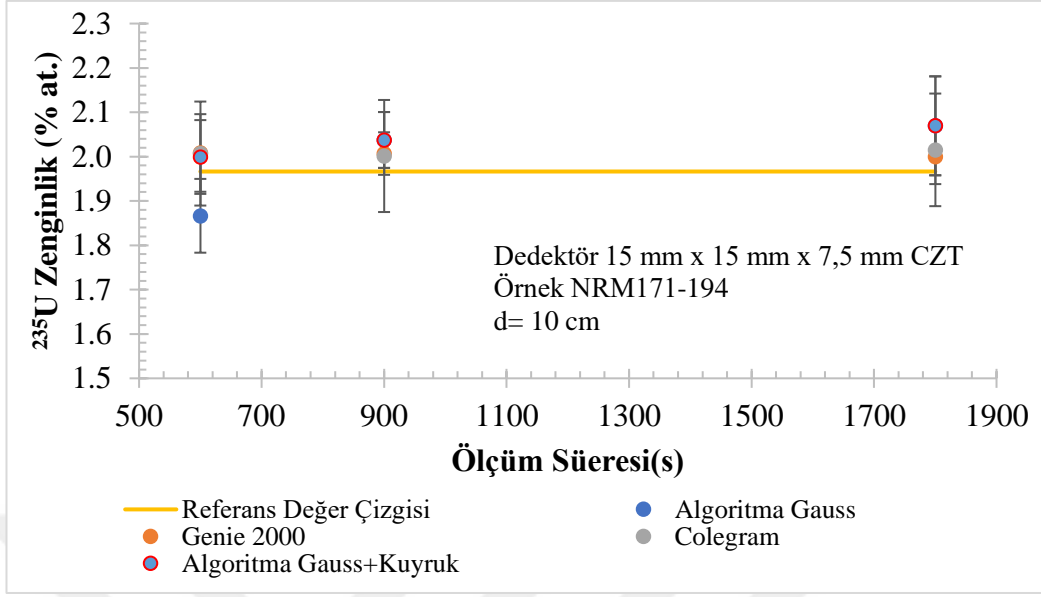
Şekil 4.10 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



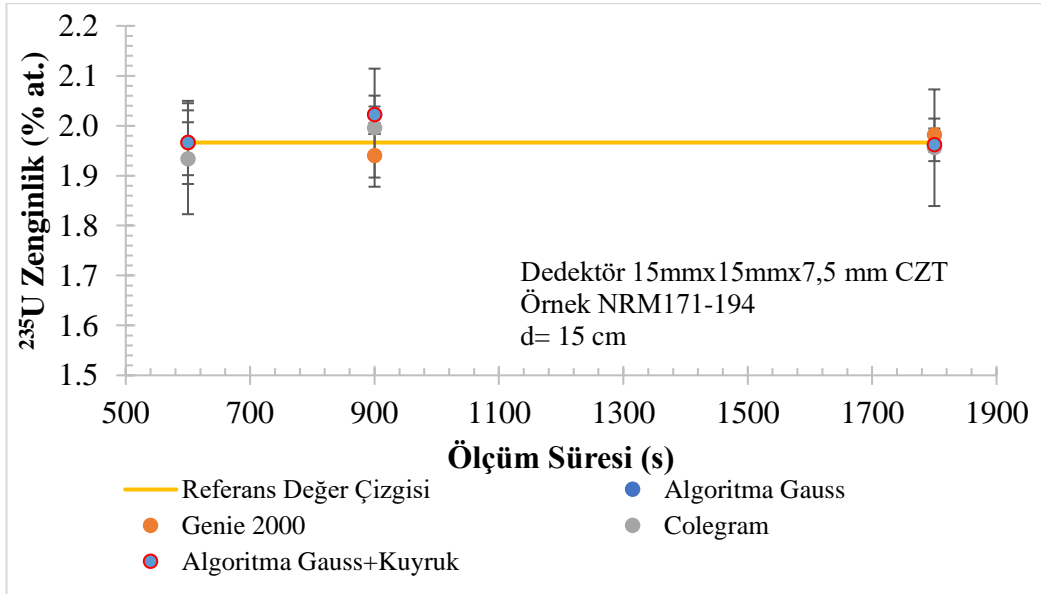
Şekil 4.11 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



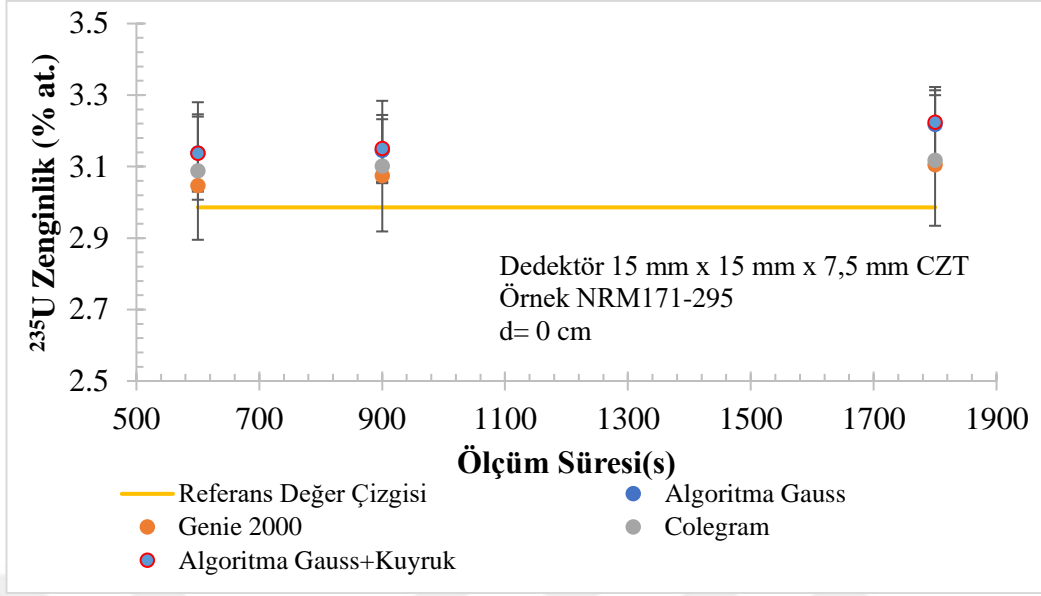
Şekil 4.12 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



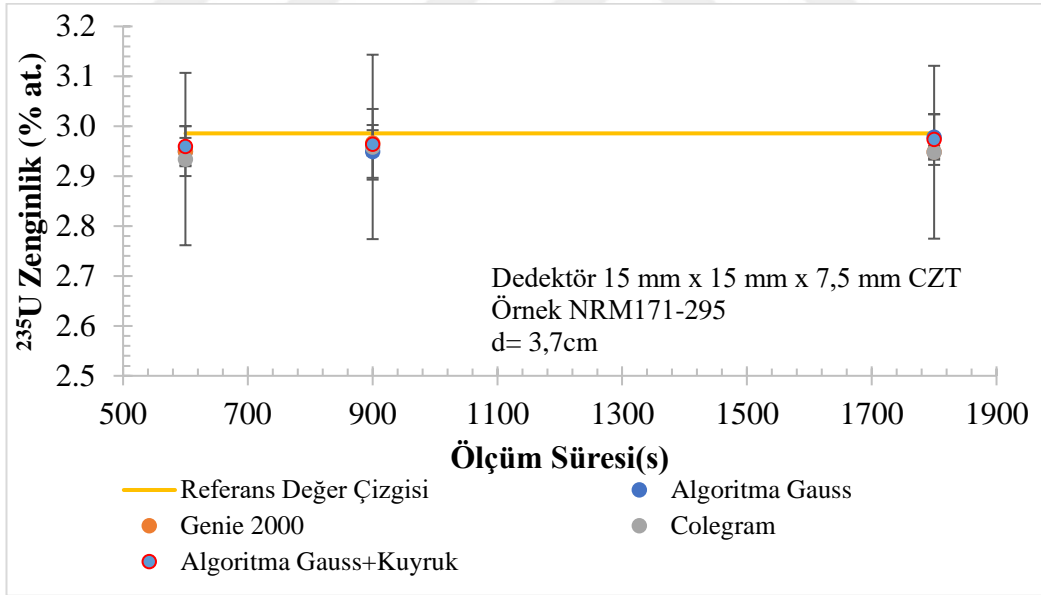
Şekil 4.13 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



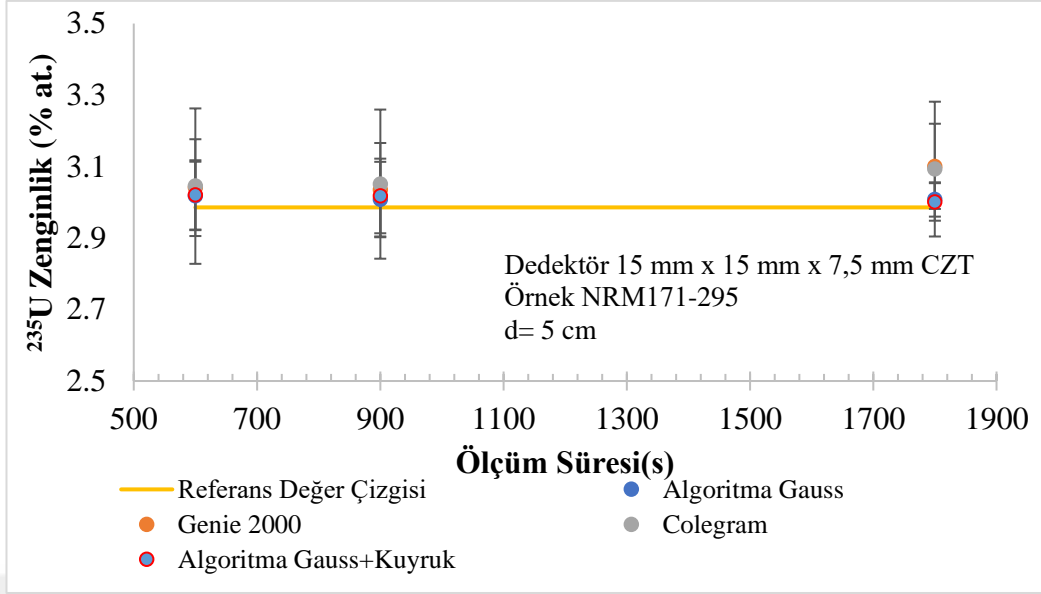
Şekil 4.14 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 1,96 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-194) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



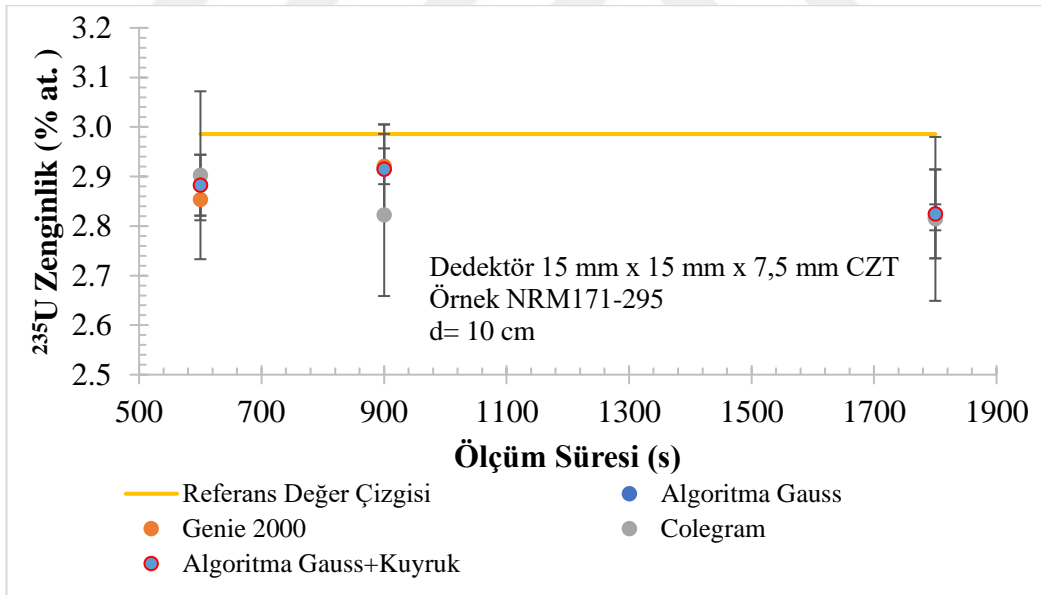
Şekil 4.15 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinde alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



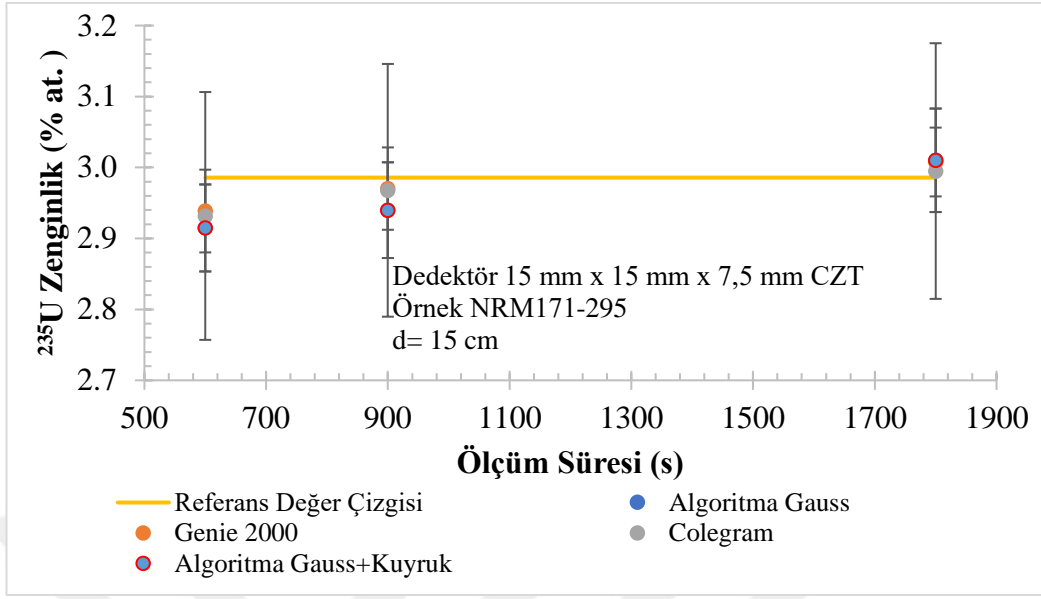
Şekil 4.16 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 3,7 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4.17 Düşük zenginlikte uranyum ((LEU % 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4.18 Düşük zenginlikte uranyum (LEU % 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 10 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4. 19 Düşük zenginlikte uranyum ((LEU % 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi için (NRM 171-295) dedektör yüzeyinden 15 cm mesafede alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği

Çizelge 4.3 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,73	2,86	0,74	7,42
900	0,72	0,72	1,71	0,72	1,74
1800	0,72	0,71	3,27	0,71	3,27

45

Çizelge 4.4 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,71	3,86	0,75	8,87
900	0,72	0,72	2,06	0,74	7,06
1800	0,72	0,71	1,78	0,71	6,04

Çizelge 4.5 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,7 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,70	2,18	0,71	1,41
900	0,72	0,76	5,62	0,76	4,96
1800	0,72	0,70	1,62	0,70	1,79

46

Çizelge 4.6 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,7 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,69	2,70	0,71	6,85
900	0,72	0,75	2,38	0,76	9,33
1800	0,72	0,70	1,17	0,69	6,37

Çizelge 4.7 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,71	8,80	0,71	9,18
900	0,72	0,72	9,92	0,72	10,21
1800	0,72	0,64	2,83	0,64	3,01

47

Çizelge 4.8 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,71	13,35	0,73	16,18
900	0,72	0,70	13,16	0,72	14,55
1800	0,72	0,66	7,33	0,65	6,08

Çizelge 4.9 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,66	2,20	0,66	2,20
900	0,72	0,69	6,97	0,69	6,97
1800	0,72	0,68	8,55	0,68	8,55

48

Çizelge 4.10 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,64	4,66	0,66	5,53
900	0,72	0,67	3,79	0,69	5,98
1800	0,72	0,71	2,52	0,70	5,57

Çizelge 4.11 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,72	3,98	0,72	3,98
900	0,72	0,71	6,18	0,71	6,18
1800	0,72	0,72	3,77	0,72	3,77

49

Çizelge 4.12 NRM171-071 (%0,72 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	0,72	0,76	6,23	0,76	7,26
900	0,72	0,74	5,55	0,72	6,72
1800	0,72	0,74	3,60	0,70	6,19

Çizelge 4.13 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,89	4,98	1,86	4,20
900	1,97	1,91	5,05	1,91	4,93
1800	1,97	1,94	7,10	1,94	7,00

50

Çizelge 4.14 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,92	2,36	1,88	6,71
900	1,97	1,93	2,49	1,91	6,53
1800	1,97	1,96	3,70	1,94	7,21

Çizelge 4.15 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,91	2,11	1,97	1,63
900	1,97	1,92	1,40	1,92	2,10
1800	1,97	1,99	1,86	1,98	1,73

51

Çizelge 4.16 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	2,00	1,29	1,95	6,02
900	1,97	1,95	1,22	1,90	5,96
1800	1,97	1,98	1,27	1,96	5,96

Çizelge 4.17 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,90	2,84	1,90	1,63
900	1,97	1,89	3,15	1,89	2,10
1800	1,97	1,98	4,17	1,97	1,73

52

Çizelge 4.18 NRM171-194 (%1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	2,00	1,29	1,95	6,02
900	1,97	1,95	1,22	1,90	5,96
1800	1,97	1,98	1,27	1,96	5,96

Çizelge 4.19 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	2,00	4,16	1,87	4,46
900	1,97	2,04	3,09	2,04	23,09
1800	1,97	2,07	5,39	2,07	5,39

53

Çizelge 4.20 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	2,01	4,36	2,01	6,16
900	1,97	2,01	2,39	2,00	7,27
1800	1,97	2,00	3,07	2,02	7,38

Çizelge 4.21 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,97	2,06	1,97	4,23
900	1,97	2,02	0,81	2,02	1,89
1800	1,97	1,96	0,71	1,96	1,67

54

Çizelge 4.22 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	1,97	1,97	3,30	1,93	6,02
900	1,97	1,94	2,25	2,00	5,94
1800	1,97	1,98	1,65	1,96	6,00

Çizelge 4.23 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	3,14	3,26	3,14	3,45
900	2,99	3,15	2,99	3,14	3,07
1800	2,99	3,22	3,05	3,22	3,10

55

Çizelge 4.24 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi yüzeyden (0 cm) alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	3,05	1,28	3,09	6,23
900	2,99	3,07	0,68	3,10	5,89
1800	2,99	3,10	0,37	3,12	5,86

Çizelge 4.25 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,96	1,35	2,95	1,70
900	2,99	2,96	2,39	2,95	1,79
1800	2,99	2,97	1,72	2,98	1,52

56

Çizelge 4.26 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 3,72 cm'de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,95	0,93	2,93	5,95
900	2,99	2,97	0,86	2,96	6,53
1800	2,99	2,95	0,42	2,95	5,92

Çizelge 4.27 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	3,02	3,21	3,02	3,17
900	2,99	3,02	3,46	3,01	3,51
1800	2,99	3,00	1,75	3,01	1,60

57

Çizelge 4.28 NRM171-295 (%2,99 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 5 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	3,04	4,45	3,05	7,99
900	2,99	3,04	4,31	3,05	7,53
1800	2,99	3,10	3,84	3,09	6,11

Çizelge 4.29 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,88	2,13	2,88	2,13
900	2,99	2,91	3,09	2,91	3,09
1800	2,99	2,82	3,18	2,82	3,18

58

Çizelge 4.30 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 10 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,85	1,47	2,90	5,84
900	2,99	2,92	1,24	2,82	5,82
1800	2,99	2,82	0,93	2,81	5,88

Çizelge 4.31 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,91	2,10	2,91	2,10
900	2,99	2,94	2,29	2,94	2,29
1800	2,99	3,01	2,42	3,01	2,42

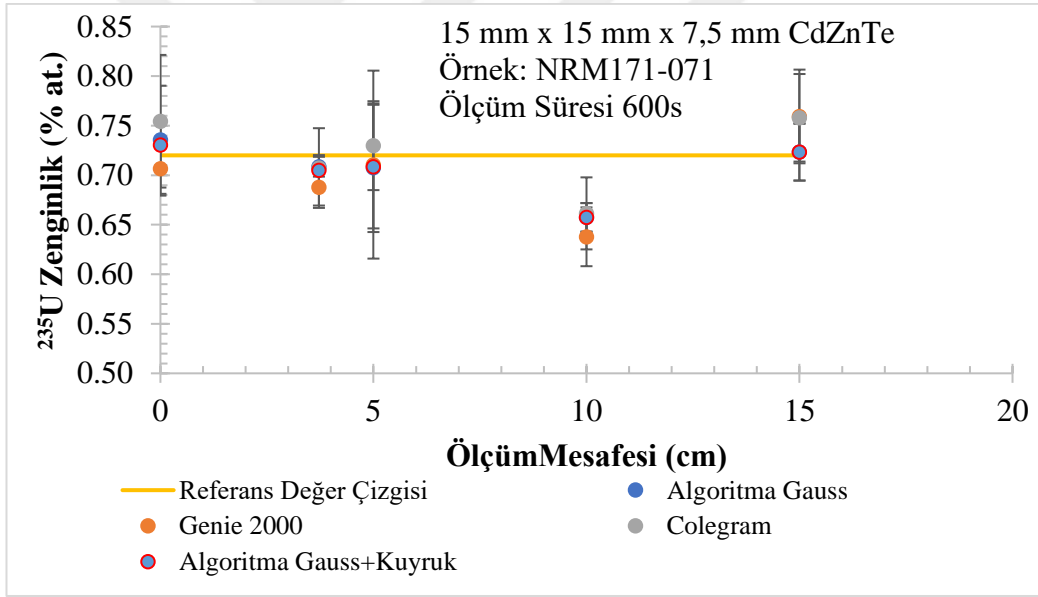
59

Çizelge 4.32 NRM171-295 (%2,98 ²³⁵U) Örneği için dedektör kaynak mesafesi 15 cm’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

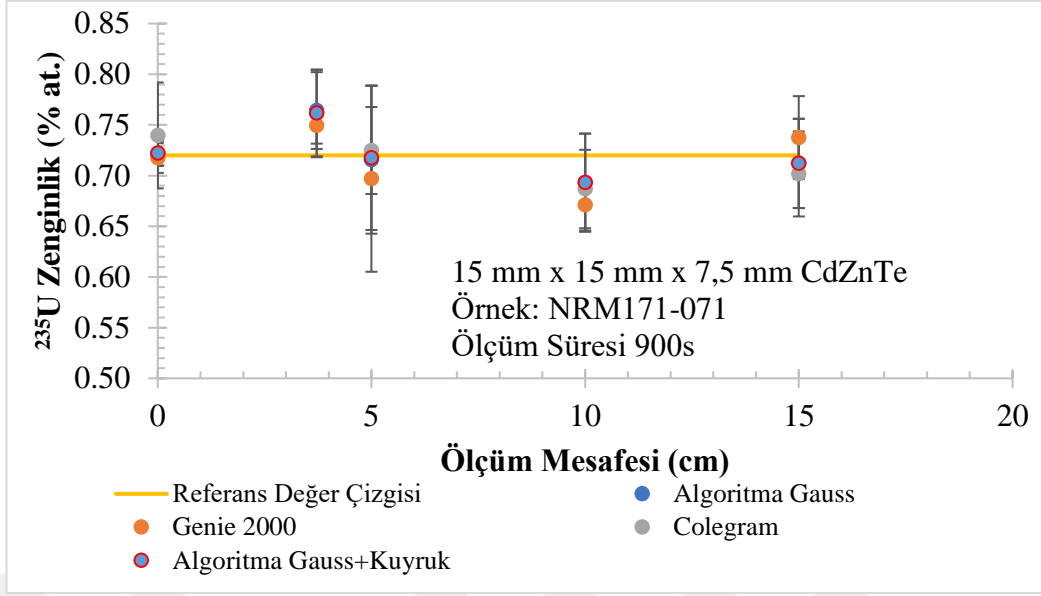
Ölçüm Süresi (s)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik	Zenginlik (%at.)	% Belirsizlik
600	2,99	2,94	1,98	2,93	6,06
900	2,99	2,97	1,95	2,97	6,06
1800	2,99	3,01	1,61	2,99	6,03

4.3. Ölçüm Mesafesi Değişimi

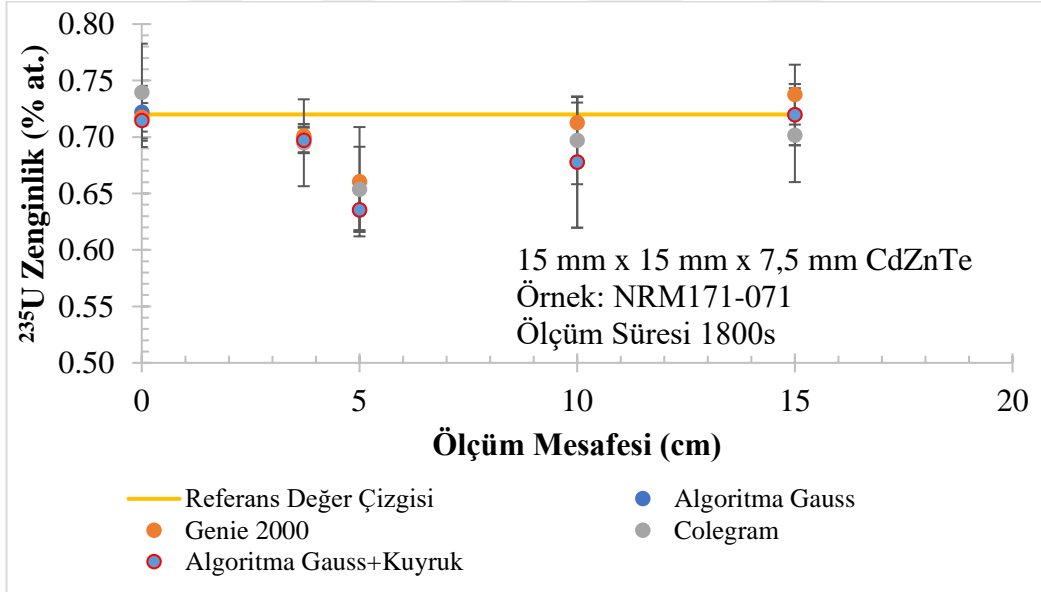
Bu bölümde, doğal uranyum (%0,72 ^{235}U) NRM171-071, düşük zenginlikteki NRM171-194,-295 kodlu (% 1,97 ve % 2,98 ^{235}U) zenginliklerine sahip uranyum standart referans malzemelerinin 15mmx15mmx7,5mm CdZnTe detektöründe mesafenin değişimine bağlı ölçümlerinin sonuçları sunulmuştur. Elde edilen uranyum spektrumları, geliştirilen algoritma kullanılarak zenginlik tayinleri hem kuyruk eklentisi hem de sadece gauss fonksiyonları kullanılarak 185,72 keV enerjili gama piki için alanlar belirlenip zenginlikleri hesaplanmıştır. Bunun yanında geliştirilen algoritmanın testi için Genie 2000 ve Colegram yazılımları kullanılarak zenginlik tayini de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.18-26 ve Çizelge 4.33-50'de verilmiştir.



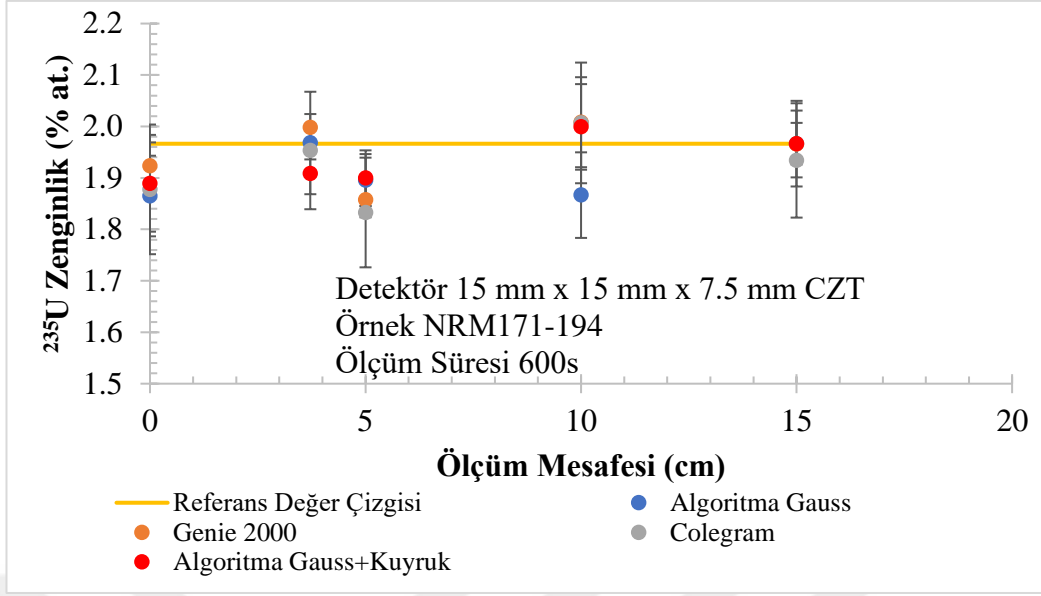
Şekil 4.20 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



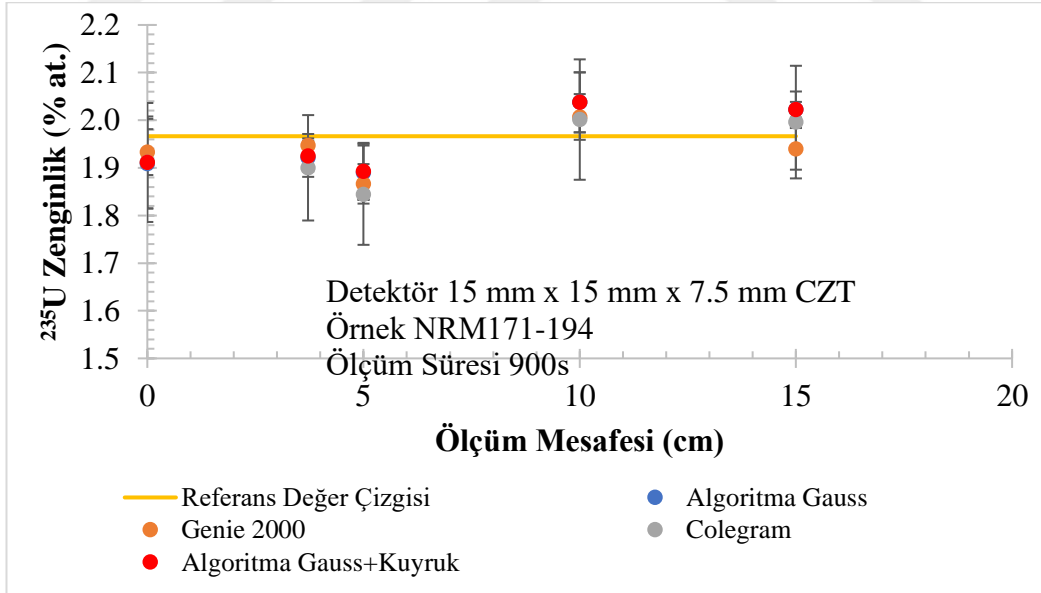
Şekil 4.21 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



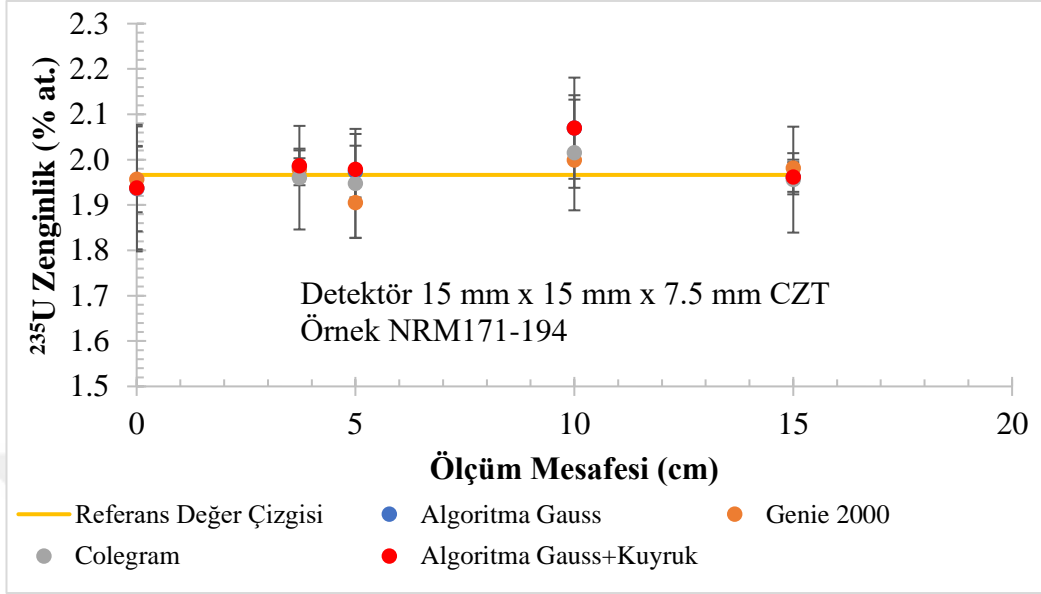
Şekil 4.22 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-071) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



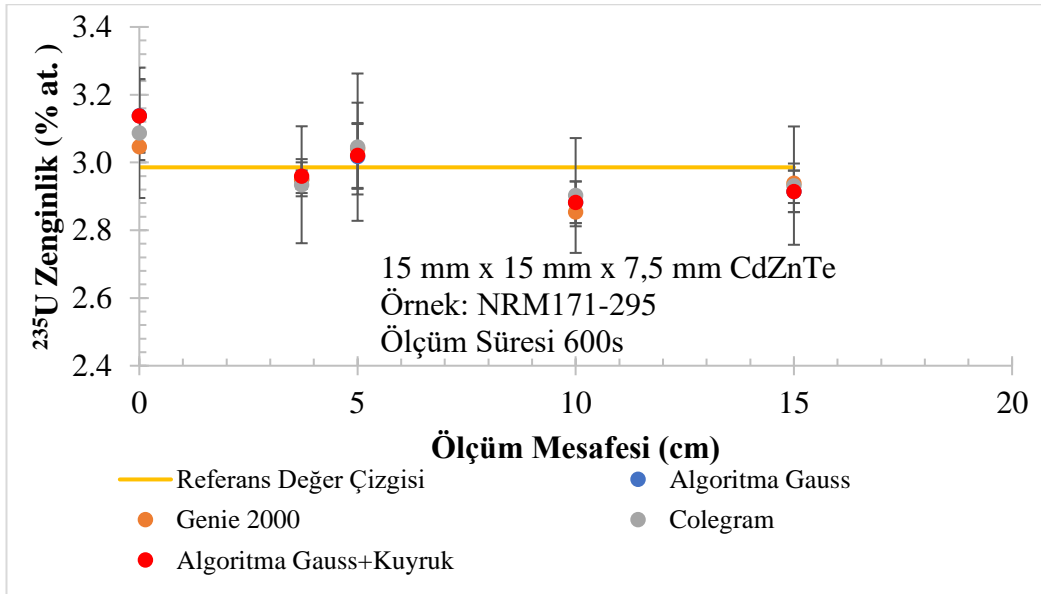
Şekil 4.23 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ²³⁵U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



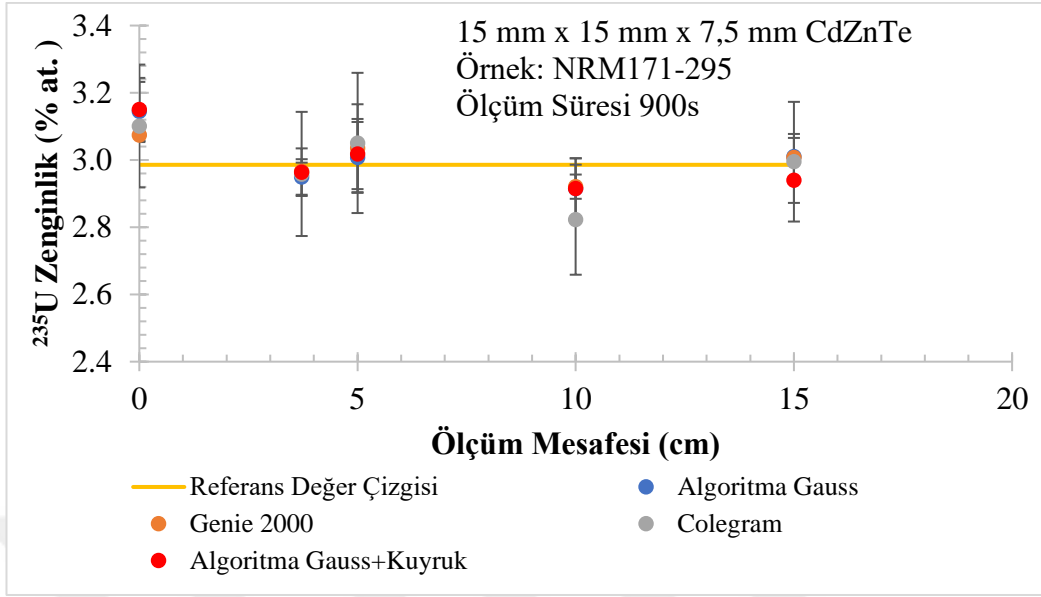
Şekil 4.24 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ²³⁵U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



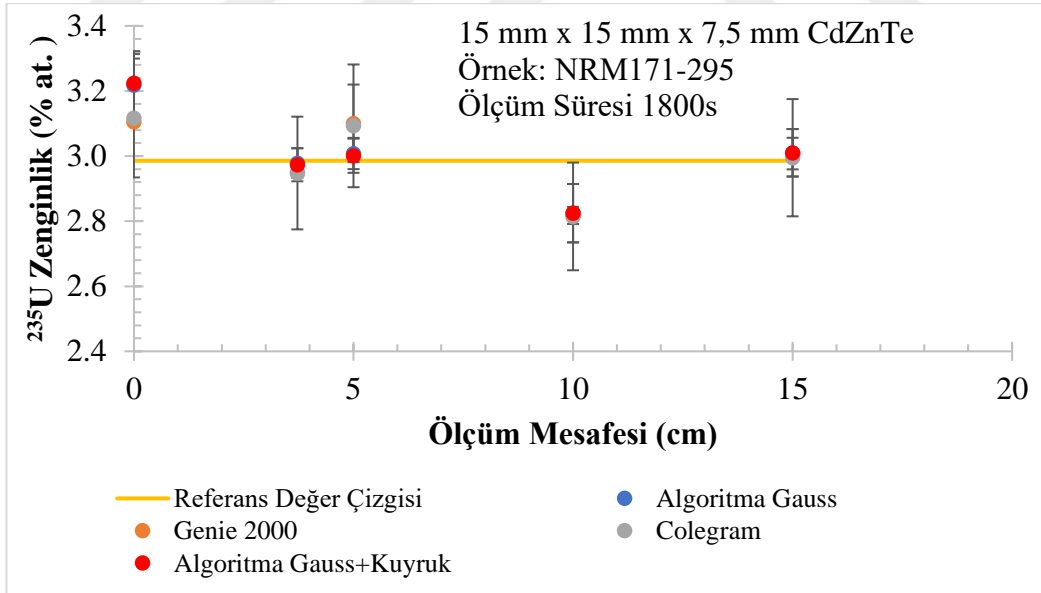
Şekil 4.25 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4.26 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 600 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4.27 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için dedektör 900 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği



Şekil 4.28 Düşük zenginlikteki uranyumun (% 2,98 ^{235}U bolluğuna sahip) standart referans malzemesi (NRM171-194) için 1800 s'de alınan ölçümlerin geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlarla yapılan uranyum zenginlik tayini sonuçları grafiği

Çizelge 4.33 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,73 ± 0,02	1,34	0,74 ± 0,05	2,06
3,72	0,72	0,70 ± 0,02	2,22	0,71 ± 0,01	1,71
5	0,72	0,71 ± 0,06	1,70	0,71 ± 0,06	1,86
10	0,72	0,66 ± 0,01	8,81	0,66 ± 0,01	8,81
15	0,72	0,72 ± 0,03	0,34	0,72 ± 0,03	0,34

Çizelge 4.34 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,71 ± 0,03	1,97	0,75 ± 0,07	4,65
3,72	0,72	0,69 ± 0,02	4,57	0,71 ± 0,08	1,90
5	0,72	0,71 ± 0,09	1,42	0,73 ± 0,04	1,23
10	0,72	0,64 ± 0,03	11,53	0,66 ± 0,04	8,25
15	0,72	0,76 ± 0,05	5,32	0,76 ± 0,04	5,13

Çizelge 4.35 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,72 ± 0,01	0,96	0,72 ± 0,01	0,15
3,72	0,72	0,76 ± 0,04	5,68	0,76 ± 0,04	6,01
5	0,72	0,72 ± 0,07	0,47	0,72 ± 0,07	0,71
10	0,72	0,69 ± 0,05	3,85	0,69 ± 0,05	3,85
15	0,72	0,71 ± 0,04	1,23	0,71 ± 0,04	1,23

66

Çizelge 4.36 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,72 ± 0,01	0,48	0,74 ± 0,05	2,60
3,72	0,72	0,75 ± 0,02	2,75	0,76 ± 0,04	5,60
5	0,72	0,70 ± 0,09	8,39	0,72 ± 0,04	0,54
10	0,72	0,67 ± 0,03	1,16	0,69 ± 0,04	4,74
15	0,72	0,74 ± 0,04	2,31	0,70 ± 0,04	2,67

Çizelge 4.37 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika değeri Örnek NRM171-071	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,71 ± 0,02	0,88	0,72 ± 0,02	0,15
3,72	0,72	0,70 ± 0,01	3,32	0,70 ± 0,01	3,03
5	0,72	0,64 ± 0,02	11,84	0,64 ± 0,02	11,87
10	0,72	0,68 ± 0,06	6,00	0,68 ± 0,06	6,00
15	0,72	0,72 ± 0,03	0,15	0,72 ± 0,03	0,15

67

Çizelge 4.38 NRM171-071 (% 0,72 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-071	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	0,72	0,72 ± 0,01	0,48	0,74 ± 0,04	2,60
3,72	0,72	0,70 ± 0,01	2,75	0,69 ± 0,04	3,61
5	0,72	0,66 ± 0,05	8,39	0,65 ± 0,04	9,33
10	0,72	0,71 ± 0,02	1,16	0,70 ± 0,04	3,32
15	0,72	0,74 ± 0,03	2,31	0,70 ± 0,04	2,67

Çizelge 4.39 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,89 ± 0,09	3,91	1,86 ± 0,08	5,17
3,72	1,97	1,91 ± 0,04	2,94	1,97 ± 0,03	0,08
5	1,97	1,90 ± 0,05	3,40	1,90 ± 0,05	3,60
10	1,97	2,00 ± 0,08	1,66	1,87 ± 0,08	5,08
15	1,97	1,97 ± 0,04	0,01	1,97 ± 0,08	0,01

Çizelge 4.40 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,92 ± 0,05	2,18	1,88 ± 0,13	4,51
3,72	1,97	2,00 ± 0,03	1,63	1,95 ± 0,11	0,67
5	1,97	1,86 ± 0,03	5,54	1,83 ± 0,11	6,80
10	1,97	2,01 ± 0,09	2,13	2,01 ± 0,12	2,06
15	1,97	1,97 ± 0,06	0,02	1,93 ± 0,11	1,65

Çizelge 4.41 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,91 ± 0,10	2,80	1,91 ± 0,09	2,93
3,72	1,97	1,92 ± 0,03	2,12	1,92 ± 0,04	2,28
5	1,97	1,89 ± 0,06	3,74	1,89 ± 0,06	3,89
10	1,97	2,04 ± 0,06	3,62	2,04 ± 0,06	2,62
15	1,97	2,02 ± 0,02	2,83	2,02 ± 0,04	2,83

Çizelge 4.42 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,93 ± 0,09	1,69	1,91 ± 0,13	2,80
3,72	1,97	1,95 ± 0,04	0,97	1,90 ± 0,11	3,37
5	1,97	1,87 ± 0,06	5,08	1,84 ± 0,11	6,21
10	1,97	2,01 ± 0,06	2,06	2,00 ± 0,13	1,78
15	1,97	1,94 ± 0,04	1,35	2,00 ± 0,12	1,51

Çizelge 4.43 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,94 ± 0,14	1,45	1,94 ± 0,14	1,53
3,72	1,97	1,99 ± 0,04	1,01	1,98 ± 0,03	0,89
5	1,97	1,98 ± 0,08	0,63	1,97 ± 0,08	0,38
10	1,97	2,07 ± 0,11	5,24	2,07 ± 0,11	5,24
15	1,97	1,96 ± 0,01	0,24	1,96 ± 0,03	0,24

70

Çizelge 4.44 NRM171-194 (% 1,97 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-194	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	1,97	1,96 ± 0,07	0,51	1,94 ± 0,14	1,48
3,72	1,97	1,98 ± 0,03	0,60	1,96 ± 0,11	0,31
5	1,97	1,91 ± 0,08	3,10	1,95 ± 0,12	0,96
10	1,97	2,00 ± 0,06	1,68	2,02 ± 0,13	2,48
15	1,97	1,98 ± 0,03	0,78	1,96 ± 0,12	0,53

Çizelge 4.45 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,98	3,14 ± 0,10	5,08	3,14 ± 0,11	5,10
3,72	2,98	2,96 ± 0,04	0,86	2,95 ± 0,05	1,19
5	2,98	3,02 ± 0,10	1,17	3,02 ± 0,10	1,07
10	2,98	2,88 ± 0,06	3,46	2,88 ± 0,06	3,46
15	2,98	2,91 ± 0,06	2,38	2,91 ± 0,06	2,38

71

Çizelge 4.46 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 600s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,98	3,05 ± 0,04	2,03	3,09 ± 0,19	3,41
3,72	2,98	2,95 ± 0,03	1,22	2,93 ± 0,17	1,72
5	2,98	3,04 ± 0,14	1,85	3,05 ± 0,22	1,99
10	2,98	2,85 ± 0,04	4,42	2,90 ± 0,17	2,78
15	2,98	2,94 ± 0,04	1,58	2,93 ± 0,19	1,81

Çizelge 4.47 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,98	3,15 ± 0,09	5,51	3,14 ± 0,11	5,32
3,72	2,98	2,96 ± 0,04	0,73	2,95 ± 0,05	1,21
5	2,98	3,02 ± 0,10	1,07	3,01 ± 0,10	0,74
10	2,98	2,91 ± 0,06	2,37	2,91 ± 0,06	2,37
15	2,98	2,94 ± 0,06	1,54	3,01 ± 0,06	0,82

72

Çizelge 4.48 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 900s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,98	3,07 ± 0,04	2,97	3,10 ± 0,19	3,87
3,72	2,98	2,97 ± 0,03	0,64	2,96 ± 0,17	0,91
5	2,98	3,04 ± 0,13	1,66	3,05 ± 0,21	2,18
10	2,98	2,92 ± 0,04	2,18	2,82 ± 0,16	5,47
15	2,98	3,01 ± 0,06	0,74	2,99 ± 0,18	0,31

Çizelge 4.49 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için algoritma bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Algoritma Gauss + Kuyruk Fonksiyonu ile Sonuçlar		Algoritma Sadece Gauss Fonksiyonu ile Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,98	3,22 ± 0,10	7,98	3,22 ± 0,10	7,78
3,72	2,98	2,97 ± 0,05	0,41	2,98 ± 0,05	0,25
5	2,98	3,00 ± 0,05	0,51	3,01 ± 0,05	0,74
10	2,98	2,82 ± 0,09	5,40	2,82 ± 0,09	5,40
15	2,98	3,01 ± 0,07	0,82	3,01 ± 0,07	0,82

73

Çizelge 4.50 NRM171-295 (% 2,98 ²³⁵U) Örneği için ölçüm süresi 1800s’de alınan ölçümler için ticari yazılımların bulguları

Ölçüm Mesafesi (cm)	Sertifika Değeri Örnek NRM171-295	Genie-2000 Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar		Colegram Yazılımı ile Elde Edilen Sonuçlar	
		Zenginlik (%at.)	% Fark	Zenginlik (%at.)	% Fark
0	2,99	3,10 ± 0,01	3,99	3,12 ± 0,18	4,40
3,72	2,99	2,95 ± 0,01	1,25	2,95 ± 0,17	1,27
5	2,99	3,10 ± 0,12	3,85	3,09 ± 0,19	3,59
10	2,99	2,82 ± 0,03	5,63	2,81 ± 0,17	5,74
15	2,99	3,01 ± 0,05	0,74	2,99 ± 0,18	0,31

4.4. Maskeleyici Radyoizotop Kaynakların Etkisi

Bu bölümde ^{133}Ba , ^{57}Co ve ^{152}Eu nokta kaynakların uranyum zenginlik tayininde uranyum spektrumları üzerinde maskeleyici(girişim) etkileri incelenmiştir. Maskeleyici radyoizotop kaynaklar uranyum standart referans malzemelerinin kabının ön penceresi üzerine yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Kullanılan radyoizotop kaynaklar yayımladıkları 300 keV daha küçük olan gama ışınları ile 185,72 keV ^{235}U gama pikine saçılmalar olması veya spektrumda girişim oluşturmaları sebebi ile 185,72 keV pik alanının doğru bir şekilde belirlenmesine olumsuz etki yapmaktadır. Yapılan uranyum zenginlik tayini neticesinde elde edilen bulgular Çizelge 4. 51 ile Çizelge 4. 56'da verilmiştir.

Çizelge 4.51 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
^{133}Ba	0,72	0,71 ± 0,05	-2,07
^{57}Co	0,72	0,73 ± 0,12	+1,95
^{152}Eu	0,72	0,70 ± 0,05	-3,29

Çizelge 4.52 Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
^{133}Ba	0,72	0,70 ± 0,06	-2,82
^{57}Co	0,72	0,73 ± 0,12	+1,07
^{152}Eu	0,72	0,72 ± 0,04	-0,08

Çizelge 4.53 Düşük zenginlikteki uranyum (% 1,97 ²³⁵U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
¹³³ Ba	1,97	1,92 ± 0,06	-2,34
⁵⁷ Co	1,97	1,83 ± 0,07	-6,92
¹⁵² Eu	1,97	1,88 ± 0,11	-4,50

Çizelge 4.54 Düşük zenginlikteki uranyum (% 1,97 ²³⁵U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
¹³³ Ba	1,97	1,91 ± 0,06	-2,62
⁵⁷ Co	1,97	1,83 ± 0,05	-6,70
¹⁵² Eu	1,97	1,88 ± 0,11	-4,39

Çizelge 4.55 Düşük zenginlikteki uranyum (% 2,98 ²³⁵U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 600 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
¹³³ Ba	2,98	2,98 ± 0,10	-0,10
⁵⁷ Co	2,98	2,99 ± 0,19	+0,10
¹⁵² Eu	2,98	3,18 ± 0,11	+6,63

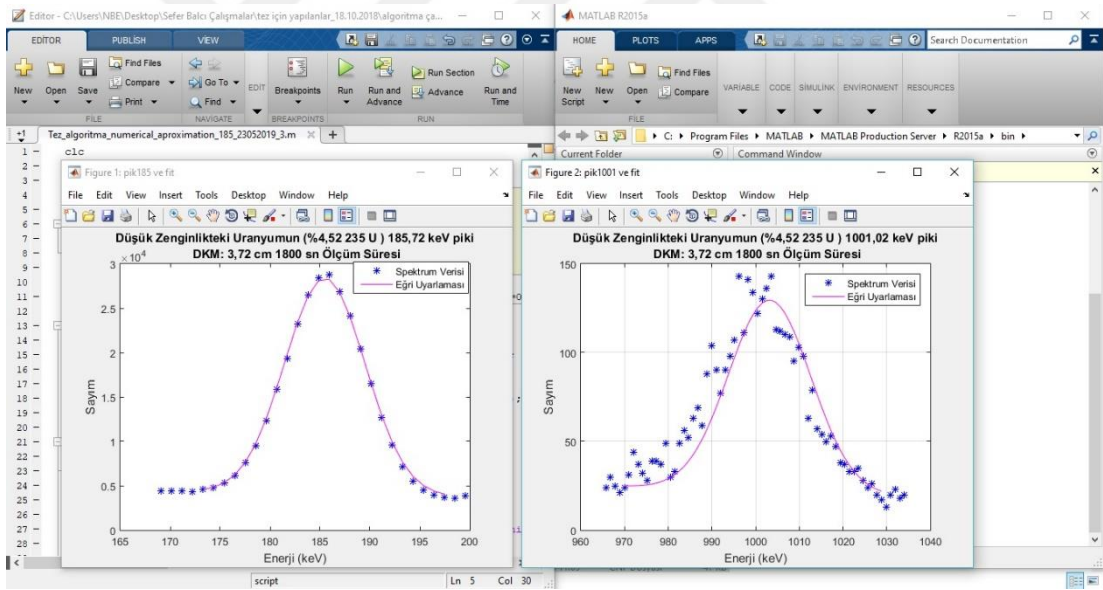
Çizelge 4.56 Düşük zenginlikteki uranyum (% 2,98 ²³⁵U) uranyum standart referans malzemesi dedektör yüzeyinden 5 cm mesafede 900 s ölçüm süresinde maskeli ölçüm bulguları

Radyoizotop	Referans Zenginlik Değeri (% at.)	Algoritma ile Hesaplanan Zenginlik Değeri (%)	% Fark
¹³³ Ba	2,98	2,99 ± 0,11	+0,01
⁵⁷ Co	2,98	3,00 ± 0,19	+0,43
¹⁵² Eu	2,98	3,19 ± 0,12	+6,86

5.SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında özel bölünebilir malzemelerden biri olan ^{235}U izotopunun, doğal uranyumun (% 0,72 ^{235}U) ve düşük zenginlikteki uranyumun (% 1,97 ^{235}U ve % 2,98 ^{235}U) zenginlik dereceleri tayinleri için tahribatsız ve hızlı olması nedeniyle gama ışını spektroskopisi (GRS) analitik tekniği CdZnTe dedektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yöntemin geçerliliğinin kanıtlanması için sertifikalı uranyum standart referans malzemeleri (NRM) kullanılmıştır. Uranyum zenginliğinin belirlenmesinde geleneksel olarak kullanılan NaI(Tl) sintilasyon detektörlerine alternatif olabilecek, şu anda mevcut olan yarı iletken teknolojisi bakımından uygulanabilir teknolojik olgunluğa erişmiş, oda sıcaklığında kullanılabilen eş-eksenli grid elektrotlu CdZnTe (CPG CZT) dedektörün tercih edilmesinin temel nedenleri arasında enerji ayırma gücünün nispeten yüksek olması ve ölçüm siteminin kompakt olması (1-2 cm^3 CdZnTe kristal hacmi) ve saha çalışmalarında uygulanabilir yeni bir teknolojik radyasyon dedektörü olmasıdır. Analitik yaklaşım olarak, uranyum standart referans malzemelerin içeriğindeki ^{235}U 'in izotopik bolluğunun belirlenmesinde, 185,72 keV karakteristik pikin ölçülmesine dayalı uranyum zenginlik ölçer prensibi kullanılmıştır. Uranyum zenginlik tayini saha şartlarında karşılaşılabilecek farklı koşulları göz önünde bulundurarak (sayım istatistiği etkileri, detektör kaynak mesafesi etkileri ve farklı radyoaktif kaynaklar tarafından maskelenme) düşük zenginlikteki uranyum (LEU) ve doğal uranyum (NU) numunelerinde eş-eksenli grid elektrotlu CdZnTe detektörü kullanılarak uranyum zenginleştirme derecesinin tayininin yapılabilirliği incelenmiştir. Bununla birlikte gerçekleştirilen zenginlik tayininin daha hızlı ve doğru bir şekilde yapılması için bir spektrum çözümüleme (deconvolution) algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma uranyum spektrumlarını *.TKA formatında okuyup ^{235}U izotopundan yayımlanan 185,72 keV enerjili gama pikini ve ^{238}U izotopunun bozunma serilerinden gelen $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'e ait 1001,02 keV enerjili gama piklerini bulmaktadır. Sonrasında Marguart Levenberg yaklaşımı temelinde “lineer olmayan en küçük kareler” esasına dayanan bir eğri uyarlamasını eşitlik 3.2, 3.3 ve 3.4’ü kullanarak pik alanlarını hesaplar (bk. Şekil 5.1). Geliştirilen spektrum değerlendirme algoritması ve kullanılan CdZnTe detektörünün saha ölçümlerinde karşılaşılabileceği farklı koşullarda uygulanabilirliğini test etmek için farklı sayım istatistiklerinde ölçümler iki farklı durum için elde edilmiştir. İlk durumda ölçüm süresinin değişimi 10dk, 15dk ve 30dk

gibi periyotlar ile her bir ölçüm en az 3 tekrarla alınarak düşük sayım hızlarında uranyum zenginlik tayini geliştirilen algoritma ile yapılmıştır. Elde edilen bulgulara Şekil 4. 3'ten başlayarak Şekil 4. 17'ye kadar grafikler olarak sunulmuştur. Bunun yanında Çizelge 4. 3 ten başlayarak Çizelge 4. 32'ye kadar çizelge şeklinde tüm numunelerin sonuçları ve diğer ticari yazılımlar kullanılarak yapılan uranyum zenginlik tayinleri bulguları ve yüzde farkları verilmiştir. İkinci durumda ise dedektör kaynak mesafesi dedektör yüzeyinden başlanarak sırası ile 0 cm (detektör yüzeyi), 3,72 cm, 5cm, 10 cm ve 15 cm gibi farklı ölçüm mesafelerinde en az 10 dk ölçüm süresi periyotunda ve en az 3 ölçüm tekrarı ile pik sayım istatistiklerinin tekrarlarına bilirligi dikkate alınarak, yeni geliştirilen algoritma ile zenginlik tayini yapılmıştır. Elde edilen bulgular Şekil 4. 18 ile Şekil 4.26'ya kadar grafiksel olarak ve Çizelge 4.33'ten Çizelge 4. 50'ye kadar olan kısımda tablolar halinde verilmiştir.



Şekil 5.1 Yeni algoritma MFOM ölçütüne göre 185,72 keV ve 1001,02 keV pikleri için eğri uyarlaması

Elde edilen ölçüm süresinin değişimine bağlı bulgular incelendiğinde ölçüm süresinin artması sayım istatistiğini iyileştirdiğinden yapılan uranyum zenginlik tayinlerinde referans değerden sapmaların azaldığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen yeni algoritma ile en

kötü sayım istatistiğinde hesaplanan zenginlik değerleri doğal uranyum için $0,72 \pm 0,03$ ^{235}U ve referans değerden sapması $0,34$ olarak bulunmuştur. Ticari yazılımlarda bu değerler ise Genie 2000 için hesaplanan zenginlik değeri $0,76 \pm 0,05$ ^{235}U ve referans değerden sapması $5,32$ 'dir. Colegram için ise bu değerler sırası ile sapması $0,76 \pm 0,04$ ^{235}U ve $5,13$ 'tür. Aynı ölçüm geometrisindeki en iyi sayım istatistiğinde elde edilen bulgular ise geliştirilen yeni algoritma için zenginlik değeri $0,72 \pm 0,03$ ^{235}U ve sapması $0,15$ iken Genie 2000 de zenginlik değeri $0,74 \pm 0,03$ ^{235}U ve sapması $2,31$ hesaplanmıştır. Colegram yazılımı kullanılarak pik alanı belirlendiğinde ise, zenginlik değeri $0,70 \pm 0,04$ ^{235}U ve sapması $2,67$ olarak elde edilmiştir. ^{235}U zenginlik derecesi doğal uranyuma göre daha yüksek olan uranyum numunelerde ise, geliştirilen yeni algoritma ile en düşük sayım istatistiğinde zenginlik değeri NRM171-194 referans malzemesi için $1,97 \pm 0,04$ ^{235}U ve sapması $0,01$ 'dir. Ticari yazılımlarda aynı ölçüm geometrisinde ise Genie 2000 için $1,97 \pm 0,06$ ^{235}U ve sapması $0,02$ 'dir. Colegram için $1,93 \pm 0,11$ ^{235}U ve sapması $1,65$ 'dir. NRM171-295 referans malzemesi için ise en düşük sayım istatistiğinde zenginlik değeri $2,91 \pm 0,06$ ^{235}U ve sapması $2,38$ 'dir. Genie 200 yazılımı uygulandığında $2,94 \pm 0,04$ ^{235}U ve sapması $1,58$ 'dir. Colegram için ise $2,93 \pm 0,19$ ^{235}U ve sapması da $1,81$ 'dir. Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen yeni algoritma ile hesaplanan zenginlik değerleri referans değeri ile sayım süresinin değişimine göre yaklaşık olarak 10 ve daha az bir sapma ile referans ^{235}U zenginlik derecesine kıyasla doğru sonucu bulmaktadır. Sayım istatistiği iyileştikçe de bu değer daha da düşerek sonuçlar iyileşmektedir. İkinci durum olan mesafe değişim ile sayım istatistikleri sonuçları göz önüne alındığında detektör yüzeyinden alınan ölçümler haricinde sayım istatistiği iyileşmesine bağlı olarak aynı şekilde zenginlik hesaplamaları daha doğru sonucu vermektedir. Son olarak maskeleme koşulu altında algoritma test edilmiştir. Maskeleme koşulu oluşturmak için seçilen radyoizotopların, $185,72$ keV civarında veya yakın komşuluğunda yayınladıkları gama pikleri olması sebebi ile bu enerji bölgesinde yapacakları saçılmalar ile ilgilenilen enerjinin pik alanına etki yaptıkları kesin tespit edilmiştir. Alınan karmaşık gama spektrumlarından (uranyum + başka bir radyoizotop) elde edilen bulgular göz önüne alındığında ise zenginlik değerleri hem doğal uranyum ($0,72$ ^{235}U) hem de düşük zenginlikteki uranyumların zenginlik dereceleri 10 sapma aralığında ancak doğru bir şekilde belirlenebilmiştir.

Bu tez kapsamında, geliştirilen yeni algoritma uranyum zenginlik tayini uygulamalarında pik alanını doğru ve hassas bir biçimde hesaplayarak saha şartlarında karşılaşılabilecek ölçüm süresi kısıtlamaları ölçüm mesafesi etkileri ve maskeleyen koşulları altında test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda geliştirilen yeni algoritma uranyum zenginlik tayini için kullanılan CdZnTe detektörlerinden elde edilen spektrumları doğru ve kabul edilebilir aralıklarda uranyum malzemelerinin içeriğindeki ²³⁵U izotopunun bolluğunun belirlenmesinde kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Gelecek çalışmalarda ise yapılan bu algoritma geliştirilerek diğer detektör spektrumlarını işlemeye ve uygun hale getirilebilir ve donanımsal destek ile birleştirilerek uranyum zenginliği için analiz yapabilen bir yazılım aracı halinde patentlenebilir olacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışması, “ABH67390007- J02012 kodlu "Nükleer Madde Karakterizasyonunda ²³⁵U İzotopik Bolluğunun HPGe ve CdZnTe Dedektörlü Gama Spektroskopisiyle Belirlenmesi-Method Development for HpGe and CdZnTe Detector Based Gamma Spectroscopic Determination of Isotopic Abundance in Nuclear Material Characterization (2017-2020)” UAEA koordineli araştırma projesinin(CRP) alt iş paketleri kapsamında gerçekleştirilmiş ve proje bütçesinden desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Balian, H., & Eddy, N. W., 1977. Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks. *Nuclear Instruments and Methods*, 145(2), 389-395.
- Bièvre, P. D., 1986. 235 Uranium isotope abundance certified reference material for gamma spectrometry EC nuclear reference material 171 certification report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P., 2010. *Numerical methods for engineers*. New York: McGraw-Hill Higher Education
- Croft, S., Favalli, A., Weaver, B. P., Williams, B. J., Burr, T. L., Henzlova, D., & Mcelroy, R. D., 2015. A Critical Examination of Figure of Merit (FOM). *Assessing the Goodness-of-Fit in Gamma/X-ray Peak Analysis*.
- Debertin, K., & Helmer, R. G., 2001. *Gamma- and x-ray spectrometry with semiconductor detectors*. Amsterdam: North-Holland.
- Gilmore, G., 2008. *Practical gamma-ray spectrometry – 2nd Edition*. John Wiley & Sons.
- IAEA, 2011. *Safeguards techniques and equipment*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Knoll, Glenn F., 2010. *Radiation Detection and Measurement*. Wiley.
- Knoll, G. F. And Wehe D.K., 2012. *Radiation Detection and Measurement, Solutions Manual, 4th Edition*. John Wiley & Sons
- Korob, R., & Nuño, G. B., 2006. A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution γ spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(5), 525-531.
- Lowe, B. G., & Sareen, R. A., 2017. *Semiconductor x-ray detectors*. Boca Raton: CRC Press.
- Luke, P.N., 1995. Unipolar charge sensing with coplanar electrodes—Application to semiconductor detectors. *IEEETrans. Nucl. Sci.* 42,207–213.

- Luke, P.N., 1996. Electrode configuration and energy resolution in gamma-ray detectors. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 380, 232–237.
- Mattussek, P. 1985. Accurate determination of the ^{235}U isotope abundance by Gamma spectrometry. A user's manual for the Certified Reference Material EC-NRM171/NBS-SRM-969. Institut für Kernphysik, Report KfK 3752, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany
- Meleshkovskii, I., Pauly, N., & Labeau, P., 2019. Determination of the uranium enrichment without calibration standards using a 500 mm³ CdZnTe room temperature detector with a hybrid methodology based on peak ratios method and Monte Carlo counting efficiency simulations. Applied Radiation and Isotopes, 148, 277-289.
- Misra, S. K., & Eddy, N. W., 1979. IFOM, a formula for universal assessment of goodness-of-fit of gamma ray spectra. Nuclear Instruments and Methods, 166(3), 537-540.
- Moré, J. J., 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. Lecture Notes in Mathematics Numerical Analysis, 105-116.
- Mortreau, P., Berndt, R., 2004. Determination of the uranium enrichment with the NaIGEM code. Nucl. Instrum. Methods A 530, 559.
- NNDC 2019. National Nuclear Data Center, NuDat 2.7 Interactive Chart of Nuclides <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> erişim: 25.05.2019
- Schlesinger, T., Toney, J., Yoon, H., Lee, E., Brunett, B., Franks, L., & James, R., 2001. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material. Materials Science and Engineering: R: Reports, 32(4-5), 103-189.
- Sordo, S. D., Abbene, L., Caroli, E., Mancini, A. M., Zappettini, A., & Ubertini, P., 2009. Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications. Sensors, 9(5), 3491-3526.

- Tsoufanidis, N., & Landsberger, S., 2011. Measurement and detection of radiation. Sayfa 191-194 Boca Raton: CRC Press / Taylor & Francis Group
- Van Loat, B., Anh, L. T., Tam, N. C., Khue, P. D., & Hue, B. M., 2013. Experimental determination of enrichment of uranium material by gamma-spectroscopic technique. *Journal of Mathematics – Physics*, 29(2), 2013th ser., 33-39.
- Yücel, H., 2007. “The Applicability of MGA Method for Depleted and Natural Uranium Isotopic Analysis in the Presence of Actinides (^{232}Th , ^{237}Np , ^{233}Pa and ^{241}Am).” *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 65, no. 11, 2007, pp. 1269–1280.
- Yücel, H., & Dikmen, H., 2009. Uranium enrichment measurements using the intensity ratios of self-fluorescence X-rays to 92keV gamma ray in $\text{UXK}\alpha$ spectral region. *Talanta*, 78(2), 410-417.
- Yücel, H. (2009). İleri gama spektroskopisi laboratuvar deney föyü, AÜNBE, <https://acikders.ankara.edu.tr/course/index.php?categoryid=128>, erişim:06.06.2019.
- Yücel, H., Uyar, E., & Esen, A., 2012. Measurements on the spectroscopic performance of CdZnTe coplanar grid detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(8), 1608-1615.
- Yücel, H., 2017. Nükleer emniyet ve nükleer güvenlik denetimi temelleri dersi laboratuvar deney föyü, AÜNBE, <https://acikders.ankara.edu.tr/course/index.php?categoryid=128>, erişim: 06.06.2019.
- Yücel, H., Birgül, O., Uyar, E., Çubukçu, Ş., 2019. A novel approach in voltage transient technique for the measurement of electron mobility and mobility-lifetime product in CdZnTe detectors, *Nuclear Eng. and technology*, vol. 51, no. 3, 2019, pp. 731–737.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Sefer BALCI

Doğum yeri: Çumra

Doğum Tarihi: 25.11.1991

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum yılı)

Lise : Çumra Anadolu Lisesi (2004-2009)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği (2009-2014)

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