

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**X VE GAMA IŞINI DETEKTÖRLERİNDE ÖLÜ ZAMAN DÜZELTMESİ İÇİN
MODELLER**

DOKTORA TEZİ

Fizikçi Salih Mustafa KARABIDAK

**HAZİRAN 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

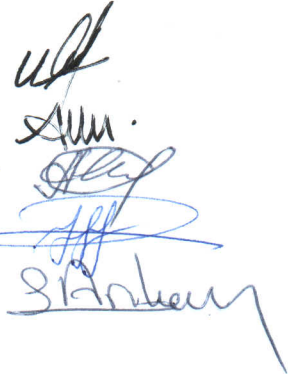
**X VE GAMA IŞINI DETEKTÖRLERİNDE ÖLÜ ZAMAN DÜZELTMESİ İÇİN
MODELLER**

Salih Mustafa KARABIDAK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (Fizik)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11. 05. 2010
Tezin Savunma Tarihi : 04. 06. 2010**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Rıza ABBASOĞLU
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hüseyin KARAL
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Pervin ARIKAN



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

X veya gama ışınlarının belirlenmesinde elektronik aygıtlardan oluşan sayma sistemleri kullanılır. Ölü zaman, sayma sistemlerinde kullanılan bu elektronik aygıtların zaman sınırlılıklarından dolayı ileri gelir. Ölü zamana bağlı olarak düşük, orta ve yüksek sayma oranlarında sayma kayıplarının, pile up pulsu ve pile up pulsu reddetme sayma oranlarının belirlenmesi ve bunlar ile ilgili düzeltmelerin yapılması amacıyla yapılan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlandı.

Çalışmanın bir kısmını teşkil eden deneysel ölçümler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Atom ve Çekirdek Fiziği araştırma laboratuvarında gerçekleştirildi.

Doktora tez çalışmamda deneysel ve teorik bilgi yönünden yararlandığım ve öğrenciliğimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Uğur ÇEVİK'e ve Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA hocama en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Fizik Bölümü Atom ve Çekirdek Fiziği laboratuvarlarında çalışmalarım boyunca ilgilerini ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Ahmet ÇELİK'e, Öğr. Gör. Selim KAYA'ya ve Arş. Gör. Necati ÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle sürekli beni cesaretlendiren ve yanımda olan aileme, eşime ve oğluma en içten saygı ve sevgilerimi sunarım.

Salih Mustafa KARABIDAK

Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| İÇİNDEKİLER..... | III |
| ÖZET..... | VII |
| SUMMARY..... | VIII |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | IX |
| TABLolar DİZİNİ..... | XII |
| SEMBOLLER DİZİNİ..... | XIII |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Elektromanyetik Radyasyon..... | 1 |
| 1.3. Maddeyle Fotonların Etkileşimi..... | 3 |
| 1.3.1. Fotoelektrik Soğurma..... | 4 |
| 1.3.2. Compton Saçılması..... | 5 |
| 1.3.3. Çift Oluşumu..... | 7 |
| 1.3.4. Koherent Saçılma..... | 9 |
| 1.3.5. Foton Soğrulması..... | 9 |
| 1.4. Detektörler..... | 12 |
| 1.4.1. Foton Detektörlerinin Genel Özellikleri..... | 14 |
| 1.4.2. Yarıiletken Detektörlerde Fiziksel Süreçler..... | 15 |
| 1.4.3. Puls Genişliği Üzerine Detektör Etkisi..... | 17 |
| 1.4.4. Detektör Özellikleri..... | 19 |
| 1.4.4.1. Ayırma Gücü (Rezolüsyon-FWHM)..... | 19 |
| 1.4.4.2. Verim ve Boyut..... | 19 |
| 1.4.4.3. Pik-Compton Oranı..... | 20 |
| 1.5. Elektronikler..... | 20 |
| 1.5.1. Detektör Güç Sağlayıcıları..... | 22 |
| 1.5.2. Ön Yükseltici..... | 22 |
| 1.5.3. Yükseltici..... | 23 |
| 1.5.4. Analog Dijital Dönüştürücü (ADC) ve Çok Kanallı Analizör..... | 24 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.5.5. | Yükselme Zamanı (Rise Time) ve Yığılma (Pile up) Pulsu Reddetme..... | 26 |
| 1.6. | Piklerin ve Spektrumların Şekillenmesi..... | 28 |
| 1.6.1. | Spektrum Şekillenmesi..... | 28 |
| 1.6.2. | Spektral Tabii Fon (Background) Şekillenmesi..... | 30 |
| 1.6.3. | Pik Şekillenmesi..... | 31 |
| 1.7. | Ölü Zaman ve Yığılma (Pile up) Düzeltmeleri..... | 33 |
| 1.7.1. | Ölü Zaman Ölçme Yöntemleri..... | 35 |
| 1.7.1.1. | İki Kaynak Yöntemi..... | 35 |
| 1.7.1.2. | Bozunan Kaynak Yöntemi..... | 36 |
| 1.7.2. | Ölü Zaman Düzeltmeleri..... | 36 |
| 1.7.3. | Yığılma (Pile Up) Etkisi..... | 37 |
| 1.7.4. | Etkin Ölü Zaman Ölçümüne Dayalı Yığılma (Pile Up) Düzeltmesi..... | 38 |
| 1.7.5. | Ölü Zaman ve Yığılma (Pile Up) Düzeltmeleri İçin Bazı Modeller..... | 40 |
| 1.7.5.1. | İşlem Zamanı Saati (Live Time Clock) Yöntemi..... | 40 |
| 1.7.5.2. | Gedcke-Hale Yöntemi..... | 40 |
| 1.7.5.3. | Puls Üreticisinin Kullanımı..... | 41 |
| 1.7.5.4. | Kayıp Serbest Sayması (Loss-Free Counting)..... | 41 |
| 1.7.5.5. | Sıfır Ölü Zaman Sayması (Zero-Dead Time Counting)..... | 42 |
| 2. | YAPILAN ÇALIŞMALAR | 43 |
| 2.1. | Deneysel Kurgu | 43 |
| 2.2. | Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi | 44 |
| 2.2.1. | Tüm Puls Genişliğinin Pikleşme Zamanı ile Değişimi | 46 |
| 2.2.2. | Pikleşme Zamanı ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki | 46 |
| 2.2.3. | Tüm Puls Genişliği ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki | 46 |
| 2.2.4. | Sistemin Çıkma Sayma Oranının Belirlenmesi | 47 |
| 2.2.5. | Pikleşme Zamanının İşlem Zamanı Düzeltmesine Etkisi | 49 |
| 2.2.6. | Çalışılan Enerji Aralığında Puls Belirleme Etkinliğinin Belirlenmesi | 50 |
| 2.2.7. | Pikleşme Zamanı ile Yığılma/ K_{α} Puls Oranının Belirlenmesi | 50 |
| 2.3. | Sistem Ölü Zamanının ve Sayma Kayıplarının Belirlenmesi İçin Model | 52 |
| 2.3.1. | Teorik Arka Plan | 54 |
| 2.3.2. | Yöntem | 56 |
| 2.4. | Net Pik Alanının Belirlenmesi | 57 |
| 2.4.1. | Kod Arka Planı | 58 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2.4.2. | Algoritma | 61 |
| 2.5. | Sistemin Gerçek (Doğru) Sayma Oranının Belirlenmesi..... | 62 |
| 2.5.1. | Teorik Arka Plan..... | 65 |
| 2.5.2. | Sayma Oranı Modeli..... | 66 |
| 2.5.2.1. | Yükselticiden Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı..... | 70 |
| 2.5.2.2. | Analog Dijital Çeviriciden (ADC) Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı..... | 71 |
| 2.5.2.3. | Yükseltici ve Analog Dijital Çeviriciden Oluşan Birleşik Sistemin Ölü Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı..... | 72 |
| 2.5.2.4. | Girilen Sayma Oranı ile Sistemin Toplam Ölü Zamanının Belirlenmesi..... | 73 |
| 2.5.3. | Sayma Oranı Düzeltmesi..... | 73 |
| 2.5.4. | Sayma Oranı (SAYOR) Programı..... | 74 |
| 2.6. | Sistemin Yığılma ve Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranının Belirlenmesi..... | 75 |
| 2.6.1. | Yığılma Puls Oranı Modeli..... | 77 |
| 2.6.1.1. | Yığılma Puls Oranı..... | 79 |
| 2.6.1.2. | Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranı..... | 81 |
| 2.6.1.3. | Yükselticinin Minimum Ayırma Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı..... | 82 |
| 2.6.2. | Yığılma (PILEUP) Programı | 83 |
| 3. | BULGULAR | 85 |
| 3.1. | Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi | 85 |
| 3.1.1. | Tüm Puls Genişliğinin Pikleşme Zamanı ile Değişimi | 85 |
| 3.1.2. | Pikleşme Zamanı ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki | 86 |
| 3.1.3. | Tüm Puls Genişliği ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki | 88 |
| 3.1.4. | Sistemin Çıkma Sayma Oranının Belirlenmesi | 89 |
| 3.1.5. | Pikleşme Zamanının İşlem Zamanı Düzeltmesine Etkisi | 89 |
| 3.1.6. | Puls Belirleme Etkinliğinin Belirlenmesi | 90 |
| 3.1.7. | Pikleşme Zamanı ile Yığılma/ K_a Puls Oranının Değişimi..... | 91 |
| 3.2. | Sistem Ölü Zamanı ve Sayma Kayıpları | 92 |
| 3.3. | Sistem Ölü Zamanının Sayma Oranına Etkisi..... | 94 |
| 3.3.1. | Sayma Oranı Üzerine Pikleşme Zamanının Etkisi..... | 94 |
| 3.3.2. | Giren ve Çıkan Sayma Oranları Arasındaki İlişkilerin Ampirik İfadeleri..... | 104 |
| 3.3.3. | Girilen Sayma Oranı ile Ölü Zaman Arasındaki İlişki..... | 111 |
| 3.4. | Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu, Yığılma Pulsu Reddetme ve Sayma Oranı Üzerine Etkisi..... | 113 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.4.1. | Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu Oranına Etkisi..... | 113 |
| 3.4.2. | Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranına Etkisi..... | 118 |
| 3.4.3. | Minimum Ayırma Zamanının Sayma Oranı Kaybına Etkisi..... | 123 |
| 4. | SONUÇLAR | 129 |
| 4.1. | Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi | 129 |
| 4.2. | Sistem Ölü Zamanı ve Sayma Kayıpları | 130 |
| 4.3. | Sistemin Ölü Zamanı ve Sayma Oranı Kaybı..... | 133 |
| 4.4. | Sistemin Yığılma Pulsu Oranı, Yığılma Pulsu Reddetme Oranı ve Yükselticinin Minimum Ayırma Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı..... | 140 |
| 5. | ÖNERİLER..... | 143 |
| 6. | KAYNAKLAR | 144 |
| 7. | EKLER..... | 151 |
| ÖZGEÇMİŞ | | |

ÖZET

X veya gama ışınlarının belirlenmesinde elektronik aygıtlardan oluşan sayma sistemleri kullanılır. Ölü zaman, sayma sistemlerinde kullanılan bu elektronik aygıtların zaman sınırlılıklarından dolayı ileri gelir. Bu çalışma; tespit edilen ölü zamana bağlı olarak düşük, orta ve yüksek sayma oranlarında sayma kayıplarının, yığılma (pile up) pulsu sayma oranının, yığılma pulsu reddetme sayma oranının ve yükselticinin minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma kayıplarının belirlenmesi ve bunlar ile ilgili düzeltmelerin yapılması amacıyla gerçekleştirildi.

Çalışma, sayma sisteminin uygun pikleşme zamanının (peaking time) belirlenmesi (bu aynı zamanda ölü zamanın analitik ifadesinin türetilmesine eşdeğerdir), düşük sayma oranlarında gözlenen spektrum için ölü zaman düzeltme modeli, orta ve yüksek sayma oranlarında sayma oranlarının düzeltilmesi için model ve yığılma pulsu, yığılma pulsu reddetme ve yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan sayma oranı kayıplarının giderilmesi amacıyla oluşturulan model olmak üzere dört ana çalışmadan ve her biri için ayrı ayrı kodlanan simülasyon programlarından oluşmaktadır.

Çalışma sonunda çalışmanın birinci kısmında uygun pikleşme zamanı 3.84 μ s, yükselticinin kritik ayırma zamanı 3.66 μ s ve yükselticinin karakteristik ayırma zamanı 3.73 μ s olarak belirlendi. İkinci kısmında düşük sayma oranları için bir model oluşturuldu. Üçüncü ve dördüncü kısımlarda önerilen teorik model çalışma esnasında kodlanan simülasyon programları sonucu ile karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonucunda önerilen modeller ve program sonuçlarının oldukça uyumlu oldukları gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Detektörler, Pikleşme Zamanı, Minimum Ayırma Zamanı, Analog Dijital Çevirici Çevirme Zamanı, Ölü Zaman, Sayma Oranı, Sayma Oranı Düzeltmeleri, Yığılma Pulsu, Yığılma Pulsu Reddetme Sayma Oranı

SUMMARY

Models for Dead Time Corrections at X and Gamma Ray Detectors

Electronic devices are used to detection of radiation due to x or gamma rays. The dead time of counting systems is based on time limitations of these electronic devices that used at counting systems. This work was done to determine of a analytic equation for the dead time and of counting losses at low and high counting rates and at pile up peak counting rates and at pile up pulse reject counting rates and of counting losses due to minimum resolving time of amplifier according as this dead time and to correct these counting losses.

In this work contain to determination of proper peaking time of counting system and to a dead time correction model for observed spectrum at low counting rates and to a model for correction of counting rates at medium and high counting rates and to correction of counting rates pile up peak and pile up pulse reject and to correction of counting rate losses result from peaking time of amplifier and simulation programs.

Consequently, proper peaking time, critical resolving time and characteristic resolving time of the amplifier was founded as 3.84, 3.66 and 3.73 μs for first part, respectively. Also, a new model for low count rates was proposed in second part. In addition to these, new proposed theoretical models at third and fourth parts of working compared with results from coded simulations programs. A pretty good agreement is obtained between theoretical models and simulation programs.

Key Words: Detectors, Peaking Time, Minimum Resolving Time, Analog Digital Converter Conversion Time, Dead Time, Count Rate, Count Rate Corrections, Pile up Pulse, Pile up Pulse Reject Count Rate

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 1. Mg'un kütle soğurma katsayılarının dalga boyu ile değişimi..... | 5 |
| Şekil 2. Compton saçılması..... | 6 |
| Şekil 3. Çift oluşumu..... | 8 |
| Şekil 4. Elektromanyetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması.11 | 11 |
| Şekil 5. Değerlik bandının tepesine iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları..... | 16 |
| Şekil 6. Gama spektrometre sisteminin blok şeması..... | 21 |
| Şekil 7. Ölçümlerde kullanılan x-ışını spektrometre sisteminin blok şeması..... | 44 |
| Şekil 8. Tüm puls genişliği (T_w)..... | 47 |
| Şekil 9. Tipik sistem zamanlaması..... | 49 |
| Şekil 10. Tipik Gaussian şekilli spektral çizgi..... | 51 |
| Şekil 11. Saf Se elementinin tipik K x-ışını ve K_{α} yığılma piki spektrumu..... | 51 |
| Şekil 12. Gözlenen T_j aralığı ve buna karşılık gelen t_j Poisson süreci arasındaki ilişkinin şematik gösterimi..... | 54 |
| Şekil 13. Ölü zaman düzeltme yöntemi için göz önünde bulundurulmuş puls süreci..... | 57 |
| Şekil 14. Paralyzable ve non-paralyzable modellerinin davranışları..... | 63 |
| Şekil 15. Sayma sistemlerinde kullanılan yükseltici, analog dijital çevirici ve yükseltici + analog dijital çevirici elemanları için maksimum sayma sayısını belirleme için yapılan modelleme..... | 69 |
| Şekil 16. Sayma oranı modellemesi için dikkate alınan durumun şematik gösterimi..... | 71 |
| Şekil 17. Yığılma modellemesinde dikkate alınan sayma sistemi zaman örnekleme..... | 81 |
| Şekil 18. Yükselticinin pikleşme zamanı ile tüm puls genişliğinin değişimi..... | 85 |
| Şekil 19. Pikleşme zamanı ile minimum ayırma zamanı arasındaki ilişki..... | 87 |
| Şekil 20. Minimum ayırma zamanı ile tüm puls genişliği arasındaki ilişki..... | 88 |
| Şekil 21. Sistem çıkma sayma oranı..... | 89 |
| Şekil 22. Pikleşme zamanının işlem zamanı düzeltmesine etkisi..... | 90 |
| Şekil 23. Çalışılan enerji aralığında puls belirleme etkinliği..... | 91 |
| Şekil 24. Pikleşme zamanı ile Yığılma / K_{α} puls oranı değişimi..... | 92 |
| Şekil 25. Ölü zaman modeli ile düzeltilmiş sayma oranının düzeltilmemiş sayma oranı arasındaki ilişki..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 26. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranına göre değişimi..... | 96 |
| Şekil 27. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranına göre değişimi..... | 98 |
| Şekil 28. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranına göre değişimi..... | 100 |
| Şekil 29. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yükselticide gözlenen sayma oranları..... | 101 |
| Şekil 30. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yükseltici ve analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları..... | 102 |
| Şekil 31. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yalnızca analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları..... | 103 |
| Şekil 32. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnızca yükselticide gözlenen sayma oranı..... | 104 |
| Şekil 33. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnızca analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranı..... | 105 |
| Şekil 34. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık önce yükselticide sonra analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranı..... | 106 |
| Şekil 35. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık her üç durumun gözlenen sayma oranı..... | 107 |
| Şekil 36. Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnızca yükselticinin gözlenen sayma oranları..... | 108 |
| Şekil 37. Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık direkt analog dijital çeviricinin gözlenen sayma oranları..... | 109 |
| Şekil 38. Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yükseltici ve analog dijital çeviricinin gözlenen sayma oranları..... | 110 |
| Şekil 39. Sayma oranına karşılık ölü zaman grafiği..... | 112 |
| Şekil 40. Yükselticinin pikleşme zamanı ile yığılma piki sayma oranlarının değişimi..... | 115 |
| Şekil 41. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması..... | 116 |
| Şekil 42. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması..... | 117 |
| Şekil 43. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması..... | 117 |
| Şekil 44. Yükselticinin pikleşme zamanı ile yığılma piki reddetme (PUR) sayma oranlarının değişimi..... | 120 |
| Şekil 45. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik reddetme oranlarının karşılaştırılması..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 46. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik reddetme oranlarının karşılaştırılması..... | 122 |
| Şekil 47. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik reddetme oranlarının karşılaştırılması..... | 122 |
| Şekil 48. Yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranları kaybının değişimi..... | 125 |
| Şekil 49. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması..... | 126 |
| Şekil 50. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması..... | 127 |
| Şekil 51. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması..... | 127 |
| Şekil 52. Saf Se elementinin düzeltilmiş ve düzeltilmemiş spektrumlarının karşılaştırılması..... | 131 |
| Şekil 53. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık yalnızca yükseltici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması..... | 134 |
| Şekil 54. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık yalnızca analog dijital çevirici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması..... | 135 |
| Şekil 55. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık hem yükseltici hem de analog dijital çevirici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması..... | 136 |
| Şekil 56. Bu çalışmada önerilen bozunan kaynak modelinin paralyzable ve non-paralyzable model sonuçları ile karşılaştırılması..... | 137 |
| Şekil 57. Bu çalışmada önerilen bozunan kaynak modeli ile elde edilen girilen sayma oranlarına karşılık gelen sistemin toplam ölü zamanı..... | 139 |

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|--|-----|
| Tablo 1. Analitik yöntem ve Genie 2000 yazılımı ile elde edilen toplam ölü zaman..... | 94 |
| Tablo 2. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları..... | 95 |
| Tablo 3. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları..... | 97 |
| Tablo 4. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları..... | 99 |
| Tablo 5. Sayma oranlarına karşılık gelen ölü zamanlar..... | 111 |
| Tablo 6. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan yığılma puls oranları..... | 114 |
| Tablo 7. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan yığılma puls reddetme (PUR) oranları..... | 119 |
| Tablo 8. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranları kaybı..... | 124 |
| Tablo 9. Bir uygulama: Saf Se elementinin K_{α} ve K_{β} tesir kesitleri..... | 132 |
| Tablo 10. Bir uygulama: Mermer numunesinin kütle soğurma katsayıları..... | 140 |
| Tablo 11. Deneysel olarak elde edilen yığılma puls sayma oranları..... | 142 |

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|--------------|--|
| c | : Işık hızı |
| d | : Ayırıcının seviyesi |
| E | : Elektromanyetik radyasyonun enerjisi |
| h | : Planck sabiti |
| k | : Boltzman sabiti |
| M | : Malzemenin molar kütlesi |
| R | : Sistemin gürültü çözme gücü |
| Z | : Atom numarası |
| ALAN | : Spektrumdaki herhangi bir pikin alanını hesaplayan program |
| ADC | : Analog dijital çevirici |
| FET | : Alan etkili transistör |
| MCA | : Çok kanallı çözümleyici |
| PILEUP | : Yığılma pulsu simülasyon programı |
| PUR | : Yığılma pulsu reddetme |
| SAYDUZ | : Sayma düzeltmesi programı |
| SAYOR | : Sayma oranı simülasyon programı |
| STDT | : Sistemin toplam ölü zamanı |
| TDT | : Bir kanaldaki ölü zaman |
| TADCT | : Toplam analog dijital çevirme zamanı |
| FWHM | : Yarı maksimumdaki tam genişlik |
| B_i | : i kanalındaki tabii fon |
| dx | : Sonsuz ince bir kalınlık |
| f_p | : Yığılma düzeltme çarpanı |
| I_0 | : Fotonun şiddeti |
| $m_{A,B,AB}$ | : Gerçek sayma oranları |
| $m_{e,d}$ | : Elektron veya deliğin kütlesi |
| m_0 | : Durgun elektronun kütlesi |
| N_A | : Avogadro sayısı |
| $n_{A,B,AB}$ | : Gözlenen sayma oranları |
| r_0 | : Klasik elektron yarıçapı |

| | |
|---------------------------|--|
| T_C | : Analog dijital çevirici çevirme zamanı |
| T_{Clock} | : Analog dijital çeviricinin işlem frekansı |
| T_D | : Ölü zaman |
| T_{Live} | : İşlem zamanı |
| T_P | : Yükselticinin pikleşme zamanı |
| T_R | : Yükselticinin minimum ayırma zamanı |
| T_{Real} | : Gerçek zaman |
| T_W | : Tüm puls genişliği |
| T_Y | : Yükseltici ölü zamanı |
| γ | : Radyoaktif çekirdeğin gama enerjisinin dallanma oranı |
| ε | : Detektör verimi |
| κ | : Çift üretimi tesir kesiti |
| λ | : Elektromanyetik radyasyonun dalga boyu, Ortalama serbest yol |
| ν | : Elektromanyetik radyasyonun frekansı, ADC çevirme frekansı |
| ρ | : Malzeme yoğunluğu |
| σ | : Compton tesir kesiti, İstatistiksel dağılımın standart sapması |
| τ | : Fotoelektrik tesir kesiti |
| Ω | : Katı açısı |
| μ_τ | : Fotoelektrik lineer azaltma katsayısı |
| μ_σ | : Compton saçılması lineer azaltma katsayısı |
| μ_κ | : Çift üretimi lineer azaltma katsayısı |
| \hbar | : Planck sabitinin 2π ye bölünmüş hali |
| $\frac{\mu}{\rho}$ | : Kütle soğurma katsayısı |
| $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ | : Klein-Nishina diferansiyel saçılma tesir kesiti |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde “radyasyon” kelimesini duymayan hemen hemen yok gibidir. Radyasyon kelime olarak ışık veya ısı yayan demektir. Her ne kadar alfa ve beta parçacıkları ışık ve ısı saçan değilse de radyasyon olarak ifade edilmiştir. Radyasyon; normalde bulundurulması gerekenden fazla enerjiye sahip olan molekül, atom ve atom çekirdeği tarafından yayımlanan yüklü ve yüksüz parçacıklar ile elektromanyetik dalga olan enerji paketlerine (fotonlara) verilen addır. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları ve gamma ışını gibi elektromanyetik dalga fotonları doğal olarak oluşan farklı radyasyon tipleridir. Canlıların ihtiyacı olan ve kullanım alanlarını saymakla bitiremediğimiz enerji, güneşten elektromanyetik radyasyon yoluyla bize ulaşmaktadır. Her tip radyasyon kendine has enerji taşır ve az veya çok üzerine düştüğü maddeye tesir ederek değişik reaksiyonlara yol açar.

Elektronlar ve protonlar arasındaki etkileşmeleri ve çok yüksek enerjiye sahip olan kararsız atomların bazı parçacıklar yayarak kararlı hale gelmeleri olayları elektromanyetik dalga ya da radyasyon olarak ifade edilir. Bu nedenle elektromanyetik radyasyon genel olarak ikiye ayrılır: Ultraviyole, görünür ışık, kızıl ötesi, mikrodalgalar, radyo ve TV dalgaları ve güç aktarımı şekillerinde ifade edilen iyon oluşturmeyen (iyonize olmayan) radyasyon ve x-ışını, alfa, beta, gama ve kozmik ışınları gibi madde ile etkileşme yaptığıında iyon oluşturan (iyonize) radyasyondur. Elektromanyetik dalgalar ya da radyasyon, düşük enerjili radyo dalgalarından yüksek enerjili gama ışınlarına uzanan yelpazede yayılan enerji dalgalarıdır. Gama ve x ışını spektrumu elektromanyetik radyasyonun küçük bir kısmını oluşturur. Elektromanyetik dalgalar bir genliğe ve dalga pikleri arasında uzunluğa (dalga boyuna) sahiptir.

1.2. Elektromanyetik Radyasyon

Elektromanyetik radyasyonun genel bir özelliği, elektrik ve manyetik alanda depolanan enerjinin dalga paketçikleri biçiminde uzayda taşınmasıdır. Herhangi bir

elektromanyetik radyasyon λ dalga boyu, ν frekansı veya bunlara eşdeğer E enerjisi ile tanımlanabilir. Boşlukta bu nicelikler $\lambda \cdot \nu = c$ ve $E = h \cdot \nu$ bağlantıları ile birbirleriyle ilişkilidir. Burada c elektromanyetik radyasyonun hızı ve h Planck sabitidir. Genel olarak; radyo dalgaları frekans cinsinden (genellikle MHz), orta ölçekli radyasyonlar dalga boyu cinsinden (genellikle cm), gama ve x ışınları enerji cinsinden ifade edilir (genellikle keV). Radyasyon miktarı toplam enerjiyle veya bireysel enerji paketçikleri (foton) sayısı ile tanımlanabilir [1].

İyi tanımlanmış bir kaynak tarafından yayımlanan radyasyonun şiddeti dalga boyu, frekans ya da enerjinin bir fonksiyonu olarak çizilirse, elektromanyetik radyasyon spektrumu genel olarak dört tipik şekilde ortaya çıkar: a) sürekli spektrum, b) çizgi spektrumu, c) çizgi ve sürekli spektrumun bir bileşimi ve d) detektör ayırma gücüne bağlı olarak çizgi spektrumunun genişlemiş hali. Bir spektrumun her bir çizgisi veya farklılığı kuantum teorisi tarafından tanımlanan ışın yayan sistemlerin farklı enerji seviyeleri arasındaki bir geçişten ileri gelir. Sistem belirli bir enerji değerine sahip bir durumda bulunurken bozunarak yine belirli ve daha düşük enerjili bir duruma geçer. Bunun tersine sürekli spektrum üretebilen birçok mekanizma vardır. Bunlardan ilki, sistemin durum enerjileri farklı olmasına rağmen birçok durumda radyasyon sürekli olarak ortaya çıkabilir. Örneğin bu durum, ölçmede kullanılan sistemin ayırma gücünden çok daha küçük olan ayrılabilir her bir kendine özgü duruma sahip bir çekirdek MeV mertebesindeki bir enerji ile uyarılırsa meydana gelebilir. İkincisi, radyasyon rastgele süreçlerle üretilebilir. Yani çok yüksek enerjili elektronlar atomun elektrik alanı tarafından hızlı bir şekilde yavaşlatıldığında, bu elektronların enerjisi frenleme ışınımı (bremsstrahlung) olarak bilinen bir radyasyon yayar ve böylece spektrum sürekli hale gelir [1].

Spektrumdaki bir bileşenin şiddeti veya genişliği her bir ayrı pikin veya sürekli dağılımın altındaki alandır. Birçok durumda, ölçülen alanın kendisi ilgilenilen alanın değeri vermez. Örneğin, farklı enerjilerde farklı sayma verimlerine sahip foton belirleme sistemlerinin kullanılması spektrumu bozar. Bu nedenle doğrudan gözlenen pik alanları bazı araç ve yöntemlerle sürekli olarak düzeltilmelidir. Spektrum, detektör üzerine düşen farklı enerjili fotonların oluşturduğu ve bir takım elektronik aygıtlar kullanılarak elde edilen şekillenişlerdir. Matematiksel olarak düzeltme, gözlenen spektrumun ölçümde kullanılan detektörün cevap fonksiyonu ile girilen spektrum üzerine ilave edilmesidir. Detektörler çizgi spektrumunu çizgilerin bir birleşimine ve bunların sürekli bileşenlerine çevirir. Bu nedenle deneysel çalışanların işi kaynak tarafından salınan spektrumun

karakteristikleri hakkında bilgi çıkarmak için, gözlenen karmaşık spektrumları doğru bir şekilde yorumlamaktır [1].

1.3. Maddeyle Fotonların Etkileşimi

Herhangi bir parçacığın veya radyasyonun bir elektrik sinyali üretebilmesi, toplanabilen yüklü ikincil parçacıkların üretilmesine bağlıdır. Yüklü parçacıklar doğrudan detektörün yapıldığı malzemedeki atomları iyonlaştırarak ve uyararak detektör kristali içinde bir sinyal üretir. Gama fotonları yüksüzdür ve sürekli olarak sinyal üretemez. Gama ışınlarının belirlenmesi, detektör kristali içindeki elektronlara enerjisini aktararak yaptığı etkileşme türlerine bağlıdır. Bu uyarılmış elektronlar detektör kristalindeki atomları iyonize eder ve uyarır, birçok yüklü çiftin (elektron-delik çiftleri) üretimine yol açar ve enerjisini kaybeder. Yüklü çiftlerin üretilme sayısı birincil etkileşme ile üretilen elektronların enerjisi ile orantılıdır [2].

Fotonun madde içine nüfuz etmesine bağlı olarak x ve gama fotonları çeşitli yollardan atomlarla etkileşebilir. Bu etkileşmelerde fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift üretimi olarak ifade edilen başlıca üç süreç gözlenir. Her üç süreçte de serbest elektronlar üretilir. Bu süreçler foton enerjisinin elektron enerjisine tamamen veya kısmen transfer etmesi ile gerçekleşir. Fotoelektrik etkileşme düşük enerjilerde baskın iken çift oluşumu yüksek enerjilerde ve Compton saçılması orta enerjilerde önemlidir. Ayrıca gama radyasyonu Bragg ya da Rayleigh saçılması olarak da bilinen koherent saçılma şeklinde de madde ile etkileşir [2]. Üretilen bu elektronlar madde içerisindeki hareket yolları üzerinde elektron–iyon ya da elektron–delik çiftleri oluşturdukları için hızları azalır. Etkileşme sonunda fotonlar ya tamamen yok olur ya da belirli açılarda saçılır ve böylece foton hareketinde ansızın ve süreksiz değişimler meydana gelir [3]. Çoğu foton detektöründe bu yük çiftlerinden yararlanılarak ya bir fotonun yolu belirlenir, ya da üretilen yük sayısı ölçülerek enerjisi belirlenir [1].

1.3.1. Fotoelektrik Soğurma

Fotoelektrik soğurma süreçlerinde, foton tamamen yok olacak bir biçimde soğurucu atoma bağlı bir elektronla etkileşir ve fotonun enerjisinin tümü (E_γ) elektron tarafından soğurulur. Elektron

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1)$$

miktarındaki bir E_e enerjisi ile atomdan dışarıya atılır. Burada E_b fırlatılan elektronun bağlanma enerjisidir. Elektronun bağlanma enerjisinden küçük bir enerjiye sahip foton durumunda (1) denklemi ihmal edilir. Bu durumda hem enerji hem de momentum korunumu sağlanmadığından fotoelektrik soğurma olayı meydana gelmez [1].

Etkileşme bir boşlukta meydana gelmediği sürece fırlatılan elektronun hızı komşu atomlar tarafından yavaşlatılacak ve zamanla serbest yola da bağlı olmak üzere madde içinde soğurulacaktır. Fırlatılan elektron atomun kabuğunda bir boşluk oluşturacağından bu atom bir ya da ardışık daha çok x ışını veya Auger elektronu salarak taban duruma döner. Eğer bu etkileşme külçe malzemede meydana gelirse, oluşan bu x ışınları çevredeki malzeme tarafından soğurulur. Bu yüzden birçok durumda bu etkileşmede, etkileşme bölgesine yakın malzemeye foton enerjisinin tümü transfer edilme durumundadır [1].

Etkileşme ihtimalinin bir ölçüsü olan etkileşme tesir kesiti tek bir analitik formülle ile ifade edilememesine rağmen kabaca bu ifade malzemenin Z atom numarasına ve fotonun E_γ enerjisine bağlı olarak

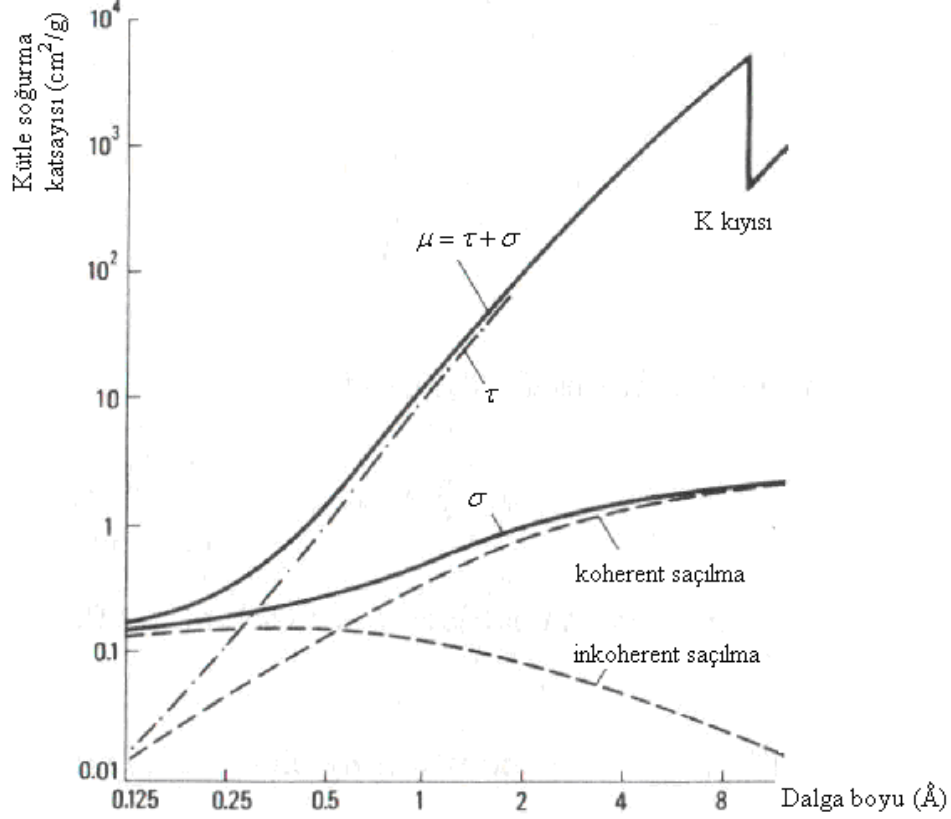
$$\tau = \text{sabit} \cdot Z^{4.5} \cdot E_\gamma^{-3} \quad (2)$$

ifadesiyle verilebilir. Güçlü Z bağıllığı yüksek Z numaralı malzemelerde foton soğurulmasında çok etkin olduğuna işaret eder. Foton enerjisine güçlü bağıllık, bu etkinin düşük enerjili etkileşmelerde niçin baskın bir etkileşme türü olduğuna işaret ederken yüksek enerjili etkileşmelerde ihmal edilmesinin bir nedenidir.

Fotoelektrik tesir kesitine bağlı μ fotoelektrik lineer azaltma katsayısı

$$\mu_\tau = \frac{\tau \cdot \rho \cdot N_A}{M} \quad (3)$$

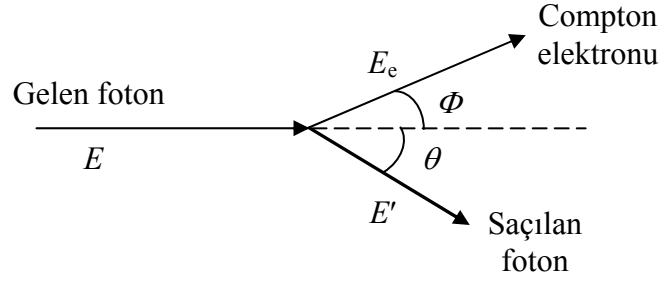
ile verilir. Burada ρ malzemenin yoğunluğunu, N_A Avogadro sayısını ve M de malzemenin molar kütesini ifade etmektedir.



Şekil 1. Mg'un kütle soğurma katsayılarının dalga boyu ile değişimi

1.3.2. Compton Saçılması

Compton etkileşme süreci gelen gama ışını fotonuyla soğurucu materyaldeki elektron arasında vuku bulur. Bu süreçte, foton enerjisinin yalnızca belirli bir kısmı elektrona transfer edilir ve gelen foton ikinci bir foton olarak malzeme içerisinde hareketine devam eder. Enerji ve momentum korunumu yasalarının bir sonucu olarak, çıkan fotonun ve elektronun enerjisi yayımlandıkları açılar ile yakından ilişkilidir. Şekil 2'ye göre, E gelen fotonun enerjisini, E' ve E_e çıkan fotonun ve elektronun enerjisini ve α 'da E/m_0c^2 ifadesini göstermektedir. Burada m_0c^2 elektronun durgun kütesine karşılık gelen enerjidir (511 keV). Bu durumda saçılan fotonun enerjisi [1]



Şekil 2. Compton saçılması

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

ile, saçılan elektronun enerjisi

$$E_e = E \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right\} \quad (5)$$

ile verilir. Bu iki açı arasındaki ilişki

$$\tan \phi = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \tan(\theta/2)} \quad (6)$$

şeklindedir. Çok küçük foton saçılma açıları için elektronun enerjisi sıfıra gider ve bu yüzden saçılan fotonun enerjisi, gelen fotonunun enerjisi ile hemen hemen aynı değere sahiptir. 180° saçılma açısı için bile saçılan foton yaklaşık olarak $E/(1+2\alpha)$ ile verilen anlamlı bir enerji değerine sahip olur.

Bu süreç saçılan fotonun bir salınımını gerektirdiği için gelen fotonunun toplam enerjisi ilk etkileşme bölgesinde depo edilmiş değildir. Foton enerjisinin tümünü izlemek için saçılan foton ve bunun neden olduğu etkileşmeler izlenmelidir. Yüksek birkaç MeV enerjili bir foton, fotoelektrik soğurma olayı gerçekleşmeden önce her bir adımda saçılan fotonun enerjisi azalmak koşulu ile bir dizi Compton saçılması yapar. Bu yüzden gelen fotonun enerjisi malzemenin önemli bir hacmi içinde dağılabilir.

Bu süreçte bir foton demetinin enerjisi bilinirse, herhangi bir θ açısı boyunca saçılacak fotonun olasılığını belirlenebilir. Bu olasılığın analitik ifadesi Klein-Nishina

formülü olarak bilinir [4]. Bu olasılık aynı zamanda saçılan gama ışınlarının açısal dağılımı olarak ta bilinir ve bu açısal dağılım $d\sigma/d\Omega$ diferansiyel saçılma tesir kesiti için Klein-Nishina formülü ile öngörülür [3]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right) \quad (7)$$

burada r_0 klasik elektron yarıçapıdır. Compton saçılması etkileşmesinin bir ölçüsü olan toplam Compton saçılması tesir kesitinin Z ve E 'ye bağlılığı yaklaşık olarak

$$\sigma = \text{sabit} \cdot Z \cdot E^{-1} \quad (8)$$

Compton saçılmasının lineer azaltma katsayısı [1]

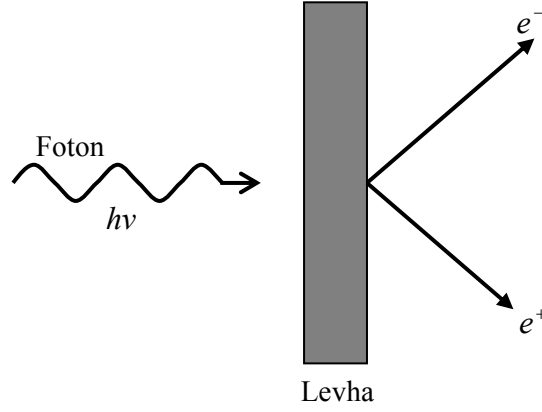
$$\mu_\sigma = \frac{\sigma \cdot \rho \cdot N_A}{M} \quad (9)$$

ile verilir.

1.3.3. Çift Oluşumu

Birkaç MeV'lik enerjiye sahip gama ışınları için çift üretimi önde gelen etkileşme mekanizmasıdır. Bu süreçte bir fotonun enerjisi nükleer Coulomb alanında pozitron–elektron çiftine dönüşür (bakınız Şekil 3). Bu nedenle fotonun enerjisi elektronun durgun kütlesine karşılık gelen enerjinin iki katından daha büyük olmak zorundadır (≥ 1022 keV). Artık enerji

$$E_{\text{artık}} = E_\gamma - 2 \cdot m_0 c^2 \quad (10)$$



Şekil 3. Çift oluşumu

ile verilir ve kinetik enerji olarak iki parçacık arasında paylaşılır. Hem elektronun hem de pozitronun enerjisi hareket ettikleri ortamda azalır. Sonunda pozitron elektronla reaksiyona girer ve yok olur. Bu süreç pozitronun kinetik enerjisi tamamen kaybedildikten hemen sonra vuku bulursa $m_0c^2 = 511$ keV civarında enerjiye sahip iki foton üretir. Momentumun korunması için bu iki foton hemen hemen zıt yönlerde yayımlanır. Elektron bir atoma daha gevşek bağlanacağı için enerjisinin küçük bir kısmı momentum ile birlikte atoma transfer edilir. Bu enerji kaybının bir sonucu olarak iki fotonun enerjisi m_0c^2 'dan biraz küçük olur [1].

Compton saçılmasında olduğu gibi gelen fotonunun enerjisi ilk etkileşme bölgesinde depo edilmez. Elektron–pozitron çiftinin kinetik enerjisi bu bölgede soğrulur, fakat 511 keV'lik enerjiye sahip her foton Compton saçılması ya da fotoelektrik soğurmanın olduğu diğer bölgelere enerjisini taşır. Bu süreçte tesir kesiti hesaplamaları yaklaşık Z ve Z^2 arasında değişim gösterir. Çift üretimi için lineer azaltma katsayısı [1]

$$\mu_k = \frac{\kappa \cdot \rho \cdot N_A}{M} \quad (11)$$

ile verilir.

1.3.4. Koherent Saçılma

Compton saçılmasına ek olarak saçılmanın diğer bir türü soğurucu atomun tüm elektronları ile tutarlı olarak etkileşen gama ışını fotonunun bulunduğu durumda oluşabilir. Bu etkileşme türü koherent saçılma ya da Rayleigh saçılması olarak bilinir. Koherent saçılmada atom ne iyonize olur ne de uyarılır ve bu nedenle gama ışını fotonu saçılma olayından sonra ilk enerjisini korur. Fotonun hemen hemen hiçbir enerjisi transfer edilmediğinden bu süreç gama ışını etkileşmelerinin temel tartışmasında sıklıkla göz ardı edilir. Bununla birlikte koherent saçılmada fotonun yönü değişir ve gama ışını taşınımının tam modellerinde bu etkileşme dikkate alınmalıdır. Koherent saçılma olasılığı yalnızca düşük foton enerjileri için önemlidir (birkaç yüz keV'lik enerjilerde) ve yüksek Z 'li soğurucularda ön plandadır. Ortalama sapma açısı artan enerji ile azalır [3].

1.3.5. Foton Soğrulması

Belli bir enerjiye sahip fotonlar Z atom numaralı bir maddeyle etkileştiğinde bu fotonların bir kısmı maddenin diğer tarafına geçerken bir kısmı ise soğurulur. Bu soğurma olayı fotonların soğurucu maddenin atomları ile etkileşmesi sonucu oluşur ve genellikle iki farklı yolla gerçekleşir.

a) Gerçek soğurma (fotoelektrik soğurma); fotonların atomlarla etkileşmesi sonucu elektronik geçişlere sebep olması ile gerçekleşir.

b) Fotonların atomlardan saçılması ile gerçekleşen soğurma; Saçılan fotonlar, gelen fotona oranla daha uzun dalga boyuna (inkoherent saçılma) veya aynı dalga boyuna sahip olur (koherent saçılma).

Bu etkiler dikkate alındığında toplam soğurma katsayısının,

$$\mu = \mu_{\tau} + \mu_{\sigma} + \mu_{\kappa} \quad (12)$$

olması gerektiği görülmektedir. Burada μ_{τ} fotoelektrik soğurma katsayısı, μ_{σ} ise Compton saçılması soğurma katsayısı ve μ_{κ} ise çift üretimi soğurma katsayısıdır. 0,1 keV - 100 keV aralığında fotoelektrik soğurma katsayısı, saçılma soğurma katsayısından çok daha büyüktür ve toplam soğurma katsayısına katkısı % 95'in üzerindedir. Bundan dolayı

bu enerji aralığında yapılan deneylerde elde edilen fotoelektrik soğurma katsayısı sonuçları toplam soğurmayı yeteri kadar yansıtmaktadır. Magnezyum elementinin kütle soğurma katsayısının dalga boyu ile değişimini gösteren grafik Şekil 1’de verilmektedir. Grafikte, yukarıda bahsettiğimiz enerji aralığına karşılık gelen dalga boylarında toplam soğurmaya fotoelektrik etkinin ve saçılmanın katkıları görülmektedir [5].

Soğurma olayı ilk kez Röntgen tarafından izah edilmiştir. Buna göre, I_0 şiddetli bir fotonun (x-ışını, γ -ışını, vs.) soğurucu bir maddenin dx kalınlığında sonsuz ince bir tabakasından geçerken şiddetinde dI kadar bir azalma olur ve bu azalma soğurucunun kalınlığı ile orantılıdır.

$$dI \propto (-I dx) \quad (13)$$

$$dI = -\mu I dx \quad (14)$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (15)$$

Burada μ (cm^{-1}) lineer soğurma katsayısıdır ve birim kalınlık başına düşen enerji soğurma kesri olarak tanımlanır. Lineer soğurma katsayısı, soğurucunun atom numarasına ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Denklem (15)’in sonlu bir x kalınlığı üzerinden integralini alınırsa,

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx \quad (16)$$

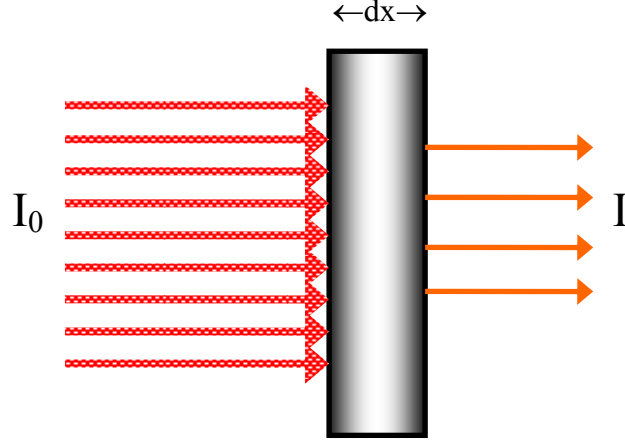
$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (17)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (18)$$

Lambert Beer yasası olarak bilinen ifade elde edilmiş olur. Buradan da lineer soğurma katsayısı,

$$\mu = x^{-1} \ln(I_0 / I) \quad (19)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4. Elektromanyetik radyasyonun dx kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması

Fotonların soğurulmasında soğurucu ortamın kalınlığının yanı sıra yoğunluğu da soğurmanın bir ölçüsüdür. Örneğin sıvı cıvanın 1 mm uzunluğunda x-ışınının soğurulması, buhar halindeki cıvadaki (aynı mesafe için) soğurulmadan çok daha büyüktür. Bu nedenle soğurucu maddeyi onun yoğunluğundan bağımsız olan kütle soğurma katsayısı ile belirtmek daha faydalı olur. O halde denklem (18)'i yeniden düzenleyebiliriz:

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho \cdot x} \quad (20)$$

Burada μ/ρ kütle soğurma katsayısı (cm^2/g) olarak adlandırılırken, $\rho \cdot x$ ifadesi ise soğurucunun yüzey yoğunluğudur ($d = \rho x$). Bu ifadeleri denklem (20)'de yerine yazarsak,

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho) \cdot d} \quad (21)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (21)'i yeniden düzenlersek, kütle soğurma katsayısı için,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (22)$$

ifadesini elde etmiş oluruz.

Bazen bir elementten daha fazla element içeren bir maddenin kütle soğurma katsayısını bilmemiz gerekir. Bu madde bir karışım, çözelti veya bileşik olabilir. O zaman maddenin kütle soğurma katsayısı,

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (23)$$

şeklinde olur. Burada w_i maddeyi oluşturan her bir elementin ağırlık kesri, $(\mu/\rho)_i$ ise her bir elementin kütle soğurma katsayısıdır [5]. Ayrıca gama ışını fotonları herhangi bir etkileşme yapmadan önce soğurucuda seyahat edebileceği ortalama uzaklık olarak tanımlanan λ ortalama serbest yolla da karakterize edilebilir [3]:

$$\lambda = \frac{\int_0^x x e^{-\mu x} dx}{\int_0^x e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (24)$$

1.4. Detektörler

Elektromanyetik radyasyonun her bir enerji bölgesi için spektrometre gelişimi deneysel araçların gelişimine paralel olarak ilerledi. İlk ve kaba detektörler genellikle radyasyonun varlığını belirlemede kullanıldı. İkinci nesil detektörler ise radyasyonun enerji bilgisinin çok az bir kısmını vermekle birlikte radyasyon şiddetini belirlemede kullanıldı. Son tür detektörler ise radyasyon varlığını ve şiddetini belirleme yanında şiddeti foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak verme noktasına geldi.

Fotografik levhalar ile ilk x ve gama-ışınlarının gözlenmesinden sonra bu alandaki ölçme ile ilgili gelişmeler 1908 yılların başında gaz dolu sayıcılarının değişik tiplerinin geliştirilmesi ile başladı [6]. Fotografik belirleme süreci ile karşılaştırıldığında bu sayıcılar, deneycilere radyasyonun varlığını belirlemenin yanı sıra radyasyonun çok daha doğru nicelik ölçümlerini elde etmelerine imkân verdi. Orantılı sayıcılar ikincil elektronları üretecek kadar enerjiye sahip x ve gama-ışınlarının fotoelektrik etki ile ürettiği ikincil elektron etkileşmelerinin gaz hacmi içinde tamamen durdurulması esasına dayalı olarak enerji spektrumu elde edilmesini sağladı. Bununla birlikte genel olarak bu detektörler

yalnızca sayıcıda oluşan olayların sayısını ölçmede kullanılırken gerekli foton enerjilerini doğrudan belirlemede kullanılamaz [1].

X ve gama-ışınlarının nicelik belirlemede ana gelişme 1948 yılında NaI(Tl) detektörlerinin geliştirilmesi ile başladı. Bu detektörler geniş bir enerji aralığı üzerinde enerji spektrumu sağlayabilir. Belli bir gelişme periyodundan sonra 1 MeV'in üzerinde fotonların yüksek soğurma oranlarına imkân veren yeteri kadar büyük alan içeren kristallere sahip detektörler üretildi. Bu detektörlerin en önemli avantajları bağıl olarak iyi bir çözünürlükleri, kullanılan kristal malzemesinin fiziksel ve kimyasal durağanlığı ve bağıl yüksek verime sahip olmalarıdır. Bu detektörlerin iyi bir çözünürlüğe sahip olması foton enerjileri iyi bir şekilde ayrıldığında ayrı foton piklerinin gözlenebilmesine imkân sağladı [1].

1962 yılında yarıiletken Ge(Li) detektörleri üretildi [7]. Bu detektörlerin ilk başarısı çok farklı yarıiletken malzemelerden yapılabildiği için nükleer parçacık detektörleri yanı sıra foton detektörleri olarak da kullanılmasıydı. İkincil yükleri verimli olarak toplayabilmek için bu detektörler saf malzemelerin tekli kristallerinden yapılmalıdır. Germanyum ve silisyumun dışındaki diğer tek kristallerin üretimindeki zorluklardan dolayı bu detektörler, önemli boyuttaki yüksek çözünürlüklü foton detektörleri olarak şimdiye kadar başarılı şekilde kullanılmaktadır. Germanyum detektörler geniş enerji aralığında kullanılıyorken silisyum detektörler düşük atom numarasından dolayı düşük enerjili fotonlar için kullanılır. Bu detektörler yüksek çözünürlüğe sahiptirler. Birçok durumda yarıiletken detektörlerin en ciddi dezavantajı genel olarak sıvı azot sıcaklığında tutulma ihtiyacı gerektirmesidir.

İlerleyen yıllarda yüksek Z malzemeli benzer detektörlerin geliştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Mayer [8] birkaç iki-elemanlı malzemedan yapılan detektörler önerdi. Sakai [9] oda sıcaklığında ölçümleri yerine getirecek yarıiletken detektörler olarak GaAs, CdTe ve HgI₂ gibi malzemeler için birkaç çalışma yaptı. Bu detektörlerin kullanışsızlığı küçük alandan dolayı bağıl verimin düşüklüğü, çözünürlük düşüklüğü ve ticari olarak üretim yöntem ve tekniklerinin pahalı olması olarak sayılabilir.

Bunlardan sonra gama spektrometresi için ideal bir detektörün özellikleri şu şekilde ifade edilebilir [2]:

- 1) Çıkan puls sayısı, gama ışını enerjisiyle orantılı olmalıdır,
- 2) İyi bir verime sahip olmalı (yani yüksek soğurma katsayılı olmalı),
- 3) Detektör sinyallerini toplamak için kolay bir mekanizmaya sahip olmalıdır,

- 4) İyi bir enerji ayırımına sahip olmalıdır,
- 5) Zaman, sıcaklık ve işlem değişkenleri üzerinde dengeli olmalıdır,
- 6) Makul bir masrafa haiz olmalı,
- 7) Makul bir hacme sahip olmalıdır.

1.4.1. Foton Detektörlerinin Genel Özellikleri

Modern foton detektörleri radyasyon belirlenmesi ve niceliğini ölçme işlemlerinde müşterek adımların bir serisine dayalı olarak çalışır. Bu adımlar hemen hemen tüm detektörlerde aynıdır. Bu kısımda gaz detektörlerini, NaI(Tl) ışıldama detektörleri ve Ge(Li), HP (yüksek saflıklı) Ge ve Si(Li) yarıiletken detektörlerinin bazı özellikleri ifade edilmektedir. Bu detektörlerin birçoğu elektronları ve ağır yüklü parçacıkları sayar fakat biz bu tartışmayı foton detektörleri olarak kullanılanlarla sınırlandıracağız. Bu foton detektörlerinin çalışması bir takım şartları gerektirir [1]. Bunlar

- a) Fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ya da çift üretimi ile elektronların (veya pozitronların) kinetik enerjisi foton enerjisine dönüştürülür;
- b) Bu elektronlarla elektron-iyon çifti, elektron-delik çifti veya uyarılmış molekül durumları üretilir;
- c) Moleküler durumların taban duruma dönmesiyle yük taşıyıcılarının ya da yayınlanan ışıkların ölçülmesi ve toplanması şeklinde sıralanabilir.

Bir kaynak tarafından yayımlanan bir foton spektrumu her biri monoenerjik olan foton gruplarından oluşur. Detektör bu tür spektrumlarını çizgi ve sürekli bileşenlerin bir bileşimine çevirir. Çizgiler gözlemlendiği sürece detektörler asıl fotonların enerjilerini ve şiddetlerini belirlemede kullanılabilir. Fakat çizgiler bağlı süreklilikte kaybolursa bu nicelikleri belirlemek mümkün değildir. Monoenerjik fotonların üretilen çizgi veya pikleri için detektör özelliği pik genişliği ve pik verimi ile karakterize edilir. Pik genişliği genelde keV cinsinden FWHM olarak ifade edilse de ayırma gücü olarak da ifade edilebilir. Detektörün pik verimi ise, kaynak tarafından yayımlanan enerjiye sahip fotonları sayısının foton enerjisinin tümüne karşılık gelen pikteki (ki buna tam-enerji piki de denir) saymaların sayısına oranıdır [1].

Yukarıda verilen üç süreçten ilkinde detektör malzemesinin yoğunluğu, atom sayısı ve hacmi önemlidir. Eğer detektör malzemesi düşük yoğunluklu, düşük Z 'li ve küçük hacimli ise etkileşen foton sayısı düşük olacaktır ve etkileşme gerçekleşirse detektördeki

foton enerjisinin tümünü alıkoyan olasılık düşük olacaktır. Bu yüzden bir çizgi spektrumunu ölçmede kullanılan böylesi bir detektör düşük enerji fotonlarını ölçmekle sınırlandırılmış olur. Yüksek enerji foton durumunda monoenerjik çizgi kaybolur ve yalnızca süreklilik gözlenir.

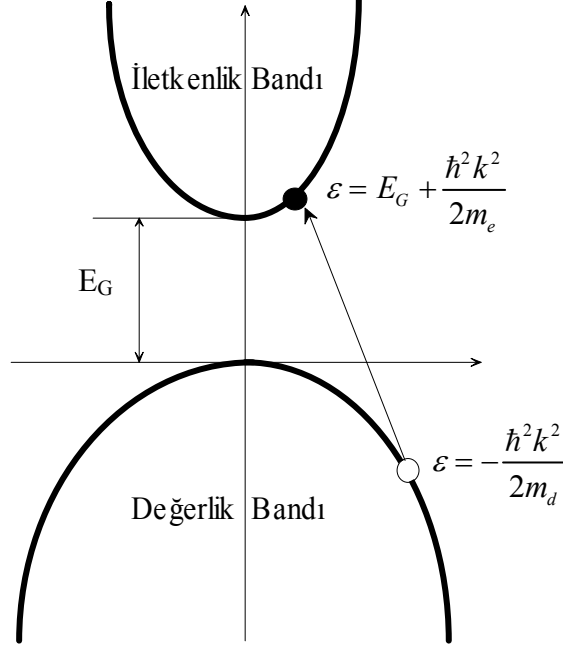
1.4.2. Yarıiletken Detektörlerde Fiziksel Süreçler

Serbest bir atomda elektronlar enerji değerleri bilinen seviyelere yerleşir. Katı bir yapı içinde atomların bir araya toplaması, elektronların sabit bir sayısını içeren her bir enerji bandları içindeki bu enerji seviyelerini birbirinden ayırır. Bu bandlar arasında elektronların bulunmadığı enerji bölgeleri vardır. Kimyasal etkileşmelerden sorumlu elektronlar tarafından işgal edilen en üst enerji bandı valans bandı olarak bilinir. Malzeme içinde elektronların hareketi bir atom diğer bir atoma hareket etmesi elektronun ilk bulunduğu enerji durumundan diğer bir enerji durumuna geçmesiyle mümkün olabilir. Eğer elektronlar uygun enerji seviyelerine geçebilirse malzemeye uygulanan bir dış elektrik alanla bir akım akısı oluşturulur. Tam dolu olan valans bandından sonraki ve yasak bir bölge ile valans bandından ayrılan daha yüksek enerji bandı iletkenlik bandı olarak bilinir. Valans ve iletkenlik bandı arasındaki bu yasak bölgenin genişliği yalıtkanlarda 10 eV civarında iken yarıiletkenlerde 2–3 eV civarındadır ve bu genişlik band genişliği olarak bilinir.

Silisyum veya germanyum gibi yarıiletken malzemenin, tekli kristalinde çok keskin olarak tanımlanan atomik elektron durumunun bütün bir kristal karakteristiği olan enerji bandı geniştir. Uyarı olmadığında en dış elektronlar değerlik bandı olarak adlandırılan enerji bandına bağlıdır. Buna yakın en yüksek durum, band genişliği olarak bilinen bir enerji ile değerlik (valans) bandından ayrılan iletkenlik bandında olmasıdır (bakınız Şekil 5). Safsızlığın yokluğunda band genişliği izinli olmayan enerji durumu içerir [1].

Bir elektron en azından band genişliğine eşit bir enerjinin kendine verilmesiyle değerlik bandından iletkenlik bandına geçer. Bu elektron iletkenlik bandında iken uygulanan dış bir elektrik alanın etkisi altında taşınarak serbest hale gelir. Elektronun uyarılmasıyla oluşan değerlilik bandındaki delik ya da boşluk elektronun hareketine zıt bir yönde elektron hareketi mekanizmasıyla yer değiştirebilir. Delik ve elektronların hareket mekanizmaları farklı olduğu için kristal boyunca hareket eden iki yükün hızları da

(mobiliteleri) farklıdır. Elektron ve delik yüklerinin her ikisi bir puls biçiminde toplanır ve bu puls biçimleri farklı mobiliteleri yansıtır [1].



Şekil 5. Değerlik bandının tepesine ve iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları

Bir foton kristalle etkileştiği zaman sınır elektronları etkileşimin birincil elektronları ile iletkenlik bandına uyarılır. Bu ikinci elektronlar yeteri kadar enerji iseler ek ikincil elektronlar oluşturulabilir. Bu ardışık etkileşme süreci boyunca, birincil elektronların enerjisi, elektrotlarda toplanabilen serbest birçok elektron–delik çiftlerinin üretilmesinde harcanır. Bu yükleri toplamak için yaklaşık 1000 V/cm’lik elektrik alana ihtiyaç vardır. Bu nedenle de detektör üreticileri her bir detektör için genel olarak bir başlangıç (bias) voltajı önerir. Bu voltaj, voltaj bozulma olasılığını minimize edecek kadar düşük fakat iyi yük toplama sağlayacak kadar yüksek olmalıdır. Böylelikle iyi bir pik biçimi sağlanabilir.

Yarıiletkenlerde toplam akım iletkenlik bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki deliklerden ileri gelen katkıların toplamı olarak yazılabilir. Bu nedenle yarıiletkenlerdeki elektron ve deliklere yük taşıyıcıları denir. Saf bir yarıiletkende ya da özden yarıiletkende elektron ve delik yoğunlaşmaları (konsantrasyonları) eşittir. Yani değerlik bandındaki bir delik sadece bir elektronun iletkenlik bandına uyarılmasıyla

oluşturulur. Aynı zamanda böylesi yarıiletkenlerde Fermi düzeyi bant aralığının hemen hemen ortasındadır [10].

Alıcılar ve vericiler varken kimyasal potansiyel elektronların toplam sayısının doğru olması gerekliliği ile belirlenir. Bunun için de kristal elektriksel olarak nötr yapılmalıdır. Elektriksel nötrlük için koşul yarı iletken içinde bulunan iletkenlik bandındaki elektronlar, değerlik bandındaki delikler ve iyonlaşmış alıcı ve verici safsızlıklara eşlik eden negatif ve pozitif yük yoğunluklarının eşit olmasıdır. Verici safsızlıkların baskın olduğu ve elektronların sayısının deliklerin sayısını aştığı durumdaki malzemelere “n-tipi malzemeler” denir. Bu malzemelerde elektronlar çoğunluk taşıyıcıları ve delikler azınlık taşıyıcıları olarak adlandırılır. Tamamen benzer biçimde yukarıdaki ifadelerin tersi durumunda yani deliklerin çoğunluk taşıyıcı oldukları durumdaki malzemeye “p-tipi malzeme” denir [10].

Foton etkileşmeleriyle iletkenlik bandına uyarılan elektronlara ek olarak, termal yolla uyarılan elektronlarda vardır. Uyarılmanın bu modu istatistiksel gürültü olarak adlandırılan tabii fon (background) oluşturur. Bu gürültüyü minimize edebilmek için yarıiletken foton detektörleri düşük sıcaklıklarda çalışmalıdır. Kabul edilebilir çalışmada en yüksek sıcaklık yarıiletkenin türüne, kristal safsızlıklarının bolluğuna ve kristal kusurlarına bağlıdır.

Gama ışını detektörleri kontaklara farklı yarıiletken materyal türlerinin yerleştirilmesiyle oluşturulamaz. Bunun yerine germanyum ya da silisyumun bir kenarına özellikleri zıt bir yarıiletken materyalin buharlaştırılması ve difüzyonu veya iyon implantasyonu (aşılması) yapılabilir.

Tüm bu ifadelerden sonra ideal bir yarıiletken detektör malzemeleri şu özellikleri sağlamalıdır [2]:

- 1) Mümkün olduğu kadar büyük bir soğurma katsayısına sahip olmalıdır (yani yüksek atom sayısına),
- 2) Birim enerji başına mümkün olduğunca çok elektron-delik çifti üretebilmelidir,
- 3) İyi bir elektron ve delik hareketliliği sağlamalıdır,
- 4) Hemen hemen mükemmel tek kristal gibi yüksek saflığa sahip olmalıdır.

1.4.3. Puls Genişliği Üzerine Detektör Etkisi

Gama ışınları detektör kristalleri ile etkileşerek yük taşıyıcılarını (elektron-delik çifti) oluşturur ve bu oluşturulan bu yükler detektöre uygulan elektrik alanla bir birine zıt yönde

hareket ettirilerek kristalin her iki ucuna (kontaklara) yönlendirilir. Kontaklara ulaşan bu yükler bir elektrik akımı oluşturur. Bu yük taşıyıcılarının oluşturuldukları noktalardan kontaklara ulaşması için geçen süre yük toplama zamanı olarak ifade edilir. Yük toplama zamanı yük taşıyıcıların oluşturuldukları noktalardan kontaklara olan uzaklığa ve bu yüklerin hızına (mobilitesine) bağlıdır. Elektron ve delik yük taşıyıcılarının yük toplama zamanları birbirinden farklıdır. Elektron-delik çifti başına toplanan toplam yük tuzaklanma ve tuzaklanmadan kurtulduktan sonra bu yüklerin tekrar birleşmesi göz ardı edildiğinde sabittir ve bir elektron tarafından taşınan yüke eşdeğerdir. Detektör puls şekli ve yük toplama zamanı puls işleme elektronuğu kurgusunda önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle tuzaklanma ile artan uzun toplama zamanı sayma oranları için önemli bir probleme sahiptir [2].

Bir yükseltici pulsunun genliği ya da bir gama pikinin eşdeğer konumu başlıca gama ışınlarının enerjisine ve elektronik sistemin kazancına bağlıdır. Fakat aynı zamanda bu kristaldeki etkileşmelerin ayrıntılarındaki küçük bir boyuta da bağlıdır. Bu konuyla ilgili literatürde iki etki tanımlanmıştır. İlki detektördeki elektrik alanının doğrudan bir sonucudur ve bu yüzden bu ilk etki alan-artışı etkisi olarak adlandırılır [11, 12]. İkinci etki detektör aktif hacmi üzerinde yük toplamanın değişmesinin bir sonucudur [13].

Düzlemsel bir detektörün basit geometrisi için alan-artışı etkisini düşünelim. Fotoelektrik ya da Compton süreciyle detektör aktif hacminde etkileşen gama ışınlarıyla oluşan enerjik birincil elektronlar bir puls üretmek için toplanan elektron-delik çiftleri oluşturur. Birincil elektronların enerjisi detektörün elektrik alanında hızlanarak veya yavaşlayarak azaldığı ya da arttığı için puls genliği de artar ya da azalır. Elektronların kinetik enerjisindeki değişimin ortalama değeri, detektörün elektrik alanının yönü ile ilişkili olan elektron yolunun ortalama yönüne bağlıdır. Birincil elektronların açılal dağılımı birkaç yüz keV'lik düşük foton enerjileri için yaklaşık olarak eş yönlü (izotropik) olmasına rağmen dağılımlar gelen gama ışınlarının yönünde pikleşir. Bu yüzden negatif voltaj kontağına doğru, düzlemsel bir detektöre giren yüksek enerjili gama ışınları için ortalama detektör ön gerilimi (bias gerilimi) birincil elektronların enerjisi ile artar. Alan-artışı etkisi, çift üretimi etkileşmesinin gerçekleşmesi için gerekli minimum 1022 keV üzerindeki gama enerjileri için farklıdır [11, 12]. Birincil elektronlar ve pozitronlar, özdeş olmamalarına rağmen aynı seyahat yönü, erişim, açılal dağılım ve enerji dağılımına sahip oldukları için bu iki parçacığın hızı hemen hemen bir birine zıttır. Öyle ki bu durumda net etki fotoelektrik ve Compton etkileşimi için oluşandan daha küçük olmalıdır [1]. Yük

toplama değişimi etkisi, elektrik alanın r^{-1} ile değişiminden kaynaklanan elektron ve delik tuzaklanmalarının beklenen değişimden ileri gelir.

1.4.4. Detektör Özellikleri

1.4.4.1. Ayırma Gücü (Rezolüsyon-FWHM)

Ayırma gücü ya da tek enerjili fotonların belirli bir grubunun sürekli spektral arka planının üstündeki maksimumun yarısında pikin tam genişliği, genel olarak detektörün faydalı enerji aralığı için tipik enerjileri tanımlar. Yani bir detektörün ayırma gücü tam enerji pikinin genişliğidir. Spektrumda idealleştirilmiş bir pikin gösterimi ve şekli iyi kurgulanmış bir sistemde analitik bir σ değişkeni ile birlikte Gaussian biçimlidir. Gaussian denklemi [2];

$$C = \frac{A}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{-(E-E_0)^2/2\sigma^2} \quad (25)$$

ile verilir. Burada A pik alanı, C sayma, E enerji veya kanal sayısı, E_0 karakteristik çizgi enerjisi ya da kanalı ve σ dağılımının standart sapması veya genişlik değişkeni olarak ifade edilir. Spektroskopide ayırma gücü değişkeni olarak yarı maksimumdaki tam genişlik ya da FWHM kullanılır.

Ayrıca analizler için bu ifadeden net pik alanını belirleme işlemleri de yapılabilir. Bu enerjiler;

- Si(Li), düzlemsel ve n-tipi Ge detektörler için 5.9 keV (^{55}Fe kaynağının Mn K X-ışınları),
- Düzlemsel ve n-tipi Ge detektörleri için 122 keV (^{57}Co gama ışınları),
- Kuaksiyel Ge ve Ge(Li) detektörler için 1332 keV (^{60}Co gama ışınları).

1.4.4.2. Verim ve Boyut

Detektörün hacmi veya boyutu detektörün geometrisine bağlı farklı yollarla belirlenir. Düzlemsel detektörler için bu boyut, detektörün duyarlılık kalınlığı ve çapından

biraz farklı olabilen gerçek kalınlığı ve çapı ile belirlenir. Bu durumda detektör kalınlığı, keskin bir şekilde azalmaya başladığı verimin ötesindeki enerjilerde doğrudan etkilendiği için birincil önemdedir. Çap, verilen kaynak mesafesinde ayırma gücünü ve verimi etkiler [1].

Büyük detektörler için hacim, genel olarak 7.62 cm×7.62 cm NaI(Tl) detektörün bağıl detektör verimine göre ifade edilir. Bir NaI(Tl) detektörü cinsinden verimi vermek genel kabul görmüş bir durumdur. Bu bağıl nicelik gerçek detektör hacmi ile eşsiz olarak ilişkili olmamasına rağmen bağıl bir verim ifadesinin bu uygulaması, detektörün duyarlılık hacmi ve toplam hacmi arasındaki ilişki ile ilgili herhangi bir soruyu gidermede avantaja sahiptir.

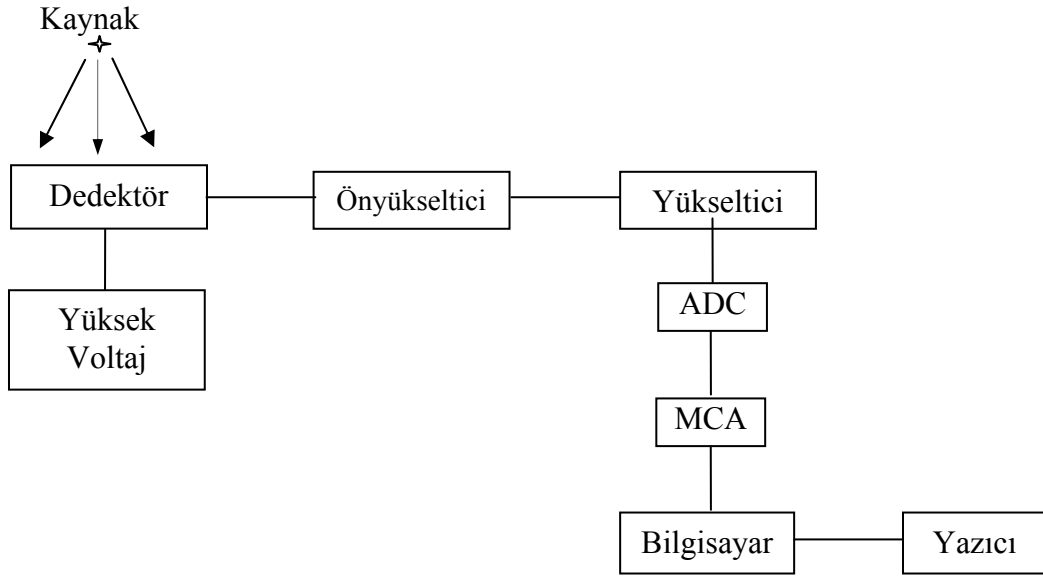
Eğer üreticiler bazı standart ölçüm geometrileri için tüm verim eğrilerini ifade ederlerse kullanıcılara iyi bir hizmet sunmuş olurlar. Bunun yerine üreticiler, çeşitli detektör tipleri için eğrilerin tipiksel biçimlerini sunduklarında kendilerini sınırlamış olurlar [1].

1.4.4.3. Pik-Compton Oranı

Bu oran hem detektör ayırma gücünün hem de detektör tam enerji pik veriminin ana elemanıdır. Bu oran bir ANSI/IEEE standardı olarak tanımlanır ve 1332 keV'deki pikin maksimum büyüklüğü ve 1040 ve 1096 keV arasında enerjilere sahip bir ⁶⁰Co kaynağının Compton dağılımının ortalama büyüklüğü arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu oran detektör hacminin artması (daha çok Compton saçılmasının uğrayan fotonlar soğurulur ve tam-enerji pikine katkı yapar) ve gelişen ayırma gücü ile artar (pikler daha çok yaklaşır ve bu yüzden daha da yükselir). Bu oran sinyal-gürültü oranının bir benzeridir.

1.5. Elektronikler

Gama ışını detektöründen çıkan pulsun büyüklüğü detektör tarafından soğurulan gama ışını enerjisinin miktarı ile orantılı elektriksel yüke eşittir. Elektronik sistemin işlevi bu yükleri toplamak, miktarını ölçmek ve bilgiyi depolamaktır. Yarıiletken detektörden oluşan spektrometre için elektronik sistem aşağıdaki şekilde şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 6. Gama spektrometresi blok şeması

Sistem; detektör güç sağlayıcısı, detektör, ön yükseltici, yükseltici, analog dijital çevirici (ADC), veri depolama aygıtı (MCA), bilgisayar (spektrum analiz programı) ve eğer şayet istenirse yazıcı ve puls üreticiden oluşur. Genel olarak puls üretici, yükseltici temel miktar ölçücü (base line restorer) ve yığılma pulsu reddedici (pile-up rejector) gibi fonksiyonlara sahip elektronik devre içermezse kullanılır. Ön gerilim sağlayıcısı ön yükseltici tarafından toplanacak olan elektron delik çiftlerini detektör kontaklarına süpürmek için gerekli olan elektrik alanı sağlar. Burada toplanan yükler bir voltaj pulsuna FET ile birlikte çevrilir. Lineer yükseltici puls şeklini değiştirir ve bu şekil gelen pulsun büyüklüğü ile artar. Çok kanallı analizör pulsları yüksekliğine göre sıralar ve bireysel puls yüksekliği aralıkları içinde pulsların sayısını sayar. Modern gama ve x ışını spektrometrelerinde ölçümü kontrol etmek ve sonuç spektrumunu kaydetmek için bilgisayar kullanılır. Bu tür sistemlerin avantajı ölçüm boyunca ve ölçmeden sonra çeşitli veri-analiz hesaplamalarını yerine getirmede kullanıcılara büyük kolaylıklar sağlamasıdır. Ölçme süresince ekranda kullanılan bir program vasıtasıyla ilgilenilen pikin konumu ve alanı belirlenebilir ve böylece saymaların toplanma oranı yanı sıra iyi bir enerji kalibrasyonu ile de çekirdeğin ne olduğu belirlenebilir.

1.5.1. Detektör Güç Sağlayıcıları

Detektörde biçimlenen yüklerin toplanması için bir güç voltajı (ön gerilim) detektöre uygulanmalıdır. En uygun güç voltajı detektör üreticileri tarafından belirlenir ve bu güç voltajı küçük boyutlu detektörler için birkaç yüz volttan, büyük boyutlu detektörler için 4000 voltun üzerine çıkabilir. Bu voltaj, puls şeklini bozma veya kavislendirmeden kaçmak için yeteri miktarda düşük ve yük toplama artan voltaj ile iyileştiğinden mümkün olduğunca da yüksek seçilmelidir. Güç voltajı detektörde aynı voltaj grandyentini koruma ve böylece de aynı yük toplama karakteristiği için sabit olmalıdır [1].

1.5.2. Ön Yükseltici

Gama ışımına maruz bırakılan detektörün kristalinde üretilen yükler ön yükseltici tarafından toplanır. İsmine rağmen ön yükselticiler pulsun yüksekliğini artırmaz fakat yükseltici ile detektör arasında bir ara yüz elektronik devredir. Ön yükselticiler kabaca üçe ayrılır: akım duyarlı, voltaj duyarlı ve yük duyarlı [2]. Modern yarıiletken detektörlerden oluşan sistemlerde yük duyarlı ön yükseltici kullanılır ve bunlar detektör sisteminde yük toplayıcı olarak iş görür. Ön yükselticinin giriş adımı olarak alan-etkili transistor (FET) kullanılır ve bunlar elektronik gürültüyü en aza indirmek için detektörle birlikte soğutulur. Ön yükselticinin performansını en iyi hale getirme, bu giriş aşamasındaki sıcaklığın oda sıcaklığında muhafaza edilen detektörden gelen izinli birtakım ısı iletimleriyle detektörden daha sıcak olmasıyla sağlanır.

Modern spektrometre sistemlerinde ön yükselticiler soğutulur. Vakum içinde mekaniksel montaj önemlidir ve bileşenler detektörün soğutulmasında sıcaklık değişimleriyle strese sokulmamalıdır fakat aynı zamanda yük hareketi de serbest bırakılmamalıdır. Her hangi bir hareket çeşitli bileşenlerin kapasitansında değişmelere neden olabilir ve detektörün karakteristiği değişebilir. Ayrıca iç titreşim ile oluşturulan hareket ön yükseltici çıkışında mikrofonik gürültüyle sonuçlanabilir.

Ön yükseltici bir geri besleme devresi içerir. Bu geri besleme fonksiyonu genel olarak dirençli şebeke (devre) ile yerine getirilir. Özellikle Si-detektör sistemlerinde pulslanmış-optik geri besleme olarak bilinen başka bir yöntem de kullanılır. Bu yöntemde sistemin çıkışında voltaj seviyesi her bir puls işlemi için artmaya izinlidir. Bu voltaj bir

eşik değerinin ötesinde arttığında bu voltaj optik bir sinyal ile düşük bir değere yeniden ayarlanır. Büyük geri alma pulsu yükselticide fazla yüklenir ve yasak puls yükselticinin geri alma zamanı boyunca analiz edilen pulslardan bu pulsu ayırmak için analog dijital çeviriciye gönderilir. Bu sıfırlama sürecinden dolayı eşik değeri geçen voltaja neden olan puls reddedilir. Dirençli-geri besleme sisteminin avantajı sıfırlanmaması gereken bir pulsla uğraşılmamasıdır. Buna karşın optiksel-geri besleme sisteminin avantajı geri besleme direncinde yapılamayan düşük frekanslı gürültünün azaltılması ile daha iyi çözünürlüğü sağlamasıdır [2].

Ön yükselticiden çıkan pulsun genliği ya da yüksekliği detektörde toplanan yükün miktarıyla orantılı olmalıdır. Foton enerjisinin tümü detektörde soğrulursa ön yükselticiden çıkan bu puls bu enerjiyle orantılıdır.

1.5.3. Yükseltici

Geleneksel dirençli-geri beslemeli ön yükselticilerden gelen çok keskin pikleşen pulsların yüksekliğini direkt ölçmek uygun değildir. Herhangi bir yığılma pulsu durumu düşük sayma oranlarından daha ziyade orta ve yüksek sayma oranlı durumlarda kaçılmaz olarak vardır. Bu durumdan kurtulma ancak elektronik filtreleme ile yerine getirilir ve bu da puls şekillenmesine işaret eder. Puls şekillenmesi yükselticinin ana görevlerinden biridir. Yarıiletken detektörlü spektrometre yükselticilerin önemli karakteristikleri; doğrusallık (lineerlik), çıkış pulsu biçimi, kazanç sabitliği ve gürültü seviyesi olarak sayılabilir. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsu genliği 7 volttan 10 volta kadar değişir. Birçok yükseltici hem tek kutuplu çıkış (sinyalin pik kısmı ya tamamen negatif veya pozitif) hem de çift kutuplu çıkış imkânı sağlar (bu çıkışta sinyal piki hem pozitif hem de negatif kısma sahiptir). En iyi sinyal-gürültü oranı genel olarak yükselticinin tek kutup çıkışının seçilmesi ile sağlanır [1].

Yükselticiden çıkan pulsun genişliği biçimleme zaman (shaping time) sabitinin seçilmesiyle belirlenir. Puls şekillenme sabiti ile pikleşme zamanı arasında yakın bir ilişki vardır (pikleşme zamanı puls şekillenme zamanının iki katıdır). Ticari yükselticiler genel olarak puls biçimleme ağı için birkaç zaman sabitine sahiptir ve bunlar 0.25 mikro saniyeden 12 mikro saniyeye kadar değişebilir. Pikler için en iyi çözünürlük daha uzun zaman sabitleri ile sağlanır. Bu pulslanmış-optik geri besleme veya daha küçük geri besleme dirençli ön yükselticili sistemler için özellikle doğrudur. Fakat bu durumda bu

şekillenme zaman sabiti ile ilişkili pikleşme zamanı bu çalışmanın temelini oluşturan ve sayma kayıplarına neden olan ölü zamanın artmasının da bir nedeni olduğundan bu zaman sabiti dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Ayrıca daha uzun zaman sabiti daha çok rastgele toplam pulslarına (yığılma pulsları) da sebep teşkil etmektedir. Bu nedenlerden dolayı sistem düşük sayma oranları ile çalışsa bile daha küçük zaman sabitleri kullanılmalıdır. Birçok durumda çok kanallı analizörler veya yazılımlarda analog dijital dönüştürücüleri (ADC), bu zaman sabitlerinin herhangi birisi ile çıkış pulslarını işler fakat burada kaygı en uzun veya en kısa zaman sabitleri seçilirse uygun işlemin kontrol edilebilmesidir. Bu üç aygıt arasındaki uyumsuzluk çok fazla doğrusal olmayan bir durumu ortaya koyar.

Daha fazla devre olmaksızın tek kutuplu çıkış pulsu, negatif kısmı olmayan ve uzun geri alma zamanlı durumda yaklaşık simetrik bir biçime sahiptir. Çok düşük sayma oranlarında bu puls bir sonraki puls ulaşmadan önce çoğu kez sıfıra döner ve böylece daha sonraki pulslar bu durumdan etkilenmez ve yığılma pulsları (rastgele toplam pulsları) azalır. Yalnız bu durum analizler için daha uzun süre sayım yapılmasını gerektirir. Bununla birlikte sayma oranı arttığında ardışık pulslar negatif kuyruğa düştüğü için ardışık pulsların çoğu, bunların azaltılan ölçülmüş genliklerine sahip olur. Azalmanın miktarı ulaşma zamanı ile değişeceğinden detektör ayırma gücü azalır.

Yüksek sayma oranlarında taban çizgisindeki (baseline) değişimler detektörün ayırma gücünü azaltır. AC birleştirilmiş yükselticilerde birleşik kapasitörlerin yüklenmesi taban çizgisinde bu rastgele tip değişimini üretebilir. Bu sorun DC taban çizgisi düzeltme devresi ile yok edilir [1].

Yükselticinin kazanç sabiti çok önemlidir. Eğer 4000 kanaldaki bir pik 4 kanal genişliğine sahipse depolanan pulsun konumundaki yüzde 0.01 veya 0.4 kanal kazancındaki bir değişim önemlidir. Böylesi bir değişiklik sadece pikin genişliğinde bir değişime neden olmaz aynı zamanda pikin biçimini de bozar. Pik biçimindeki böylesi bir bozukluk çoğu zaman verilerin analiz edilmesinde bir problem teşkil eder [1].

1.5.4. Analog Dijital Dönüştürücü (ADC) ve Çok Kanallı Analizör

Yükselticiden çıkan pulslar genel olarak tek kutupludur. Foton spektrometresinde temel görev yükseltici çıkışında puls-yüksekliği dağılımının ölçülmesi ve işlenmesidir. Bu görev, yükselticinin analog çıkış bilgisini dijital bir niceliğe dönüştüren bir analog dijital dönüştürücü (ADC) vasıtasıyla başarılır. Prensipinde bu temel bir ayırıcı kullanılarak

yapılabilir. ADC'nin puls yüksekliği bilgisi her bir kanalda gözlenen saymaların artan sayısını artan genliğe göre veren bir sırada depolanmasını gerektirir. Bu puls yükseklik ölçümüne karşılık gelen kanalın içeriğine birin eklenmesiyle basit bir şekilde yerine getirilir. Puls yüksekliği spektrumuna ek olarak sistem, spektrumu ilk kanallarından birindeki işlem süresince (live time: bu değer gerçek zamandan ölü zamanın çıkarılmasıyla elde edilir) normal olarak depolar. Sayma süresinin sonunda bu hafıza bölgesindeki veri manyetik bir band gibi bir bellek ortamında okunabilir. Modern sayma sistemleri; ADC çıkış pulslarını kabul etme, sayma süresini kontrol etme, alınan verileri gösterme, bazı temel veri işlemlerini yerine getirme ve diğer aygıtlar tarafından istenen verileri transfer etme işlemlerini yerine getirecek şekilde programlanmış genel amaçlı bir bilgisayar ve yazılımı içerir [1].

Geleneksel olarak iki ADC türü vardır. Bunlardan ilki ardışık yaklaşım türü şeklinde ifade edilen Wilkinson türüdür [14]. Wilkinson türü ADC'de temel adım zamanla lineer olarak artan bir saat ve voltajın eşzamanlı olarak başlamasıdır. Bu artma voltajın genliği, yükseltici çıkış pulsu genliği ile aynı olduğu an saat durur. Alternatif olarak voltaj yükseltici çıkış pulsunun maksimumunda başlayabilir, lineer olarak azalır ve saat bu voltaj sıfıra ulaştığında durur. Her iki durumda da saat pulslarının sayısı detektör pulsunun genliğini ifade eder ve ilgilenilen olay karşılık gelen veri-bellek bölgesi ya da kanalına kaydedilir. Bu yöntemin teknik zorluğu, artma voltajı maksimum puls genliğine eşit olduğunda veya bu voltaj sıfır olduğunda algılamada ortaya çıkar. Foton spektrometresi için tipik modern bir ADC'de 16384'e kadar ulaşabilecek kanal seçimi yapılabilir (2'nin katları olacak şekilde) ve genelde x ışınları için 2048 ve gama ışınları için 4096 kanal tercihi çokça seçilir. Analiz edilecek bir puls için gerekli olan zaman puls genliği ile lineer olarak artar.

Diğer bir farklı ADC düşüncesi Robinson ve diğerleri [15] ve Gobbur ve diğerleri [16] tarafından tartışılan ardışık yaklaşım yöntemidir. Bu tür ADC, Wilkinson ADC'nin tersine, ardışık yaklaşım için analiz zamanı puls genliğinden bağımsızdır ve genel olarak daha küçük bir analiz süresi gerektirir (birkaç μ s). Bu sistem diğer iki voltajın yarısına denk gelen bir voltaj üretir ve bu voltaj yükselticiden çıkan pulsun genliği ile karşılaştırılır. Böylece ADC'ye gelen pulsun genliği ardışık bu işlemler sonucunda belirlenir [1].

Bir ADC'nin önemli karakteristikleri olarak integral lineerlik (bu ifade enerji kalibrasyonu sağlamada önemli bir nicelik teşkil etmektedir), diferansiyel lineerlik, sıfır kararlılığı ve Wilkinson artma voltajının artma oranı kararlılığı sayılabilir. Ayrıca ADC'nin

bir parçası olan işlem zamanı (live time) saatinin kesinliği ve kararlılığı diğer bir önemli özellik olarak ifade edilebilir [1].

Ayrıca elektronik sistem ölçmenin etkin süresini belirlemelidir. ADC'ye bir puls analiz edilmeye geldiğinde ADC'nin girişi kapatılır ve ardışık en yakın puls reddedilir. Yani bir puls ADC'de analiz ediliyorken başka bir puls için ADC işlem yapmaz. Bu yükselticinin çıkışında bulunan pile up pulsı reddetme (PUR) devresi tarafından yerine getirilir. Doğru detektör olay oranını belirlemek için bu ölü zaman kayıpları düzeltilmelidir. Bu düzeltme çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemlerden bir kaçısı bu çalışmada önerilmiştir. Bu yöntemlerden bir diğeri bir saat olarak vazife gören osilatör işlemi ile yapılır. Yalnızca ADC meşgul olmadığı zaman bu saat pulsı kaydedilir. Böylece bunlar ADC'nin "işlem zamanı (live time)" olarak kaydedilmiş olur. Yine bu çalışmada şekil 6 ile verilen sayma sisteminin "işlem zamanı (live time)" durumu belirlendi ve buna göre bir model geliştirildi. Eğer bu zaman, sayma aralığı süresi olarak alınırsa ölü zaman kayıpları uygun bir şekilde ifade edilebilir.

Çok kanallı analizör (MCA) çok fonksiyonlu bir aygıttır: pulsarı toplar ve sınıflandırır, sınıflandırılan verileri depolar, verileri gösterir, verilerde bazı analizler yapar ve çıktı için sonuçları hazırlar.

1.5.5 Yükselme Zamanı (Rise Time) ve Yığılma Pulsu Reddetme (PUR)

Artma zamanı yükselticide şekillenen pulsun maksimum yüksekliğinin % 10'unundan % 90'a çıkması için geçen süre olarak ifade edilebilir. Pikleşme zamanı ise pulsun maksimum seviyeye ulaşması için geçen süre şeklinde tanımlanır. Belirli pulsarı reddeden devre ile azaltılabilen birbirinden hayli farklı iki problem vardır. Bunlardan ilki detektördeki etkilerden kaynaklanan bazı pulsaların yavaş artma zamanı ile ilişkiliyken diğeri bir birine zamansal olarak çok yakın pulsar ile ilişkili olan ve bu yüzden de yükselticinin "yığılma (pile up)" pulsı denilen durum ile ilgilidir. Yığılma pulsarı hemen hemen eş zamanlı olarak belirlenen iki ya da daha çok x veya gama ışını katarlarının rastgele toplanması veya rastgele rastlantısı olarak ifade edilebilir. Bu pulsar yükseltici çıkışı penceresi içinde yükselticiye ulaşırsa farklı olaylar olarak dikkate alınmaz. Bu durumda ortaya çıkan yeni puls, alınan ilk pulsun yüksekliği ve pulsarın bir birine ne kadar yakın olduğuna bağlı olarak ikinci pulsun yüksekliğinin bir kısmının toplamına eşit olur [2].

Böylesi rastgele rastlantı pulsları spektrumda hem tam enerji pikinde sayma kayıplarına yol açtığından hem de elemental analizlerde bu toplam pik yeni bir enerji olarak değerlendirilerek spektrumda farklı bir yerde yerleşeceğinden istenmeyen bir durumu teşkil etmektedir. Yine bu çalışmada bununla ilgili bir model önerildi. Önerilen model yalnızca yığılma pulsu sayma oranlarının belirlenmesini içermektedir.

Detektörden gelen pulsların artma zamanı detektörde depolanan enerjinin bulunduğu bölgeye bağlıdır. Özellikle, tuzaklanma olasılığının önemli olduğu bölgede eğer enerjinin bir kısmı voltaj eğiminin küçük olduğu yerde depolanırsa artma zamanı genelde olandan daha uzun olabilir. Bu pulslar kısmen tam enerji pikinin düşük enerji kuyruklanmasından sorumludur. Yükselme zamanı devresi bu pulslardan bazılarını reddeder ve ayırma gücünü artırır [1].

Yüksek sayma oranlarında spektrum ölçümü diğer bir problemin oluşmasına neden olur. Bu problem iki ya da daha çok pulsun üst üste binmesi ve kısmen toplanması olarak karşımıza çıkar. Bu problemin birçok durumunda analog dijital çevirici tarafından gözlenen puls genliği asıl pulsların genliğini ifade etmez. Bu yüzden toplam puls asıl foton spektrumu ile ilgili herhangi bir kullanışlı bilgi sunmaz. Fakat bunun yerine puls yükseklik spektrumunun sürekli kısmını doldurur veya ek yığılma pulslarına yol açar.

Birçok durumda toplam pulsların reddedilmesi gözlenen piklerin biçiminin bozulmasını önlemek için istenir. Kabul edilen veya reddedilen pulsları belirlemede sıklıkla kullanılan yöntem bu iki pulsun arasındaki zaman aralığını ölçmektir [17]. Bu durumda “hızlı” kanal (yani ön yükselticiden çıkan puls oluşturma süreci) pulslarına bakmak gereklidir. Bu amaç doğrultusunda puls genliği ile ilgili bilgiyi sürdürmeye ihtiyaç olmadığından bu pulslar hızlı zamanlamaya imkân vermesi için yükseltilebilir ve biçimlendirilebilir (pulsun tepenin kesilmesi ve tamamen kesilmesi ve böylece pulslar daha da kısaltılır). Böylece zaman olarak birbirine yakın olduğu belirlenen yavaş kanal pulslarının (enerjisini belirleme) ADC'ye ulaşması ADC'nin kapatılmasıyla reddedilebilir. Bu işlem yükselticiden çıkan toplam pulslarının çoğunu yok etmede kullanılabilir. Kalan pulslar bir spektral biçimi ve düşük oranlı sayma ölçümüyle özdeş olan pik ayırma gücünü vermelidir.

1.6. Piklerin ve Spektrumların Şekillenmesi

Ölçülmüş puls yüksekliği spektrumu 1.3 kısımda irdelenen çeşitli etkilerden dolayı sürekli bir dağılım oluştururken bir kaynak tarafından oluşturulan foton spektrumu genel olarak çok küçük genişlikli ayrı çizgilerden oluşur. Bu spektrumdaki tam enerji pikleri (ya da toplam soğurma piki) yalnızca toplam saymanın küçük bir kesrinin tutarı olmasına rağmen analiz için yeterli bilgiyi sağlar. Diğerleri spektral tabii fon (arka plan - background) olarak dikkate alınmak zorundadır fakat bunlar da istenilmez. Yarıiletken detektörlerde fotonlar ile üretilen puls yükseklik spektrumları genel bir yapısı tartışıldıktan sonra tam enerji piklerinin biçimlerini ifade eden analitik fonksiyonlar düşünülebilir. Bu açıdan olaya bakıldığında genel olarak bir spektrum ilki pik bölgesinde tabii fonu ifade eden bir fonksiyon diğeri pikin kendisini ifade eden bir fonksiyon olmak üzere iki fonksiyon içerir.

1.6.1. Spektrum Şekillenmesi

Pik şekillenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları Heath [18], Adams ve Dams [19] tarafından yürütülürken Gardner ve diğerleri [20] tarafından Monte Carlo simülasyonuna dayalı, Jin ve diğerleri tarafından [21] yarı deneysel modeller kullanılarak spektrum şekillenim hesaplamaları yapılmıştır. Puls yüksekliği spektrumuna başlıca katkılar doğrudan detektöre ulaşan birincil fotonlar tarafından oluşturulan fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift üretilmesi etkileşmelerinden ileri gelir.

Kristalde fotoelektrik soğurma aşağıda verilen üç şartı yerine getirirse fotonun tam enerjisine karşılık gelen bir puls vermesi beklenir [1]:

- 1- Fotoelektronun yayımlanmasından sonra atomik kabuk elektronlarının yeniden düzenlenmesinden kaynaklanan Ge ve Si x ışınları kristalde soğurulmak zorundadır. Eğer bu fotonlar kaçarsa (soğurulmazsa) olay tam enerji pikinin düşük enerji kısmında yer alan kaçak x ışını piklerinden birine katkı yapar.
- 2- Fotoelektron kristalin duyar hacmi içinde tüm enerjisini kaybetmelidir. Frenleme ışınımı (Bremsstrahlung) kayıpları ve kaçan fotoelektronlar sıfırdan tam enerjiye kadar bir puls sürekliliği verir.

- 3- Tuzaklanma etkileri ve yük toplama kayıpları göz ardı edilmelidir. Eğer göz ardı edilmezse olay pikin düşük-enerji kuyruklanmasına katkıda bulunur. Tam enerji piki olarak sayılsın ya da sayılmasın olay pik analiz yöntemine bağlıdır.

Düşük enerjilerde fotoelektrik etki baskın iken Compton etkisi yüksek enerjilerde sık görülen bir süreç olarak karşımıza çıkar. Detektörde soğrulan enerjiye sahip Compton elektronları sıfır enerjiden $E/(1+2E/m_0c^2)$ enerjisine uzanan bir genişlikte sürekli bir dağılıma yol açar. Sınırlı detektör ayırma gücünden dolayı teorik dağılımın keskin Compton kenarı puls yüksekliği spektrumunda yayılma yapar ve maksimum sayma kenar için hesaplanan saymanın hemen altındadır. $E/(1+2E/m_0c^2)$ ve E arasındaki bir enerji ile saçılan foton kristalde tekrar bir etkileşme yapabilir. Eğer etkileşme fotoelektrik etkileşme ise toplam puls (Compton elektronu + fotoelektron) tam enerji pikine katkı yapar [1].

Çift üretimi enerjik olarak $2m_0c^2 = 1,022$ MeV'den yüksek enerjilerde mümkün olmasına rağmen 1,5 MeV'in üzerindeki enerjilerde rol oynamaya başlar. Eğer iki pozitron yok olma kuantası kaçarsa elektron-pozitron çiftinin kinetik enerjisinin tam soğrulması $E - 2m_0c^2$ 'de "çift-kaçak" piki şeklinde kendini gösterir. Eğer bunlardan biri kristalde etkileşmeye girerse toplam puls ya $E - m_0c^2$ enerjisine karşılık gelen tekli-kaçak pikine katkı yapar ya da $E - 2m_0c^2$ ve $E - m_0c^2$ arasında bir enerjiye sahip dağılıma katkı yapar. Her iki niceliğin etkileşmesi tam enerji pikine karşılık gelen bir pulsa veya $E - 2m_0c^2$ ve E arasında bulunan sürekli bir pulsa yol açabilir [1].

Ayrıca kaynaktan yayınlanan fotonlar kristalin etrafında bulunan malzeme ile etkileşebilir. Bu etkileşme sonucu ortaya çıkan x ışınları, Compton saçılması ve yok olan nicelikler gibi ikincil fotonlar kristale ulaşabilir ve böylece puls yükseklik spektrumuna katkı yapabilir.

Fotoelektrik etki karakteristik x ışınları yayan uyarılmış atomları oluşturur. Bu nedenle de spektrumda, kurşun kalkan veya yönlendiriciden (kolimatör) veya kristaldeki altın kontak tabakasından veya kaynağı destekleyen çelikten ya da radyoaktif maddeyi içeren malzemenin elementlerinden kaynaklanan K ve (ya da) L x ışınları gözlenebilir.

Malzemenin etrafında Compton saçılması yapan fotonlar saçılma açısına bağlı olan $E/(1+2E/m_0c^2)$ ve E arasında bulunan enerjilere sahiptir. Geriye doğru saçılan fotonlar baskındır ve enerji aralığının daha düşük kenarında geri saçılma piklerine yol açar. Daha

düşük birincil foton enerjileri için bu saçılma dağılımı tam enerji pikine çok yakındır ve bu nedenle de ayırt edilemeyebilir [1].

Puls yükseklik spektrumunun beklenen şeklini değiştirebilen başka etkilerde vardır. Beta parçacıkları ve dönüşüm elektronları çok ince bir pencereye sahip detektör durumunda kristale ulaştıklarında frenleme ışınımının (Bremsstrahlung) sürekli dağılımını artırabilir. Eğer bir radyo çekirdek bir foton akısı yoluyla bozunursa eş zamanlı olarak iki ya da daha çok foton belirlenebilir ve böylece bunlar fotonların enerjileri toplamına karşılık gelecek bir konumda bir pikin toplam dağılımına yol açabilir. Bunlardan başka, özellikle yüksek sayma oranlarında gerçek rastlantılar (coincidences) ve rastgele toplam pik olarak karşımıza çıkar ve spektrumda bozulmaya neden olur [1].

1.6.2. Spektral Tabii Fonun (Background) Şekillenmesi

Bir pik bölgesindeki verilerin ilki “tabii fon” ve ikincisi “pik” şeklinde ifade edilen iki analitik fonksiyon ile tanımlanması pik analizlerinde bir avantaj sağlar. “Tabii fon”un en genel tanımı ortamda herhangi bir kaynak yokken gözlenen spektrum olarak verilebilir. Yani, kaynağın dışından gelen herhangi bir radyasyonun spektrumu olarak ifade edilebilir. Bu tanımda bizi odadaki veya çevredeki radyasyon olayına götürür. Bir spektrumdaki belirli bir enerjinin gama ışınlarını tartıştığımızda eğer ilgilenilen enerjinin dışındaki radyasyonların tümü ifade edilirse gözlenen bir spektrum olarak “tabii fon” tanımını yapmak makul olabilir. Bu ifade çevresel arka planın yanı sıra daha yüksek enerjili gama ışınlarını da içerir. Bununla birlikte spektral analizlerde pik kısmının haricinde bulunan her şeyin “tabii fon” olarak ifade edilmesi alışıl gelmiştir. Pikin üstündeki (yüksek enerji) düz kısımdan pikin altındaki düz kısma spektrum yüksekliğindeki artma tam enerji pikinde olan olaylar ile üretilir, fakat detektörün duyar hacminden birincil ve ikincil elektronların kaçmasından dolayı düşük enerjili kısmında kaydedilir. Bu pik kısmından daha ziyade arka plan kısmı olarak adım (basamak) benzeri artmayı ifade eder.

Birçok analitik fonksiyon bu spektral arka planı ifade etmek için kullanılır. Bu fonksiyonlar, genellikle ilk kısmı tüm pik bölgesinin altında uzanan ve daha yüksek enerjili fotonlardan kaynaklanan katkılar için düşük dizimli polinomlardan ve ikinci kısmı düşük enerjili kenarında adım (basamak) benzeri artmayı gösteren bir fonksiyondan olmak üzere iki kısımdan oluşturulur. İlk kısım için önerilen ifadeler bir sabitten kanal sayısına göre üçüncü terimli polinomlara kadar değişebilir. Kokta [22] ve Hertogen ve diğerleri [23]

tabii fon (background) verecek ifadeler üzerinde ve bu ifadelerde bulunan ikinci ve üçüncü dereceden terim katsayılarını belirlemek için kanal sayısı ve kanal bölgesi üzerinde çalışmalar yürüttüler. Hertogen ve diğerleri [23] bu ifadeleri belirlemek için pik merkezinin her iki tarafından 30 kanalı kullandı, fakat bu kadar çok arka plan kanalı kullanılması uygun değildir. Bu arka plan fonksiyonlarının daha düşük yoğunluklu tartışmaları Quittner [24] ve Laitano ve diğerleri [25] tarafından yapıldı. Genel olarak, ilgilenilen pik bölgesinde bir Compton kenarı olmadığı sürece lineer arka plan yaklaşımları yeterlidir. Çünkü ikinci ve üçüncü dereceden terimler pik-kanal saymalarında veya yüksek kenar kuyruklanmalarında rastgele dalgalanmaları izleyen tabii fon fonksiyonuna neden olur. Bu da gerçekçi olmayan tabii fon şekillenmesini oluşturur. Bu tabii fon bölgesinde kanalların sayısı küçükse özellikle doğrudur. Bu yüzden adım-benzeri tabii fonları ifade eden fonksiyonlar daha güvenlidir [1]. Literatürde sıkça kullanılan adım-benzeri tabii fon fonksiyonları tanımlanmıştır.

Analitik gösterimlere dayanmayan spektral tabii fonun tanımlanması için başka bir yöntem daha vardır. Bu yöntem düzleştirme ve ekleme noktalarının bir kümesiyle tabii fon yaklaşımını gerektirir. Böylesi bir tabii fon spektrumu üreten yöntem, pikler kaybedilene kadar verilerin ardışık olarak düzleştirilmesidir. Tabii fonun bu gösterimi adım-benzeri kısmı da içermelidir. Tabii fon spektrumu bu şekilde verildiğinde ve tabii fon çıkarıldığında pikler daha gerçekçi veya etkili şekilde analiz edilebilir. Uygun pik şekil fonksiyonu tabii fondaki kuyruklanmayı içeren yöntemin boyutuna bağlıdır [1].

1.6.3. Pik Şekillenmesi

İdeal olarak, tam enerji piki bir Gaussian ile eşsiz bir doğrulukta ifade edilebilir:

$$f(x) = Y \cdot e^{-(x-X)^2 / 2\sigma^2} \quad (26)$$

Burada Y genlik, X pikin merkezi ve σ , Y/\sqrt{e} 'de yarı genişliktir. Yarı maksimumdaki tam genişlik w (FWHM), σ ile ilişkilidir ve bu ilişki $w = 2.35\sigma$ şeklindedir. Bu durumda 25 denklemini alternatif olarak aşağıdaki şekildeki gibi yazılabilir:

$$f(x) = \frac{N}{w\sqrt{\pi/(4 \ln 2)}} e^{-(x-X)^2/2\sigma^2} \quad (27)$$

Burada N pik alanını ifade etmektedir. Uygulamada pik düşük enerji kenarında ve mümkün olduğunca da yüksek enerji kenarında (başlıca yüksek sayma oranlarında) bazı kuyruklanmalara sahip olabilir.

Tam enerji pikinin şekillenmesi ile ilgilenmemizin nedeni pik değerlendirme amacına bağlıdır. Tek pikler için herhangi bir analizin doğruluğu veya analiz işlemi pik şeklinin sınırlandırılmış düşüncesi ile yerine getirilebilir. Temel pik gösterimleri, kuyruklanmanın tabii fon istatistiğinde kaybolması için pik-tabii fon oranının küçük olduğu (örneğin çok düşük aktiviteli numunelerde) durumlarda yeterli olabilir. Bununla birlikte bu temel gösterimlerin yeterli olmadığı birçok durum vardır. Bunlardan biri eğer daha zayıf bileşen kuyruklanma bölgesinde oluşursa bu bileşenin pik ve spektral tabii fon şeklinin eşsiz bir gösterimini sunan analitik fonksiyonları bilmeksizin daha düşük enerji piklerinin enerjisini ve alanını belirlemek zordur. Bu fonksiyonların çoğu ana bir Gaussian bileşen ve katkısız bir terim ya da düşük enerji kuyruklanmalarını hesaba katan terimlerden oluşur. Bununla birlikte pik şekillenmesini veren fonksiyonların bir kaçı kuyruklanmayı hesaba katmak için ana Gaussian fonksiyonun düzenlenmiş halindedir. Bu fonksiyonlar 3 değişkenden (bunlar konum, yükseklik ve genişlik) iki ek kuyruklanma terimini de içeren değişkenlerin olduğu 8 veya 9 değişkene kadar çıkabilir. Yüksek enerji kuyruklanma terimi ise pik merkezi civarında yansımaları hariç olmak üzere düşük enerji terimi biçimiyle benzerdir. Düşük enerji kuyruklanmasını ifade etmek için kullanılan bir fonksiyonun değişkenleri yalnızca gama enerjisine bağlıyken yüksek enerji kuyruklanmasında bu değişkenler hem sayma oranına hem de olası gama enerjisine bağlıdır [1].

Karmaşık pik şekillenmesi fonksiyonlarını daha etkin kullanmak için ilgilenilen enerji aralığında yayımlanmayan birkaç enerjide güçlü ve iyi ayrılmış pikleri içeren mevcut bir takım spektruma sahip olmak gereklidir. Bu pikler için kullanılan pik şekillenme fonksiyonu değişkenleri belirlenir ve bu durumda bu sonuçlardan gama enerjisinin bir fonksiyonu olarak bu değişkenleri veren analitik ifadeler belirlenir [1].

Kuyruklanma değişkenlerinin belirlenmesi genellikle bu amaç doğrultusunda oluşturulan ayrı lineer olmayan en küçük kareler yöntemi ile yapılmayı gerektirir. Özellikle iki kuyruklanma terimi içeren şekillenmeler için değişkenlerin ilk değerinden iyi bir tahmin yapmak kolay değildir ve bunun bir sonucu olarak lineer olmayan fitleme

(uydurma) süreçleri her zaman yakınsak olmayabilir. Ayrıca bazı deneyler pik enerjisi ile yumuşak bir şekilde değişen değişken değerlerini elde etmek için gerekli olabilir. Çok karmaşık pik şekillenmesi fonksiyonlarının kullanımı spektral verileri analiz etmek için büyük çaplı bilgisayarlara ihtiyacı ima etmesi yanında günümüzün küçük çaplı bilgisayarlarında da bu fonksiyonların analizinin yerine getirilmesi açık bir şekilde mümkün hale gelmiştir [26].

ADC girişinde sürekli puls yüksekliği dağılımı bir Gaussian fonksiyonuna çok yakın olsa bile analizör veya program tarafından üretilen dağılımın süreksiz bir histogramın oluşmasından dolayı bozulduğu vurgulanmalıdır. Çok kanallı analizör kanal genişliğine eşit aralıktaki genliklerle bir kanaldaki tüm pulsarı birleştirir ve bu ortalama genlik piklerin yerleştirildiği pik uydurmasının olduğu kanalın merkezine denk gelmez fakat pik merkezine çok yakındır. Bu bozulmayı en aza indirmek için yeteri kadar büyük olan (en az 4 veya 5 kanal) bir FWHM önemlidir [1].

Bazı durumlarda 26 ve 27 ifadelerindeki $f(x)$ 'in şeklinde bir değişim mümkündür ve bunun bir sonucu olarak lineer olmayan en küçük kareler yöntemi lineer en küçük kareler yöntemi ile yer değiştirebilir. Bu, eğer temel Gaussian fonksiyonu herhangi bir kuyruklanma terimi olmaksızın fit için yeterli ise ve pik fit edilmeden önce spektral tabii fon spektrumdan çıkarılabilirse mümkündür [1].

Buraya kadar olan kısımda yalnızca tam enerji piki şekillenmesi dikkate alındı. Fakat yukarıda ifade edilen durumlar tekli ve çiftli-kaçak pikler içinde uygulanabilir. Bununla birlikte tekli-kaçak pikleri 511 keV yok olma radyasyonu olarak aynı genişleme bileşeni içerdiğinden tam enerji pikinden daha geniş olma gerçeği dikkate alınmalıdır. Piklerin genişliği bir genişlik fonksiyonundan elde edilen değerleri için pik uydurma işlemi yapılması boyunca sabitleştirilirse bu farklılık özellikle önemlidir. Kısacası tekli-kaçak pikleri için farklı bir fonksiyona gereksinim vardır [1].

1.7. Ölü Zaman ve Yığılma (Pile up) Düzeltmeleri

ADC'nin ana problemi gelen pulsu çevirirken meşgul olması ve bu esnada herhangi bir işlem yapmamasıdır. ADC'nin işlem yaptığı durum yerleştirilen zamanlama (clock) pulsarı ile birlikte ölçülür. Bu zamanlama pulslarının toplamı işlem zamanı (live time: T_{Live}) olarak ifade edilebilir. Bu sayma sisteminin çalışır durumda olduğu süreyi ifade etmektedir. Aynı zamanda bu zamanlama pulsarı sayma süresi boyunca çalışır. Bu

durumda elde edilen zaman ise sayma zaman (real time: T_{Real}), gerçek zaman veya saat zamanlaması olarak adlandırılır. Sistemde puls işleme sürecinin gerçekleşmediği zaman ölü zaman olarak adlandırılır ve kabaca

$$T_D = T_{Real} - T_{Live} \quad (28)$$

şeklinde ifade edilir. Modern sayma sistemlerinde ADC ve çok kanallı analizör (MCA) birlikte kullanılır. ADC+MCA durumunda bir pulsü işlemede aşağıda ifade edilen şekliyle üç ana kısmın toplamına karşılık gelen bir ölü zaman ifadesi ya da puls işleme süresi karşımıza çıkar [2]: Pikleşme Zamanı + ADC Çevirme Zamanı + Hafızaya Depolama Zamanı.

ADC çevirme zamanı MCA'nın türüne bağlı olarak değişebilir. Genel olarak Wilkinson tipi ADC için

$$\text{ADC Çevirme Zamanı} = \frac{(N + X)}{\nu} + R \quad (29)$$

ifadesi yazılabilir. Burada ν , ADC çevirme frekansı, N bulunulan kanal sayısı, X dijital sapmada kullanılan kanalların sayısı ve R'de lineer yokuşun elde edilmesi ile ilgili sabitlenmiş bir zamandır. Buradan görüldüğü üzere bu çevirme zamanı 4 farklı değişkene sahiptir ve dışarıdan belirlenmesi zaman alıcı ve can sıkıcıdır. Hafıza depolama zamanı ise işlenen pulsun MCA'ya depolanması için geçen bir süredir ve bu genellikle 0,5'den 2 μ s kadar geçen bir süreyi alabilmektedir.

Yığılma pulslarının yanı sıra puls işleme elektroniğinde ölü zaman da tam enerji pik saymalarında kayıplara yol açar. Bu kayıpların büyüklüğü artan sayma oranı ile artmasına rağmen kaynak detektör mesafesine veya bozunma şemasına bağlı olmadığı söylenebilir. Ancak gerçek sayma oranı ifadesini belirlemede detektör katı açısı önemli bir parametre olduğundan kaynak detektör mesafesi önem arz etmektedir. Foton yayınlama oranlarının nicelik ölçüsü için bu kayıplar ihmal edilebilir. Fakat bu durum kaynak aktivitesinin belirlenmesinde önemlidir. Bu nedenle kayıplar için uygun düzeltmeleri yapmak zorunludur.

1.7.1. Ölü Zaman Ölçme Yöntemleri

Sayma, sayma oranı ve yığılma kayıplarının ana nedeni ölü zamandır. Bunlarla ilgili gerekli düzeltmeleri yerine getirebilmek için öncelikle ölü zaman belirlenmelidir. Bazen ölü zaman sayma sisteminin elektronik devresinin sabit ayırma zamanı gibi bilinen sınırlı özellikleri ile de ilişkilidir. Ölü zamanın işlem şartları ile bilinmeyeceği veya değişebileceğinden dolayı doğrudan ölçülmesi genel kabul görmüştür. Ölü zamanın genel ölçme teknikleri doğru sayma oranı ile lineer olmayan bir biçimde değişen gözlenen sayma oranı gerçeğine dayalıdır. Bu nedenle belirli modellerden birinin uygulanabilir olduğu varsayımıyla ve en azından iki farklı doğru sayma oranları için gözlenen sayma oranlarının ölçülmesiyle ölü zaman ölçülebilir [3]. Bu çalışmada ölü zamanın analitik olarak belirlenebilmesi için yükseltici ve ADC'yi kapsayan bir ölü zaman denklemi türetildi.

1.7.1.1. İki Kaynak Yöntemi

Bu yöntem iki bireysel kaynaktan ve bu kaynakların bileşiminden ileri gelen sayma oranlarının gözlenmesine dayalıdır. Sayma kayıpları lineer olmadığından birleştirilmiş kaynaklardan ileri gelen gözlenen sayma oranı her bir kaynağın ayrı ayrı saymalarından ileri gelen gözlenen toplam sayma oranından daha azdır ve ölü zaman bu uyumsuzluktan hesaplanabilir. A ve B gibi iki kaynak dikkate alındığında bu ilişki [27]

$$n_A + n_B = n_{AB} + n_{AP} \quad (30)$$

ile verilir ve burada sırasıyla n_A , n_B , n_{AB} ve n_{AP} ifadeleri tekli olarak A kaynağının gözlenen sayma oranı, tekli olarak B kaynağının gözlenen sayma oranı, A ve B kaynaklarının her ikisinin birlikte oluşturduğu gözlenen sayma oranı ve arka plandan kaynaklanan sayma oranlarını göstermektedir. Non-paralyzable durumundaki sayma oranı düzeltilmesi ve arka planın sıfır olması dikkate alındığında bu ifadenin genel çözümü

$$T_D = \frac{n_A n_B - [n_A n_B (n_{AB} - n_A)(n_{AB} - n_B)]^{1/2}}{n_A n_B n_{AB}} \quad (31)$$

şeklinde elde edilir.

1.7.1.2. Bozunan Kaynak Yöntemi

Bu yöntem kısa ömürlü çok saf bir radyo izotop kaynak mevcutsa yapılabilir. Bu durumda kaynağın bilinen üstel bozunmasından gözlenen sayma oranından hareketle ölü zaman hesaplanabilir. Bu yöntemde doğru sayma oranlarını elde etmede genel bir yaklaşım yarı logaritmik grafik kâğıdında düz bir çizgi sergileyen geçen zamana karşılık net sayma oranı eğrisi kısmının en küçük kareler yöntemiyle fit edilmesidir. En küçük kareler yöntemiyle fit edilebilmesi için uygun bir bağıntı [3, 27]

$$n(t) = n_0 e^{-\lambda t} + n_{AP} \quad (32)$$

ile verilir. Burada $n(t)$ geçen t süresi boyunca doğru sayma oranı, n_0 bozunan kaynaktan ileri gelen ilk doğru sayma oranı ve λ kullanılan radyoizotopun bilinen bozunma sabitidir. Bu durum için paralyzable model kullanıldığında çözüm aşağıda ki gibi verilebilir:

$$\lambda t + \ln m = -n_0 \tau e^{-\lambda t} + \ln n_0 \quad (33)$$

1.7.2. Ölü Zaman Düzeltmeleri

Ölü zaman etkisinin bir örnekleme bir detektör, sabit T_D uzunluklu bir kare dalga çıktısı veren bir puls şekillenme ağı ve bir sayıcıdan (yükseltici ve ADC) oluşan temel bir sayma sistemiyle kolayca yapılabilir. Bunun yanı sıra modern sayma sistemlerinde var olan ADC'den ileri gelen ölü zamandan kaynaklanan durumdan dolayı bu T_D zamanı değişkenlik arz etmektedir. Bu nedenle değişen bu T_D ölü zamanlı ifadeyi örnekleme bilgisayar vasıtasıyla Monte Carlo benzeri bir yöntemle de yerine getirilebilir. Bu çalışmada bu amaç doğrultusunda bu T_D 'yi veren bir fonksiyon türetildi ve bu fonksiyon vasıtasıyla sayma örnekleme yerine getirildi. Detektör çıktısındaki puls genişliği ve sayıcının (yükseltici ve ADC) zaman ayırma gücünün T_D değerinden çok daha kısa olduğu varsayılır. Önce gelen pulsün kare dalgasının sürekliliği boyunca oluşan her bir puls sistem tarafından kabul edilmez. Bu sistem ölü zamanından kaynaklanan puls kayıplarını

örnekler. Gerçek (doğru) sayma oranı n_0 ve sayıcı (ya da program) tarafından kaydedilen sayma oranı n uzatılmayan (non-paralyzable: bir ölü zaman aralığı içinde oluşan herhangi bir olay bu aralığı aşmaz) tip durumunda (ADC çevirmesi durumu) [1,3]

$$n_0 = \frac{n}{1 - nT_D} \quad (34)$$

ve uzatılan (paralyzable) tip durumunda (yükseltici durumu) [3]

$$n = n_0 e^{-n_0 T_D} \quad (35)$$

ifadeleriyle verilir. Burada T_D sistemin ölü zamanıdır. Bir foton spektrometre sisteminde en büyük ölü zaman kayıpları puls yüksekliği analizörlerinde veya programlarında analog dijital çevirmelerinde olması yanında hatırı sayılır oranda yükselticide de gözlenir. Bir pulsu işleme boyunca bunların “meşgul” zamanlarında analizör veya program daha fazla pulsu kabul etme durumunda değildir. Wilkinson tipi ADC’lerde ölü zaman kaydedilen pulsun genliğine bağlıdır ve bu değer 100 μ s civarına kadar çıkabilir. Yukarıda ifade edilen formüller ADC tipinin daha sonraki modelleri için ölü zaman düzeltmelerinde geçerlidir fakat değişen ölü zamanlardan dolayı Wilkinson tipi ADC’lerde geçerli değildir [1].

Birçok program ve analizörde gerçek zaman T_{Real} ve sadece kabul edilen pulsların işlenmesi boyunca geçen T_{Live} işlem zamanı ayrı ayrı kaydedilir. İşlem zamanı ve gerçek zaman arasındaki ilişki

$$T_{Real} = T_{Live} + \sum_i T_{D_i} \quad (36)$$

ile verilebilir.

1.7.3. Yığılma (Pile up) Etkisi

Yarıiletken detektörler, kendi kendine ölü zaman üretmez ve frekansından bağımsız olarak gelen fotonları kabul etmek için hazırdır. Ayrıca ön yükseltici ve yükseltici gelen

tüm pulsarı kabul eder ve işler. Yani sayma sistemi gelen ilk pulsu işlerken ikinci puls için ölü durumda değildir. Bununla birlikte sınırlı zaman ayırımından dolayı iki ardışık olayın yükselticide yükseltilecek pulsarı üst üste biner ve bozulmuş tekli bir çıkış pulsu üretir. Bu olay “yığılma” etkisi olarak adlandırılır. Bu durumda oluşan pile up pulsu bozulmamış pulslardan farklıdır ve ilk ve son pulslardan daha geniş bir yapıya sahiptir.

Birleşmiş pulsların genliği ikinci pulsun ulaşma zamanı ile değişir ve eğer bu ulaşma zamanı oldukça küçükse birleşmiş puls spektrumunda iki asıl pulsun kaydedildiği yerden daha farklı bir bölgeye kaydedilir. Bu nedenle yüksek sayma oranlarındaki spektrum düşük sayma oranlarındaki biçimiyle karşılaştırıldığında daha bozuktur. Yığılma etkisinden dolayı piklerin puls yüksekliği dağılımı yüksek sayma oranı spektrumu için daha yüksektir [1].

Yığılma etkisinden kaynaklanan puls yüksekliği spektrumundaki bozulma doğru spektrum şekillenmesinden ve yükseltici çıkış puls dalga biçiminden hesaplanabilir. Gözlenen spektrumdan doğru spektrumu hesaplama işlemi bir spektrumun pikleri ile yerine getirilirse sınırlı fayda sağlar. Sürekli spektrumun doğru bir biçimi türetilmesi durumu veya rastgele toplam pikin x veya gama ışınları çizgisi ile karışması durumu istisnaları teşkil edebilir. Yığılma kayıpları için gözlenen pikleri düzeltmede birkaç yaklaşım tanımlanmıştır. Bunlar kabaca ikiye ayrılabilir: birincisi ölçüm yapıldıktan sonra bir düzeltmeyi öngören yöntem, ikincisi ölçümler ve serbest bozunma spektrumu çalışması boyunca bu düzeltmeyi sürekli uygulama yöntemidir. Bu yöntemlerden ilki “etkin” ölü zaman ve puls üreticisi düşüncesine dayanıyorken ikincisi elektronik olarak kontrol edilen yığılma puls reddetme devresi ve çalışma zamanı düzelticisine dayanır. Ayrıca bu ikinci yöntemde puls yüksekliği analizörü değişikliğinden yararlanır ve problem bir donanım yardımı ile çözülebilir [1].

1.7.4. Etkin Ölü Zaman Ölçümüne Dayalı Yığılma (Pile up) Düzeltmesi

Bu tarz düzeltmede aşağıda verilen varsayımlar yapılabilir:

- 1- Ölçüm zamanı boyunca sayma oranlarında dikkate değer bir değişme olmaz,
- 2- Analizörün haricindeki elektroniklerde başka bir ölü zaman yoktur (bu çalışmada yükseltici ve ADC çevirmesinden kaynaklanan iki ölü zaman vardır),
- 3- Bu ölü zamandan ileri gelen sayma kayıpları işlem zamanı modunda analizörün çalışmasıyla otomatik olarak düzeltilir.

Bu durumda verilen bir sistem için rastgele toplamlardan kaynaklanan x veya gama ışını piklerinin kaybolan olayları kesri, toplam sayma oranının ve enerjinin bir fonksiyonu olarak deneye dayalı şekilde elde edilebilir. Bu ilgilenilen enerji bölgesinde farklı radyoizotoplardan yayımlanan fotonların bilinen bağıl tutarlarını içeren kaynakların bir kümesi ile yapılan ölçümlerle başarılabilir. Eğer yığılma kayıpları gerçekleşmezse ölçülmüş N_i ($i=1, 2, \dots$) pik alanı oranları ve A_i aktivitesi her bir seferde aynı analizör T_{Live} işlem zamanı aralığı seçilmesi koşuluyla toplam sayma oranından bağımsızdır. Bu orandaki herhangi bir değişiklik yığılma kayıplarına bir işarettir ve bu değişimin tutarı sayma kayıpları ve sayma oranı arasında bir bağıntının türetilmesinde kullanılabilir [1].

Her bir enerji için, $N_i / A_i T_{Live}$ oranları n_i toplam sayma oranının bir fonksiyonu olarak fit edilir. Bu oran, spektrumda kaydedilen N_i saymalarının sayısının sistem işlem zamanına bölünmesi olarak tanımlanır ve $n_i = N_i / T_{Live}$ ile verilir. Analizörün daha düşük eşik değerinin altında ve daha yüksek eşik değerinin üstünde kaydedilmemiş saymaların sayısı göz ardı edilebilir. Bu durumda elde edilen değerler, sıfır sayma oranında kestirme değeri ile $N_i / A_i T_{Live}$ oranının bölümüdür. Grafikler yardımıyla doğru alanı elde etmek için çarpılmak zorunda olan ölçülmüş pik alanı C düzeltme faktörünün tersini verir. Bu ölçüm sonuçları için Koskelo [28] tarafından bazı çıkarımlar ileri sürülmüştür:

- 1- Dikkate alınmayan yığılma kayıpları 1000 s^{-1} den daha büyük sayma oranlarında ciddi hatalara yol açabilir. Analizör işlem zamanı modu ölü zaman kayıpları için düzeltme sağlarken yığılma kayıpları için düzeltme sağlamaz,
- 2- Yığılma kayıpları, yükselticinin daha büyük şekillenme zaman sabiti için daha yüksektir,
- 3- İyi bir yaklaşımla $1/C$, n_i ile lineer olarak azalır,
- 4- $1/C$ enerjiye bağlı olabilir (enerjiye bağlı olması da gerekmez).

$1/C$ enerjiye bağlı olsun ya da olmasın gözlemler pik analiz işlemleri ile etkilenir. Bu düşük enerjilerde yakın bir pikten bir olayı kaldırmak yüksek enerjilerde geniş bir pikten bir olayı kaldırmak daha küçük bir kanal artışı sağladığından pik alanı fit edilen Gaussian bir fonksiyon ile tanımlanırsa gözlenme bağımlılığı anlaşılabilir. Yüksek enerji kuyruklanması içeren pik alanı tanımı bu enerji bağımlılığını azaltabilir ya da yok edebilir.

$$\frac{1}{C} = 1 - n_i T_D \quad (37)$$

bağıntısı ile ifade edilebilen düz bir çizginin eğiminden etkin bir ölü zaman türetilir. T_D belirlenmeden önce gelecek ölçümler için yığılma düzeltmesi n_i 'den hesap edilmelidir. Bununla birlikte T_D pik enerjisine ve tüm spektral dağılıma bağlı olabilir [1].

1.7.5. Ölü Zaman ve Yığılma (Pile up) Düzeltmeleri İçin Bazı Modeller

Ayrıca ölü zaman yığılma kayıpları üzerinde de etkilidir. Çünkü ölü zamanı azaltmak için yapılan iyileştirmeler beraberinde yığılma kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle sayma sisteminde kullanılan elektronik aygıtlar en iyi sonuçları verecek şekilde ayarlanmalı ve kurgulanmalıdır. Detektörün gerçek cevabını belirlemek için ölü zaman nedeniyle kaybolan bu pulslar belirlenmeli veya ölçülmelidir. Bunun için genel olarak yüksek ya da düşük sayma oranlarında gelen pulsların olduğu durum normal durum olarak kabul edilir ve bu durumda kesirsel kayıplar değişmez [2]. Sayma sistemimin ölü zamanından kaynaklanan sayma kayıplarını telafi etmek için literatürde birkaç yöntem vardır. Bunlar aşağıda ifade edilmiştir.

1.7.5.1. İşlem Zamanı Saati (Live Time Clock) Yöntemi

Çok kanallı analizör (MCA) ölü zaman kayıpları giriş kapısı boyunca belirli olduğu varsayıldığında ölçümün uygun sayma süresi gerek ve yeter şart olduğu için toplam işlem zamanı dikkate alınır. Yani işlem zamanı, sistem açık ve toplanan sayma için mevcutsa gerçek zamandır. Böylece spektral piki içindeki saymalar saniye başına saymayı belirlemek için işlem zamanına bölünebilir. Bu yöntem düşük sayma durumlarında iyi [2] olsa da uzun sayma süreleri gerektirir ve gerçek sayma oranını belirlemede yetersizdir.

1.7.5.2. Gedcke-Hale Yöntemi

Bu yöntem EG&G Ortec firması tarafından kullanılır ve istatistiksel düzeltmeyi içerir. Bu yöntem de yükselticinin önde gelen pile up kenarından kaynaklanan kayıpları telafi edilir. Bu yöntem kabaca [2]

$$\text{Hafızadaki Sayma} = \text{Gelen Sayma} \times \frac{T_{Live}}{T_{Real}} \quad (38)$$

şekliyle ifade edilebilir. Çok yüksek sayma oranlarında kullanılır. Fakat maksimum çıktıda yaşanan zaman sabiti doğruluğuna $\% \pm 3$ civarında katkı yapmaktadır.

1.7.5.3. Puls Üreticisinin Kullanımı

Detektörden çıkan pulslara benzer sabitlenmiş bir genlikte puls üreticisinde yapay olarak üretilen pulslar bilinen oranda ön yükselticiye gönderilir. Üretilen bu pulslar tüm sayma sistemi bileşenleri boyunca taşınır ve bir pulser pikinde hafızada toplanır. Bu durumda pulser sayması ile sürdürülen kesirsel kayıpların gama ışınları ile üretilen kesirsel kayıplarla aynı olduğu varsayılır. Böylece gama spektrumunda ölü zaman ve yığılma gibi kayıplar [2]

$$\frac{\text{Pulser Tarafından Üretilen Puls Sayısı}}{\text{Pulser Pikinde Kaydedilen Puls Sayması}} \quad (39)$$

temel oranı ile ifade edilen gama pik alanı ile çarpılması ile belirlenir. Wilkinson türü ADC'lerde ölü zaman puls yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Sabit genlikle pulserde üretilen pulslar gerçek bir ölü zaman ifadesi vermesi bu nedenle problemlidir.

1.7.5.4. Kayıp Serbest Sayması (Loss-free Counting)

Bu yöntem birkaç farklı düzeltme içerir. Bu düzeltmelerin tümü anlık sayma oranını göstermek için bir alt devrenin kullanılmasına ve bir n ağırlık çarpanının üretilmesine dayanır. n bir tamsayıdır ve gerçekleşen sayma sonucu oluşan bir puls yerine n tane puls eklenir. Böylece anlık yüksek sayma oranı zamanında uygun olan spektrumdaki bir kanala yüksek bir sayma yansıtılır.

Bu yöntem içinde yer alan Harms usulünde işlem için mevcut olan pulslar sayılır fakat sistem meşgul olduğu zaman bu pulslar reddedilir. Böylesi bir sayıcıda reddedilen pulsların sayısı belirlenir ve bir sonraki gerçek olayda bu ağırlık kullanılır. Yüksek sayma

oranlarında daha etkin hale gelen yığılma kayıpları bu usulde dikkate alınmadığından sorunludur. Gerçek puls üreticisi usulü Westphal tarafından geliştirildi. Kabaca puls üreticisi yöntemine benzer ve bunun yanında Harms usulünde yer almayan yükselticinin yığılma pulslarını dikkate almıştır [2].

Serbest kayıp saymasının sorunlarından biri genel ölçüm istatistiğinin geçersiz olmasıdır. Yani Poisson istatistiği bu yöntemde geçersizdir.

1.7.5.5. Sıfır Ölü Zaman Sayması (Zero-Dead Time Counting)

Gama ışını spektrometresinde değişen ölü zaman problemi hatanın iyi bilinen bir kaynağıdır. Böylesi şartlar altında ölü zaman düzeltmeleri, değişen ölü zaman ölçülen radyoizotopu baskın bir şekilde etkilerse doğru olabilir [29,30]. Sıfır ölü zaman düzeltmesi kayıp serbest sayması ile hemen hemen aynıdır. Yani kanal sayısına karşılık gelen olayın belirlenmesi anında spektrometre ölü zamanına bağlı olarak spektrumdaki bir kanala birden fazla ilave olayın eklenmesine dayanır. Aralarındaki fark, Gedcke-Hale [31] işlem zamanına dayalı anlık ölü zamanın belirlenmesindeki yöntemle ilgili olması ile birlikte sıfır ölü zaman saymasında sıfır ölü zaman düzeltmelerinin tamamen sayılaştırılmasıdır. Bu nedenle bu model kullanılarak yapılan düzeltilmiş spektrum Poisson istatistiğini sağlamaz. Bu da sayma düzeltmelerinde bir problem teşkil eder.

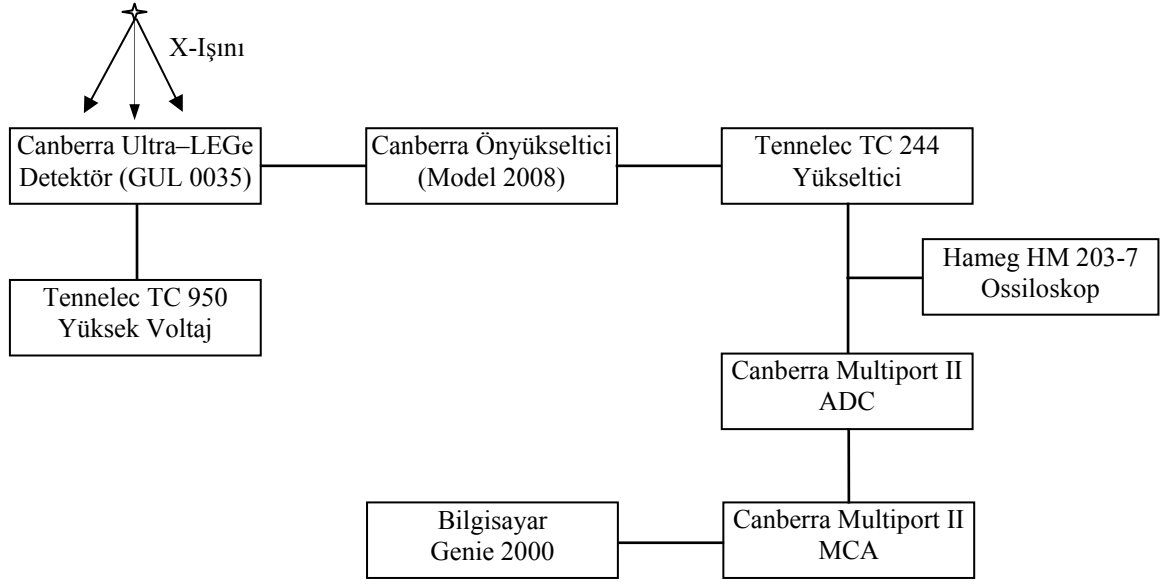
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Deneysel Kurgu

K x-ışını şiddetleri ve yığılma pikleri, Amersham firmasından satın alınan 50 mCi'lik halka radyoaktif bir kaynak olan ^{241}Am 'dan yayınlanan 59,54 keV enerjili fotonların kullanılmasıyla Alfa Aesar firmasından alınan % 99,9 saflıkta demir (Fe), selenyum (Se) ve çinko (Zn) elementleri için ölçüldü. Gama ışını ölçümleri ise enerjileri 81–1332,5 keV arasında değişen ve Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA)'dan satın alınan ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co standart nokta kaynakları ile yapıldı. Sistemin işlem zamanına (Live Time) dayalı analitik yöntem (integral düzeltme) uygulaması için numunelerden yayınlanan K_{α} ve K_{β} fotonlarını saymada 5,9 keV'de 150 eV'lik bir çözünürlüğe sahip Canberra marka aşırı düşük enerjili Ge (Ultra-LEGe) detektörü (GUL 0035 model) kullanıldı. Ayrıca çalışmada önerilen bozulan kaynak yaklaşımı (diferansiyel düzeltme) uygulanması için 1332,5 keV'de 1,9 keV'lik çözünürlüğe ve % 15 bağıl verime sahip Canberra marka HpGe (GC 1519 model) detektörü kullanıldı. Her iki sayma sisteminde ortak olarak Genie 2000 spektroskopi yazılımı, Canberra firmasının ön yükselticisi (model 2008), Tennelec TC 244 spektroskopi yükseltici ve Canberra firmasının multiport II ADC ve MCA modülleri kullanıldı. Ayrıca, tüm pulsların genişliğini ölçmek için Hameg firmasının Hm 203–7 model osiloskobu kullanıldı. Ölçümlerde kullanılan x ve gama-ışını spektrometre sistemi kurgusu Şekil 7'de şematik olarak gösterilmektedir.

K_{α} foto pik alanları, OriginLab firmasının Originpro 7.5 yazılımının multi-Gaussian fonksiyonu modülü ile birlikte polinomik arka plan (background) giderme modülü kullanılarak ölçülmüş spektrumun fit edilmesiyle ayrıştırılmasından sonra pik alanları belirlendi. Ayrıca grafik fit denklemleri bu yazılımın polinomik fit modülü ile elde edildi.

Pile up pikleri sayısını azaltmak için saf Fe, Se ve Zn elementleri kullanıldı. Böylece, pik+pik, pik+kalıntı (continum), kalıntı+kalıntı durumlarından kaynaklanan pile up piklerinin neden olduğu spektrumdaki karmaşıklık azaltıldı ve Fe, Se ve Zn elementlerinin K_{α} pile up pikleri ve alanları kolayca belirlendi.



Şekil 7. Ölçümlerde kullanılan X ve Gama-ışını spektrometre sisteminin blok şeması

2.2. Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi

Yarıiletken detektörün aktif hacmi içerisinde gelen radyasyon ile üretilen iyonizasyon, detektör elektrotları arasında uygulanan elektrik alanı ile taşınan yüklü parçacıkların oluşturulması olarak tanımlanır. İyonize parçacıkların üretilmesi ve toplanması, gelen fotonun enerjisine ve detektör ortamına bağlı rastgele istatistiksel değişimlerin bir konusudur. Öz ayırma sınırlaması, gelen radyasyonu bir elektrik sinyaline çevirme sürecinde de vardır [32]. Çıkış sinyali, yarıiletken x ve gama ışını detektörlerinde saymaların doğru bir şekilde elde edilmesi ve analizinin sağlanması için çeşitli işlemlere maruz bırakılır. Gelen radyasyon tarafından üretilen yüklü parçacıkların toplanması ve işlenmesi için gerekli olan zaman birçok uygulamada önemlidir. Eğer yük toplama zamanı yükselticinin pikleşme zamanı ile karşılaştırılmayacak kadar kısa değil ise düzeltilmiş sinyal sayısında bir kayıp görülecektir [33]. Yük toplama zamanı; detektör geometrisine, ortama, elektrik alana ve detektör aktif hacminde etkileşmenin olduğu noktaya bağlıdır.

Modern enerji dağılımlı x ışını flüoresans (EDXRF) ve gama ışını spektrometreleri, puls işleme elektroniğinin ölçüm zamanı içinde yükselticiye gelen fotonun neden olduğu hatalı sonuçları elimine etmek için yığılma yoklama devrelerini içermesine rağmen mükemmel değillerdir. E_1 enerjili bir pulsü izleyen E_2 enerjili bir puls, yükselticinin pikleşme zamanına, T_p , bağlı bir aralıkta detektöre ulaştığı zaman sonuç ölçümü hem E_1

hem de E_2 'den daha büyük olan bir enerji verir. Yani bu enerjilere sahip pulslar belirlenemez ve böylesi bir olay toplam spektruma bir katkı yapar. İkinci pulstan önceki erteleme T_p 'nin kesrinden büyük olduğunda ölçüm E_1 'den E_1+E_2 'ye uzayan aralıkta yığılma sürekliliğine katkı yapar [34].

Yığılma pulslarını azaltmanın en temel yolu birkaç keps (saniye başına kilo sayma) altında düşük sayma oranlarında çalışmaktır. Bununla birlikte, modern puls işlemcileri pik konumu veya çözünürlüğündeki önemsiz değişimlerle birlikte çok daha yüksek oranlarda veri kaydetme yeteneğine sahiptirler. Eğer toplam pik, pik alanlarının hesaplanmasını etkileyecek şekilde gerçek x veya gama ışını pikine yeteri kadar yakın olursa toplam piki belirleme, belirlenen hayali pikler için faydalıdır, fakat toplam pik şiddetinin ölçümü gereklidir [35]. Toplam pikleri grubunun hepsi, kısaca iki ya da üç pikin bir arada bulunduğu spektrumdaki çizgi enerjilerinin toplamı olan enerjilere ve karşılık gelen ana çizgilerin şiddetlerinin çarpımı ile orantılı olan şiddete sahip bir ana pik ve birçok ikincil pikli tek bir element gibi davranır [36].

Optimize edilen bir spektrometre sistemi deneysel sınırlılıkların verilen bir kurgusu içinde elde edilebilir en iyi enerji çözünürlüğünü sağlar. Sistemi en uygun hale getirme herhangi bir sistemde elektronik donanımın uygun seçimini, çözünürlük uyuşmasının bilgisini ve sayma oranı performansını gerektirir. Detektör, ön yükseltici, yükseltici ve analog dijital çevirici birleşimi radyasyon belirleme sistemi elektroniğinin en kritik parçasıdır. Dünyanın en iyi yükselticisi dahi zayıf sinyal-gürültüyü veya sistemin ön ucunun uygunsuz seçimi ile neden olunan sayma oranı kısıtlamalarını telafi edemeyebilir. Uygun yükselticinin seçimi iyi detektör ve ön yükseltici birleşiminin performansını artırır. Sistem ayırma gücü kaynak ve detektör etkileşimi, detektör-ön yükseltici-yükseltici birleşimi, puls işlemci şekli ve sistem sayma oranı ile belirlenir [32].

Belirli bir detektör sistemi için uygun pikleşme zamanı detektör karakteristikleri ve sayma oranı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Büyük gaz orantılı detektörler 4–16 μ s arasında pikleşme zamanı gerektirir. Koaksiyel detektörler için 4–8 μ s pikleşme zamanı en iyi sonuçları verir. Lityum sürüklenmiş silisyum detektörleri optimum ayırma için 8–24 μ s aralığında pikleşme zamanı gerektirir. Fakat Ultra-LEGe detektörler için en iyi sonuçları veren pikleşme zamanı belirlenmemiştir.

Çalışmanın bu kısmında Tennelec TC 244 spektroskopi yükselticisi bağlı Ultra-LEGe detektörü için uygun pikleşme zamanı belirlendi. Böylece, kantitatif (niceleyici) ve

kalitatif (niteleyici) analizlerde önemli olan sayma kayıpları ve yığılma puls etkileri azaltılabilir.

2.2.1. Tüm Puls Genişliğinin Pikleşme Zamanı ile Değişimi

Yükselticinin 0,5, 0,75, 2, 3, 8 ve 12 μs 'lik pikleşme zamanlarına karşılık gelen tüm puls genişliği Hm 203–7 osiloskop yardımı ile belirlendi. Belirleme işleminde Şekil 8 dikkate alındı. Pikleşme zamanına göre tüm puls genişliğinin grafiği çizildi. Tüm puls genişliği ve pikleşme zamanı arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir fit denklemi elde edildi. Minimum ayırma zamanı, pikleşme zamanı ve tüm pulsların genişliği arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir [32]:

$$T_R \geq \frac{T_W}{T_P} - 1 \quad (40)$$

burada T_R yükselticinin minimum ayırma zamanı, T_W tüm puls genişliği ve T_P yükselticinin pikleşme zamanıdır.

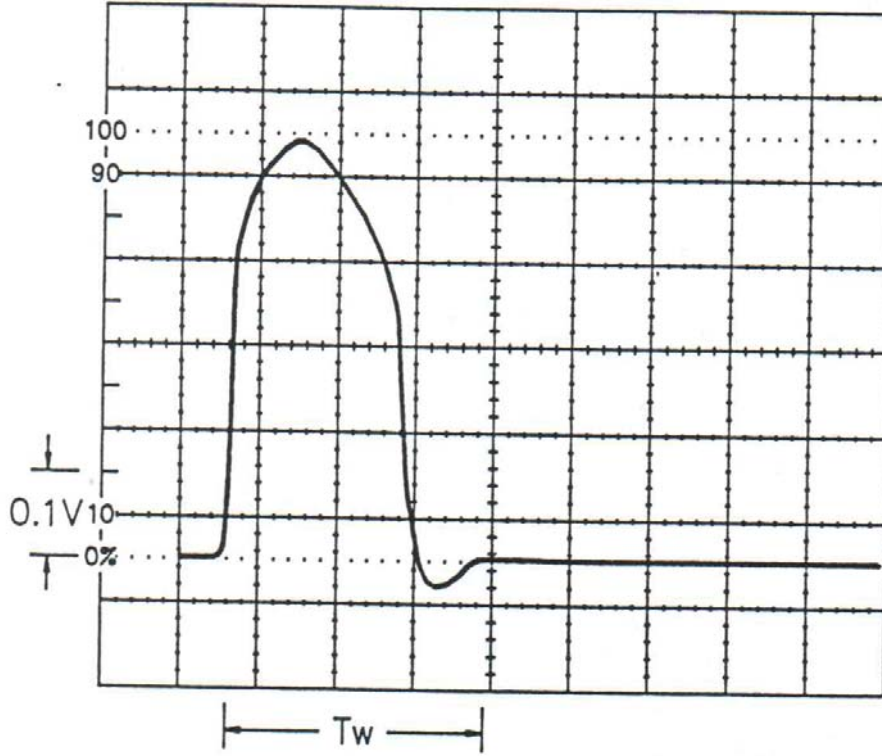
2.2.2. Pikleşme Zamanı ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki

Yükselticinin 0,5, 0,75, 2, 3, 8 ve 12 μs 'lik pikleşme zamanlarına karşılık gelen minimum ayırma zamanı Denklem (40) ile hesaplandı. Daha sonra bu pikleşme zamanına karşılık minimum ayırma zamanı arasındaki ilişkiyi belirlemek için grafiği çizildi ve fit denklemi elde edildi.

2.2.3. Tüm Puls Genişliği ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki

Tüm puls genişliğine karşılık gelen minimum ayırma zamanı Denklem (40)'tan hesaplandı. Daha sonra, tüm puls genişliğine karşı minimum ayırma zamanının grafiği

çizildi ve bu grafikten tüm puls genişliği ile minimum ayırma zamanı arasındaki ilişki bir fit denklemi yardımıyla belirlendi.



Şekil 8. Tüm puls genişliği (T_w) [32].

2.2.4 Sistemin Çıkma Sayma Oranının Belirlenmesi

Sistem verimi, giren olayların sayısının çıkan olayların sayısına oranıdır ve bu verim şöylece belirlenebilir: i) Yükseltici şekillendirme modu ve pikleşme zamanı, ii) yığılma reddetme devresinin minimum ayırma zamanı ve iii) analog dijital çeviricinin çevirme zamanı. Bu üç faktör, sistemde ilave olaylar sürecinin gerçekleşmediği sistemin toplam ölü zamanını, T_D , belirler. Beklenen n çıkma oranı, n_0 girme oranı ile ilişkilidir ve sistemin T_D toplam ölü zamanı içinde bu ilişki Denklem (34) veya (35) ile verilebilir. Sistemin efektif T_D ölü zamanı aşağıdaki kategorilerden birine uyar [32]:

$$T_R > 1,5\mu s + T_C \quad (41)$$

veya

$$T_R < 1,5\mu s + T_C \quad (42)$$

Burada T_C ADC'nin çevirme zamanıdır. Şayet yığılma pulsu reddetme devresinin minimum ayırma zamanı $T_C + 1,5 \mu s$ 'den daha büyük ise, bu durumda sistemin ölü zamanı;

$$T_D = T_P + T_R \quad (43)$$

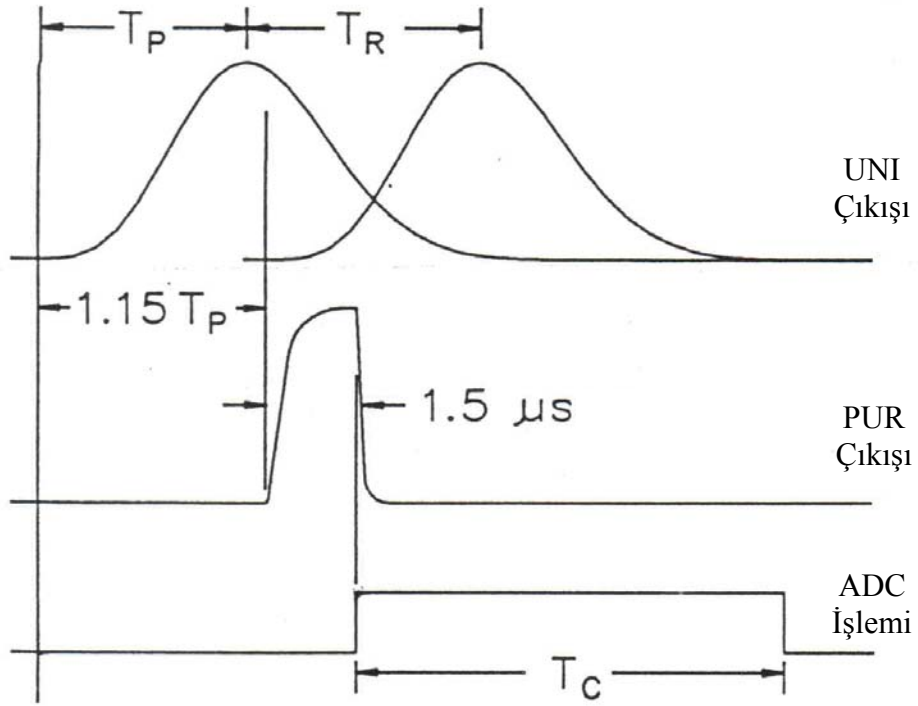
ile verilir. Aksi durumda sistemin ölü zamanı;

$$T_D = T_P + 1,5 \mu s + T_C \quad (44)$$

şeklindedir. Burada $1,5 \mu s$ pile up pulsu reddetme devresi aktif durumda iken ardışık iki pulsu açık bir şekilde ayırmak için yükseltici üretici tarafından yükselticiye eklenen ilave bir zamandır. Bu nedenle bu ilave zaman pulsun ADC'den MCA'ya geçmesi ve yazılım tarafından kaydedilmesi (yaklaşık olarak $0,5 - 2 \mu s$ civarı) için gerekli olan bir zaman olarak dikkate alınabilir [3]. Ölçümlerde 100 MHz elektronik saate sahip Wilkinson türü bir ADC kullanıldı. Bu nedenle ilgili enerji çizgisinin ADC çevirme zamanı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [37]:

$$T_C = \frac{E}{\Delta E} T_{Clock} \quad (45)$$

Burada E çizgi enerjisi, ΔE kanal başına enerji [38] ve T_{Clock} ADC'nin işlem frekansıdır. Denklem (43) ve (44)'de verilen ölü zaman ifadelerini elde etmede kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 9 ile verilmiştir.



Şekil 9. Tipik sistem zamanlaması [32].

2.2.5. Pikleşme Zamanının İşlem Zamanı Düzeltmesine Etkisi

Yükselticiler, yükselticinin pile up pulsu reddetme devresinin ve her bir olay kaybı için ortalama bir puls dizin aralığı sayma zamanının uzatılması ile ADC'nin sayma kayıplarını istatistiksel olarak düzeltten dâhili bir işlem zamanı düzelticisi içerebilir. Düzeltmedeki hata sistemin ölü zamanına ve girme sayma oranına bağlıdır. Bu durumda sayma oranındaki hata;

$$nT_D - n_0T_D \quad (46)$$

ile hesaplanabilir.

2.2.6. Çalışılan Enerji Aralığında Puls Belirleme Etkinliğinin Belirlenmesi

Çalışma enerji aralığında pikleşme zamanlarına karşılık gelen puls belirleme etkinliği belirlendi. Belirleme işleminde Şekil 10'da gösterilen ifadeler dikkate alındı. Puls belirleme etkinliği aşağıdaki formülle hesaplandı [34]:

$$f(E) = 0,5(1 \pm [1 - \exp(-2(E - d)^2 / \pi\sigma^2)]^{1/2}) \quad (47)$$

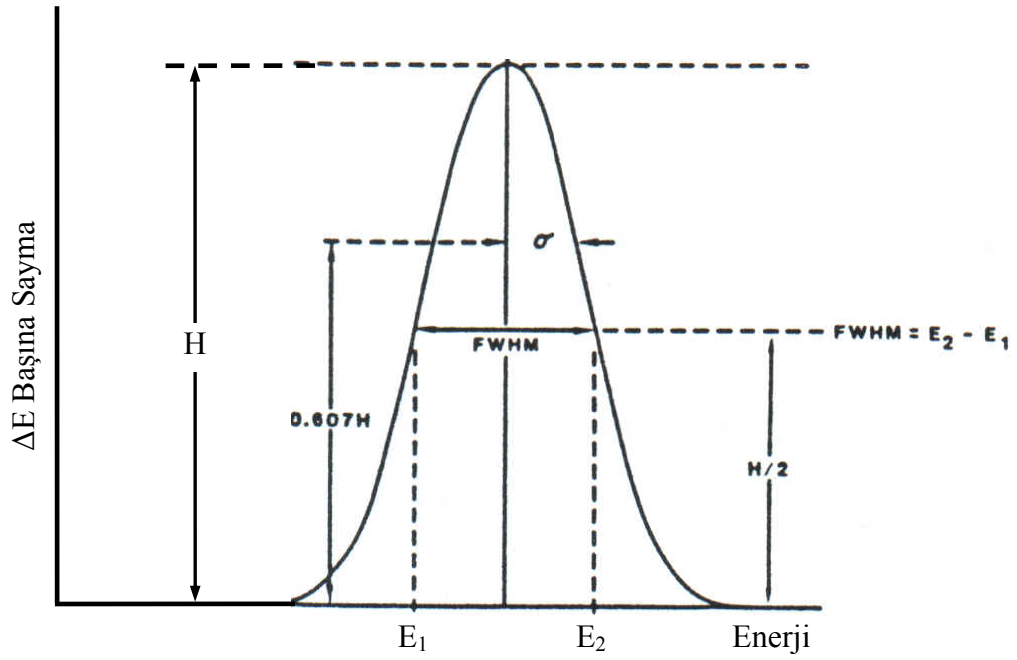
Burada E pulsun enerjisi, d ayırıcı seviyesi ve σ yarı maksimum Gaussian gürültü dağılımının tam genişliğinin 2,355'e bölünmüş durumunu göstermektedir. Ayırıcının d seviyesi;

$$d = \left| \frac{T_p}{0,1 \mu s} \right|^{1/2} R \quad (48)$$

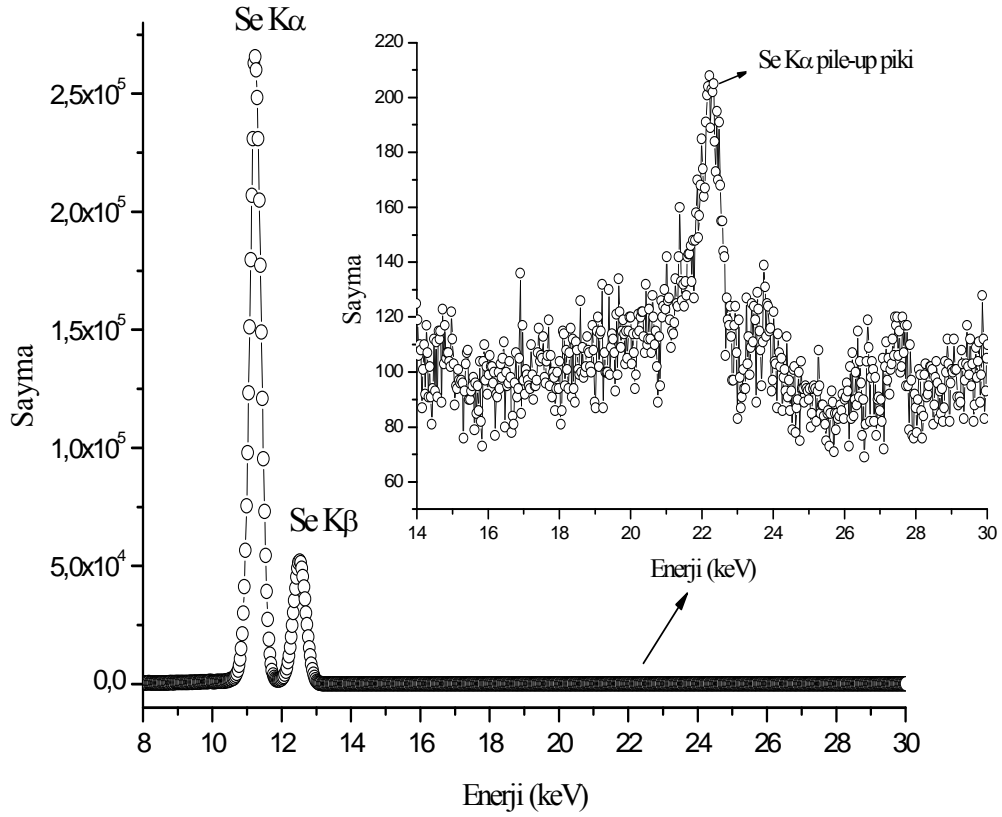
ifadesi ile verilir [32]. Burada R, eV cinsinden sistem gürültü ayırma gücüdür. Aynı zamanda bu ifade, Gaussian modda pulsun yarı maksimumdaki tam genişliğinin yaklaşık olarak yüzde 1,5'idir.

2.2.7. Pikleşme Zamanı ile Yığılma / K_α Puls Oranının Değişimi

Çalışmada, saf Fe, Se ve Zn elementleri kullanıldı. Böylece Fe, Se ve Zn elementlerinin yığılma piklerini kolayca belirleme hedeflendi. Bu nedenle de Fe, Se ve Zn elementlerinin K_α yığılma piki enerjisi bu elementlerin K_α çizgisine karşılık gelen pikin enerjisinin iki katı olarak dikkate alınabilir. Saf Se elementi için tipik K x ışını ve K_α yığılma piki Şekil 11'de görülmektedir. Ayrıca pikleşme zamanına karşı K_α yığılma / K_α oranı belirlendi.



Şekil 10. Tipik Gaussian şekilli spektral çizgi [32].



Şekil 11. Saf Se elementinin tipik K x-ışını ve K α yığılma piki spektrumu

2.3. Sistemin Ölü Zamanı ve Sayma Kayıplarının Belirlenmesi İçin Model

Modern gama ve x ışını spektrometrelerinin çıktısındaki ana sınırlama aktif detektör hacminde iyonize radyasyon ile üretilen yüklerin toplanması ve ardışık olarak kullanılan elektronik modüllerle puls işlemesi için geçen süredir [39]. Tüm detektör sistemlerinde, iki ayrı pulsu iki ayrı olay olarak kaydetmek durumunda olan sayma sisteminin ölü zaman olarak adlandırılan minimum bir toplama zamanı vardır. Bu ölü zaman boyunca, sistem gelen diğer fotonlara karşılık vermediğinden bu olaylar kaybedilir. Çok kanallı puls analizörü veya sayma sistemi kullanıcılarının karşılaştığı ana sorunlardan birisi, analizör ve sayma sisteminin ölü zamanından kaynaklanan sayma kayıplarının sonuçlarını düzeltmektir. Bu problem, bilinen ya da ölçülen toplam araç için gerçek zamanından daha ziyade işlem zamanının tüm sayma çalışmalarında yerine getirilmesi ile otomatik olarak çözülebilir [40].

Sayma sistemlerinin ölü zaman davranışının iki modeli sıklıkla kullanılır: paralyzable ve non-paralyzable. Bu iki model, yalnızca doğru sayma oranı yüksek olduğu zaman farklı olan diğer durumlarda aynı birinci dizin düzeltme kaybı öngörmektedir [33]. Yüksek sayma oranlarında bu modellerin her ikisi uygulanabilir değildir. Bu nedenle ölü zaman kayıpları için düzeltme, veri değerlendirmenin önemli bir görevidir [41].

Nükleer spektrometre ölçümlerinde; puls kayıpları, puls işleme süresince ADC'nin neden olduğu gelen puls başına non-paralyzable ölü zamanı ile geleneksel olarak ilişkilidir. Non-paralyzable, puls işleme boyunca yeni bir pulsun ADC'ye gelmesi ile uzatılmayan ölü zaman periyodu anlamına gelmektedir. Paralyzable olarak adlandırılan sistemler için ölü zaman, en son pulsun ulaşma zaman aralığından başlayarak uzatılır. Ayrıca pile up pulsu, paralyzable ölü zamandan kaynaklanan puls kaybının bir türü olarak yorumlanabilir [42]. Bir T_p pikleşme zamanı aralığı içine düşen ardışık pulslar yığılma pulsu olarak davranır ve bir yığılma pulsu reddetme devresi (PUR) tarafından reddedilen bir puls olarak spektrumdan atılır.

Sayma oranı hemen hemen sabit tutulduğunda ölü zamandan kaynaklanan sayma kayıpları hem paralyzable (extendable, uzatılabilir) hem de non-paralyzable (non-extendable, uzatılmayan) ölü zamanlar için türetilen temel ve basit formüllerle düzeltilebilir [43]. Bununla birlikte, sayma oranı önemli ölçüde değiştiğinde veya dalgalandığında matematiksel formüllere dayalı düzeltmeler zor ve karmaşık olabilmektedir. Bu meselenin üzerinden gelebilmek için, sayma suresi boyunca her an ölü

zaman etkilerinin otomatik olarak telafi edilmesine imkân veren bir yöntem Kawada tarafından önerildi [44]. Bu yöntemde, ölü zamandan ileri gelen sayma kaybına eş sayıda puls ilk dizin yaklaşımında kapı (gating) tekniğinin kullanılması ile rastgele rastlantı pulsları olarak üretilir ve ertelemeyen sonra çıkan puls katarına eklenir [45].

Değişen ölü zaman problemi nükleer spektrometre ölçümlerindeki hataların çok iyi bilinen bir kaynağıdır. Böylesi durumlarda ölü zaman kayıpları, yalnızca değişen ölü zamana bir radyasyon kaynağı baskın bir şekilde neden olursa düzeltilebilir. Çözümler birkaç değişik biçimde sunulur: Ölü zamanı sabitleme [46–48], belki de gerekli olmayan ölü zaman ve sayma etkinliği kaybı ile sonuçlanan sabit bir ölü zamanda problemi çözmeye gibi [29]. Fakat sonuçlar sistem ölü zamanından kaynaklanan sayma kayıpları telafi etmekten uzaktır.

Galushka [49] kaydedilen olayların gerçek bir serisi içine pulsların eklenmesi ile ölü zaman etkisini düzeltmek için bir teknik önerdi ve Müller [49] bu yöntemin geçerliliğini analiz etti. Kayıp serbest sayma tekniği, dijital spektrometreler üretilmeden önce Harms'ın [50] diferansiyel ölü zaman düzeltme yöntemini geliştiren Westphal [51] tarafından önerildi. Sayma kayıpları pile up pulsu reddetme devresi (PUR) ve ADC çevirme zamanından ileri gelen ölü zamanla artar. Sayma kayıplarını telafi etmek için birkaç yöntem önerildi. Bu yöntemlerden biri Ortec firması tarafından üretilen DSPEC^{PLUS}™ dijital spektrometresinde kullanılan “sıfır ölü zaman” yöntemidir. Bu yöntem Pommé tarafından test edildi [39].

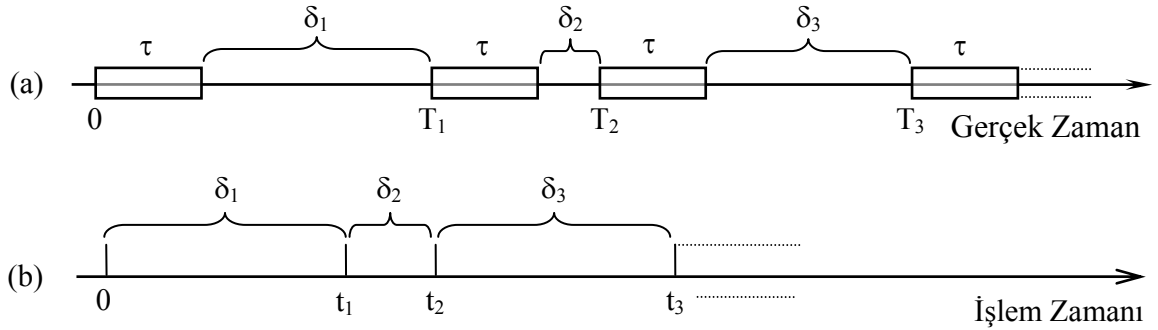
O halde, yalnızca ölü zaman boyunca oluşan sayma kayıplarını telafi etmek nasıl mümkündür? Bizim amacımız orijinal puls sürecini yeniden oluşturmak değildir. Amacımız dikkate alınan zaman aralıkları için asıl sayma oranının veya asıl olayların sayısının güvenilir bir tahminini elde etmektir. Bunu yapabilmek için ya ölü zaman süreci başına ortalama kayıplar için doğru bir değere ya da bireysel düzeltmelere ulaşabilmek için yardım edecek bir yöntem gereksinim duyarız.

Çalışmanın bu kısmında, bir radyoaktif kaynak ya da bir pulserin kullanılması yerine analitik bir düzeltme yöntemi geliştirildi. Bu düzeltme için, pile up, paralyzable ve non-paralyzable puls kaybetme mekanizmalarının üçünü birlikte içine alan bir program kodlandı. Bu düzeltme toplam (integral) bir düzeltme olarak ifade edilebilir ve sistemin toplam işlem “live time” zamanına bağlı bir ölçme prensibine dayalıdır. Ayrıca bu düzeltme yöntemi sistem ölü zamanının saymada baskın olmadığı sayma oranlarında ideal olduğu ifade edilebilir. Ek olarak işlem zamanı prensibinin matematiksel özü integral

matematiktir. Bu nedenle integral matematik yalnızca sabit (durağan) Poisson süreçlerinde (zamanla değişmeyen) uygulanabilir. Dikkat edilmelidir ki uzun yarı ömürlü radyoizotoplarla yapılan deneysel çalışmalarda zamanla değişmeyen Poisson süreci geçerliliğini korumaktadır.

2.3.1. Teorik Arka Plan

Galushka'nın çalışmasında [49], buradaki yeni düzene benzer inşa edilen ve ölü zaman yokluğunda beklenen olayların sayısını doğrudan elde edilmesinde kullanılan bir yöntem bir sayıcının gerçek çıktısı için gerçek zamanda ölü zaman kayıplarını telafi için tanımlanır. Bu, kaydedilen gerçek serinin içerisine ilave pulsların ilştirilmesi ile başarılı. Böylesi bir durumda olayların gözlenen dizinlerini (Şekil 12'ye bakınız) T_0, T_1, T_2, \dots ulaşma zamanları ile karakterize edilir [52]. Bu ardışık aralıklar en azından uygulanan T_p pikleşme zamanıyla ayrılır. Eğer $T_0 = 0$ olarak ele anılırsa bu durumda k tane puls gecikmesizin oluşur:



$$\begin{aligned}
 T_k &= T_1 + T_2 + \dots + T_k \\
 &= (T_D + \delta_1) + (T_D + \delta_2) + \dots + (T_D + \delta_k) \\
 &= kT_D + \sum_{j=1}^k \delta_j \quad \text{için } k \geq 1
 \end{aligned} \tag{49}$$

Burada δ_j ADC tarafından çevrilen her bir pulsun genişliği ve T_D yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan sabit ölü zamandır. Bu nedenle pikleşme zamanı sistem ölü zamanından ileri gelen sayma kayıplarının hesaplanmasında önemlidir. Böylece sistem ölü zamanı ADC çevirme zamanına pikleşme zamanının eklenmesi ile belirlenir. Sistem ölü zamanını belirlemek için ilk olarak minimum ayırma zamanı belirlenmelidir. Çalışmada pikleşme zamanı ve minimum ayırma zamanı arasındaki ilişki aşağıda verilen şekliyle tespit edildi:

$$T_R = B_2 T_p^2 + B_1 T_p + A \quad (50)$$

burada A, B_1 ve B_2 katsayıları sırasıyla $3,73746E-6$, $-0,03894$ ve $5067,18198$ 'dir.

Sistem ölü zamanından kaynaklanan sayma kayıpları için sayma oranları ile ilişkili iki yaklaşım mümkündür. Geleneksel düzeltme formülleri ilk yöntemde kullanılır: bu gözlenen sayma oranlarına dayanır ve ölçme sürecinin sonunda uygulanır. İkinci yöntemde ise bunun tersine görünüşte ölçüm sonucunun veya hesaplanan sayma oranının bilinmesini gerektirmeyen kayıplar için anında düzeltme ya da telafi edilmesini öngören farklı bir yolla çalışmaktadır. İkinci yöntemde, T_D uzunluğundaki bir ölü zamanda saymaların belirli bir k sayısının kaybedilmesi olasılığının tahmin edilmesi mümkündür. Poisson olasılığı ile ilgilendiğimiz için bu olasılık aşağıdaki şekilde verilebilir [3,45]:

$$P_k = \frac{(nT_D)^k}{k!} e^{-nT_D} \quad (51)$$

Burada n her bir kanaldaki sayma oranıdır. Her bir ölü zamandan kaynaklanan beklenen L sayma kaybı aşağıdaki ifade ile verilir:

$$L = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k = e^{-nT_D} \sum_k \frac{(nT_D)^k}{(k-1)!} = nT_D \quad (52)$$

2.3.2 Yöntem

Çalışmanın bu adımında sistemin ölü zamanından ileri gelen kayıpları telafi etmek için Compaq Visual Fortran 6 derleyici yardımıyla Fortran 77 programlama dilinde bir sayma düzeltmesi (SAYDUZ) programı kodlandı. Program öncelikle sistemin toplam ölü zamanını belirler. Belirlenen bu ölü zaman ile aşağıda önerilen yöntemle sayma düzeltmesi yerine getirildi.

Şekil 13'te verilen süreç sayma sisteminin ölü zamanını belirlemek için kullanıldı. Sistemin pikleşme zamanına karşılık gelen bir minimum ayırma zamanı vardır. Sistemin pikleşme zamanı ile ilgili minimum T_R ayırma zamanı iki pulsu birbirinden ayırma zamanıdır. Bu minimum ayırma zamanı Denklem (40) ve (50) ile verilebilir. Minimum ayırma zamanının ADC çevirme zamanından daha büyük olup olmadığı önemlidir. Bu nedenle, minimum ayırma zamanı yalnızca yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olan Denklem (50) ile hesaplanır. Daha sonra minimum ayırma zamanı Denklem (41) ve (42) ifadesi sonuçları ile karşılaştırılır ve duruma göre ölü zaman Denklem (43) veya (44)'de göre belirlenir. Böylece her bir kanalda mevcut olan her bir saymadan ileri gelen ölü zaman belirlenir. Bu durumda, her bir kanaldaki ölü zaman (TDT) Denklem (53) ile verilir:

$$TDT = Sayma * T_D \quad (53)$$

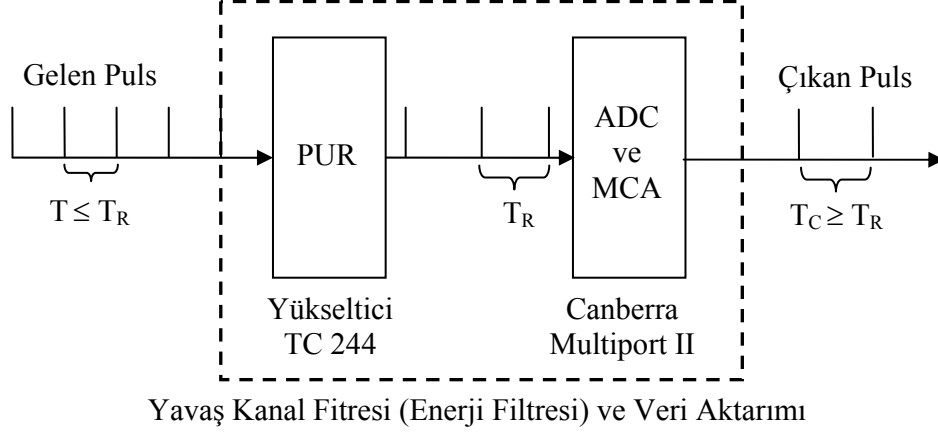
Sayma sisteminin toplam ölü zamanı (STDT) kanalların tümü üzerinden Denklem (54) ile hesaplanır:

$$STDT = \sum_{i=\text{kanal sayısı}} (TDT)_i \quad (54)$$

Her bir kanaldaki sayma oranı ise

$$n = \frac{Sayma}{T_{Live}} \quad (55)$$

ifadesi ile verilir. Burada T_{Live} sistemin işlem zamanıdır. Denklem (52) dikkate alındığında sistemin ölü zamanından kaynaklanan toplam sayma kaybı (L) aşağıdaki formül ile elde edilir:



Şekil 13. Ölü zaman düzeltme yöntemi için göz önünde bulundurulmuş puls işleme süreci

$$L = n * STDT \quad (56)$$

Böylece de düzeltilmiş sayma Denklem (57) ile verilebilir:

$$CC = Sayma + L \quad (57)$$

2.4. Net Pik Alanlarının Belirlenmesi

Spektrum ölçümlerinde diğer bir sorun net pik alanının belirlenmesidir. Her radyasyon ölçüm yazılımlarında net pik alan belirleme için bir modül (alt yazılım) bulunmaktadır. Radyasyon belirlemede kullandığımız Genie 2000 yazılımında da böyle bir modül var olmasına karşı sistem ölü zamanından ileri gelen sayma kayıplarının telafi edilmesinden sonra elde edilen spektrumu tekrar Genie 2000 yazılımında açıp net pik alanlarını belirleme imkanı mevcut değildir. Bu nedenle de net pik alanının belirlenmesi bir problem teşkil etmektedir. Bu problemi çözebilmek için net pik alanını hata oranı ile hesaplayan bir kaynak kodu da, bu çalışmanın içeriğinde geliştirildi. Çalışmanın bu adımında sayma süresince elde edilen spektrumun net alanını ve sistemin ölü zamanından

ileri gelen kayıpları telafi ettikten sonra oluşan spektrumun net alanını belirlemek için bir program algoritması geliştirildi. Bu doğrultuda Compaq Visual Fortran 6 derleyici yardımıyla Fortran 77 programlama dilinde ALAN programı kodlandı.

Bu kodun geliştirilmesinde yine Genie 2000 yazılımı net alanı belirleme algoritması ve yarı maksimumdaki tam genişliği belirlemede (FWHM) Canberra pik çözünürlüğü belirleme algoritması üzerinde bazı düzeltmeler yapılarak dikkate alındı. Böylece her iki alan hesaplanmasında mümkün olan en fazla yakınlık sağlanmaya çalışıldı.

2.4.1 Kod Arka Planı

Tek bir piki içeren pik bölgesinin belirlenmesi ve arka plân ve net alanın hesaplanması spektrometre çalışmalarında önemlidir. Herhangi bir pik bölgesi araştırma algoritmasındaki gereklilik bir fotopik altındaki tabii fon (background) belirlenmesinin güvenilirliğidir. Bu nedenle de güvenilir bir arka plân belirleme algoritması önem arz etmektedir. Güvenilir bir arka plân algoritma oluşturmada öncelik pikin yarı maksimum tam genişliğinin (FWHM) güvenilir bir biçimde belirlenmesidir.

H yüksekliğine sahip bir pikin yarı maksimumdaki tam genişliği olan FWHM'ye karşılık gelen puls yüksekliği $H/2$ olacaktır. Spektrumda bu $H/2$ yüksekliğine karşılık gelen pikin sağ ve sol tarafında olmak üzere iki enerji değeri (veya kanal) söz konusudur. Eğer spektrumda bu pikin düşük enerjili kısmının enerjisi E_1 ve yüksek enerjili kısmının E_2 ise yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) enerji cinsinden

$$FWHM = E_2 - E_1 \quad (58)$$

ile verilir. Kanal cinsinden bu genişliğin bulunması gerektiğinde ise tüm spektrumun enerji kalibrasyonundan yararlanır. Bu durumda spektrumun enerji kalibrasyonu lineer olarak aşağıdaki ifadeyle verilebilir:

$$E = a * Kanal + b \quad (59)$$

burada a ve b değerleri kalibrasyon katsayılarıdır. Denklem (59)'dan yararlanıldığında E_1 için

$$E_1 = a * Kanal_1 + b \quad (60)$$

ve E_2 için

$$E_2 = a * Kanal_2 + b \quad (61)$$

ifadeleri yazılabilir. Böylece FWHM

$$FWHM = a * (Kanal_2 - Kanal_1) \quad (62)$$

ile ifade edilebilir. Buradaki a ifadesine dönüştürme katsayısı denir ve bu kanal başına enerji olarak tanımlanır [38]. Buradaki FWHM ifadesini a ile çarpmadığımızda bu ifade enerjiden bağımsız olur ve sadece sayısal bir anlam içerir. Böylece ilgilenilen pik bölgesi FWHM komşuluğunda sınırlandırılmış olur.

Tabii fona başlıca katkı yapan iki durum numunenin bulunduğu ortamdaki çevresel arka plân ve analiz edilen bölgeden daha yüksek enerjiye sahip piklerinden gelen Compton arka plânıdır. Üçüncü bir arka plân katkısı analiz edilen fotopikten gelen katkı olarak düşünülmelidir. Detektör içinde birçok etkileşmeye maruz kalan gama ışınlarını varsaydığımızda üçüncü bir katkı yoktur. Bu ya spektral fotopike katkı yapan fotoelektrik etkileşmelerin olduğu ya da fotopikin altında önemli olan maksimum enerjiye sahip Compton etkileşmelerinin olduğu etkileşmeler içindir. Diğer taraftan, gama ışınları birden daha çok etkileşmeye maruz kalırsa bu durumda çoklu Compton olayları fotopikin hemen altındaki kanallara katkıda bulunabilir. Genel olarak yüksek ölçekte pik/arka plân oranlı fotopikler için görünür olduğundan bu çoklu Compton olayları pikin sol tarafındaki arka plândan önemli ölçüde daha düşük olan sağ taraftaki arka plâna sahip piklere yol açar. Bu durum herhangi bir yerel arka plân eğimine yol açar [53].

Herhangi bir kanalda “adım tabii fonu”da denilen bu tabii fon hesaplamak için pik bölgesinde aşağıdaki analitik fonksiyon kullanılır [53]:

$$B_i = L_{ort} + \frac{\sum_{j=L}^i Y_j}{\sum_{j=L} Y_j} * (R_{ort} + L_{ort}) \quad (63)$$

$$L_{ort} = \frac{\sum_{i=L-N+1}^L Y_i}{N} \quad (64)$$

$$R_{ort} = \frac{\sum_{i=R}^{R+N-1} Y_i}{N} \quad (65)$$

Burada i hesaplanacak tabii fonun bulunduğu kanal, L pik bölgesinin sol sınırını tanımlayan kanal, R pik bölgesinin sağ sınırını tanımlayan kanal, N ortalama arka plânı hesaplamada kullanılacak kanalların sayısı, L_{ort} pikin sol tarafındaki ortalama tabii fon, Y_j j kanalındaki toplam sayma ve B_i i kanalı için hesaplanan tabii fondur. N değeri öngörülen FWHM'nin bir yarısına eşittir. Toplam B arka plânı ilgilenilen tüm pik bölgesi üzerinden B_i 'lerin toplamıdır:

$$B = \sum_{i=L}^R B_i \quad (66)$$

Pik bölgesindeki G toplam sayma, ilgilenilen tüm pik bölgesi üzerinden her bir kanaldaki saymaların toplamıdır ve

$$G = \sum_{i=L}^R Y_i \quad (67)$$

ile verilir. Böylece her bir kanaldaki net sayma

$$P_i = Y_i - B_i \quad (68)$$

ile verilir. Bu durumda net pik alanı ilgilenilen tüm pik bölgesi üzerinden P_i 'lerin toplamıdır.

$$P = \sum_{i=L}^R P_i = G - B \quad (69)$$

Net pik alanındaki belirsizlik aşağıdaki ifadeyle verilir [53]:

$$\Delta P^2 = G + \left[\frac{R-L+1}{2N} \right] * B \quad (70)$$

Bu belirsizliğe karşılık gelen yüzde hata aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\%hata = \frac{\Delta P}{P} * 100 \quad (71)$$

2.4.2. Algoritma

İlgilenilen pik alanının FWHM'sini belirlemek için aşağıda verilen algoritma kullanılmıştır [38]. Burada belirlenen FWHM kanal sayısı cinsinden ifade edilmiştir ve belirleme esnasında Şekil 10 göz önünde bulundurulmuştur:

- 1- çizgi enerjisine karşılık gelen pikin kanalı belirlenir,
- 2- belirlenen bu kanaldaki sayma sayısı H yüksekliği olarak tespit edilir,
- 3- tespit edilen bu saymanın yarısı hesaplanır (H/2),
- 4- pikin sol kenarında FWHM noktasının hemen altındaki kanaldaki sayma belirlenir (sayma < H/2),
- 5- pikin sol kenarında FWHM noktasının hemen üstündeki kanaldaki sayma belirlenir (sayma ≥ H/2),
- 6- 5'te belirlenen kanalın kanal numarası tespit edilir,
- 7- pikin sağ kenarında FWHM noktasının hemen altındaki kanaldaki sayma belirlenir (sayma < H/2),
- 8- pikin sağ kenarında FWHM noktasının hemen üstündeki kanaldaki sayma belirlenir (sayma ≥ H/2),
- 9- 8'de belirlenen kanalın kanal numarası tespit edilir.

Daha sonra bu algoritma ve Gaussian dağılımın pik yüksekliği ile ilişkisi dikkate alınarak aşağıda verilen bağıntı yazılabilir ve bu bağıntı kullanılarak ilgilenilen kanalın FWHM'si hesaplanabilir:

$$FWHM = (9-6) + \frac{5-H/2}{5-4} + \frac{8-H/2}{8-7} \quad (72)$$

Belirlenen bu FWHM den yola çıkarak ilgilenilen net pik alanının hesaplanabilmesi için Genie 2000 yazılımının algoritmasına bağlı kalınarak aşağıda verilen algoritma geliştirilmiştir:

- 1- FWHM genişliğinin yarısı hesaplanır,
- 2- pik alanının düşük enerjili kısmı sınırı, pik kanal sayısından FWHM çıkarılarak belirlenir,
- 3- pik alanının yüksek enerjili kısmı sınırı pik, kanal sayısına FWHM eklenerek tespit edilir,
- 4- tabii fon hesaplanmasında kullanılacak ilave kanal sayısını belirlemek için 1 ifadesindeki değer 2'den çıkarılır,
- 5- tabii fon hesaplanmasında kullanılacak ilave kanal sayısını belirlemek için 1 ifadesindeki değer 3'deki değerle toplanır.

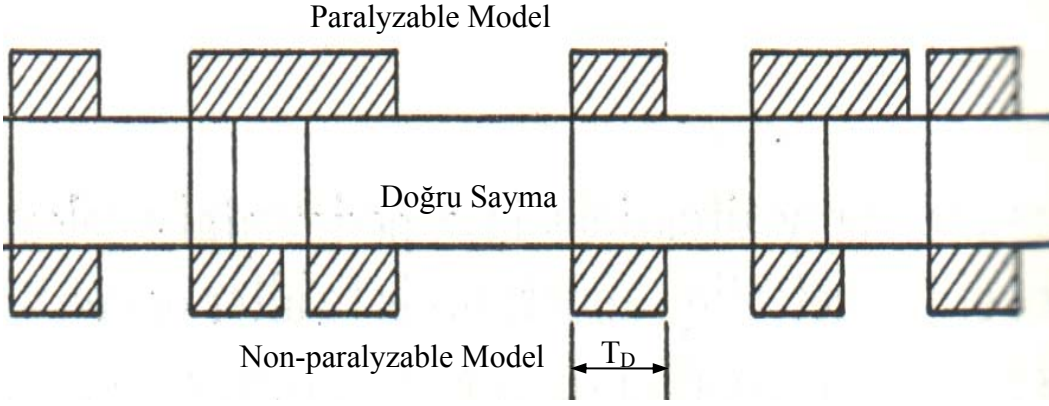
Belirlenen pik ile ilgili bu sınırlamalardan sonra (63)-(69) denklemleri dikkate alınarak net pik alanı hesaplanabilir.

2.5. Sistemin Gerçek (Doğru) Sayma Oranının Belirlenmesi

Hemen hemen tüm detektör sistemlerinde iki ayrı pulsun iki farklı olay olarak kaydedilebilmesi bu iki pulsun birbirinden ayrılmasını gerektirir. Ölü zaman olarak ifade edilen bu durum detektörün kendisi ve sayma sisteminde kullanılan elektronik aygıtlar ile belirlenir. Bu ölü zaman periyodunda gelen saymalar kaybedilebileceğinden sistemin birim zaman başına sayması olarak ifade edilen sayma oranında bir azalmaya neden olur. Bu ölü zamandan kaynaklanan sayma kayıpları yüksek sayma oranlarına çıkıldıkça fazlalaşır. Bu nedenle uygun sayma oranının belirlenmesi ve bu doğrultuda gerçek sayma oranlarının belirlenmesi öneme haiz bir konu olarak karşımıza çıkar.

Sayma sistemlerin ölü zaman davranışının iki modeli sayma oranı düzeltmelerinde çokça kullanılmaktadır: paralyzable ve non-paralyzable [3]. Paralyzable modelde iki ardışık doğru olaylar arasında en azından bir T_D zaman aralığı olmadıkça ikinci bir çıkış pulsu sağlamak mümkün değildir. İlk olaya bir T_D cevap zamanı boyunca kullanılan elektronik aygıtın geri alınması tam geri alma gerçekleşmeden önce oluşan ek herhangi bir doğru olayla ek bir T_D zaman ile daha fazla uzatılır. Bu modelde T_D zamanının hemen

başındaki ve hemen sonundaki olaylar kaydedilir. Non-paralyzable modelde bir T_D ölü zamanı boyunca oluşan olaylarla herhangi bir şekilde etkilenmeyen elektronik aygıt bulunur. Yani aygıt her bir kaydedilen olaydan sonra bu ölü zamanı kadar bir süre işlemsizdir [55]. Bu modeller Şekil 14’te gösterilmektedir.



Şekil 14. Paralyzable ve non-paralyzable modellerinin davranışları [55].

Bu iki modelin idealleştirilmiş davranışı ifade ettiği varsayılır. Her iki modelde detektörün işlem zamanı boyunca oluşan her bir doğru olay sabitlenmiş bir T_D ölü zamanında gerçekleştiği varsayılır [3]. Bu varsayım yapılan çalışmalar bölümünün 2.3 kısmında vurgulanan durumlar göz önüne alındığında yalnızca yükseltici tarafından uygulanan ve yükselticinin pikleşme zamanına bağlı ölü zaman halinde geçerlidir. Oysa bir sayma sistemi pulsun enerji değerini belirleyen bir analog dijital çeviricide (ADC) içerir. ADC’ler bu ölü zamanı değişken olarak üretmektedir. Bu durumda sabit bir ölü zaman ifadesi alınarak yapılan modellemelerde tam bir sayma oranı düzeltilmesi yapılamayacağı açıktır. Ayrıca modern sayma sistemleri paralyzable, non-paralyzable ve pile up pulsu reddetmeyi içeren elektronik aygıtlardan oluşmaktadır [56]. Bunlardan son ikisi yükseltici’de birlikte bulunurken ilki ADC’ye karşılık gelmektedir.

Paralyzable ve non-paralyzable modeller aynı ilk dizin kayıplarını öngörürken gerçek olay oranları yüksek olduğunda öngörülerini farklılaşmaktadır. Bu modeller idealleştirilmiş sistem davranışının uç noktalarını teşkil eder ve gerçek sayma sistemleri genelde bu uçların arasında ortalama bir davranış gösterir. Belirli bir sayma sisteminin detaylı davranışı detektörün kendisinde meydana gelen fiziksel süreçler ve puls işleme ve kaydetme

elektroniğinden kaynaklanan gecikmelere bağlıdır. Non-paralyzable modelde detektörünün ölü zamanı tüm zamanın kesri olarak $n \cdot T_D$ çarpımı ile basitçe verilir. Bu yüzden doğru olayların kayıp oranı $n_0 \cdot n \cdot T_D$ ile verilir. Buna karşılık $n_0 - n$ de kayıp oranı için diğer bir ifade olmasından dolayı non-paralyzable durumunda doğru etkileşme oranı (34) denklemi ile verilir.

Paralyzable durumlarda ölü zaman her zaman sabit bir değerde olmadığından aynı tartışma yapılamaz. Bunun yerine T_D 'yi geçen doğru olaylar arasındaki zaman aralıklarında oluşan oranlarla özdeş olan n değeri dikkate alınır. n_0 ortalama oranında oluşan rastgele olaylar arasındaki dağılım, birinci dizin Poisson dağılımının bir $[T_D, \infty]$ aralığında T üzerinden integralin alınmasıyla ikinci dizin Poisson dağılımına karşılık gelir. Yani bu durum

$$P_2(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} P_1(T) dT = \int_{\tau}^{\infty} n_0 e^{-n_0 T} dT = e^{-n_0 \tau} \quad (73)$$

ile verilir. Bu dağılımın doğru n_0 sayma oranı ile çarpılmasıyla bu tür aralıklarda oluşan oran (35) denklemi ile belirlenir:

Non-paralyzable model, gözlenen sayma oranı ve tek değişkenli ölü zaman terimlerine doğru sayma oranları için yakın bir çözüm sağlayabilmesine rağmen $n \cdot T_D$ 'de bir tekilliğe sahip olması ve bu nedenle n_0 sonsuza gittiğinde $1/T_D$ limitinde maksimum bir gözlenen sayma oranına gitmesi bir problemdir. Paralyzable model ise yüksek sayma oranlarına doğru gidildikçe gözlenen sayma oranını sıfır verir ve bu modelin açık bir çözümü yoktur ve ancak bazı yaklaşımlarla sadece soyut çözümler yapılabilir [27].

Yüksek sayma oranlı durumların altında detektör, yükseltici ve analog dijital çeviricilerin doyma etkilerinden ileri gelen sayma kayıpları ile ilgili hemen hemen hiç yok denecek kadar az bir bilgi vardır [57]. Yüksek enerjide veya nötron alanında ışıdamalı bir detektörün sayma davranışını araştırmak için deneysel ve teorik yaklaşımlar kullanılarak paralyzable tipli ölü zaman için doyma etkisi ile ilgili böylesi bir çalışma Hashimoto ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [58]. Özetle yapılan bu çalışmanın belirli bir detektör ve elektronik elemanlara sahip sayma sistemlerinde var olan ölü zaman tipleri için bir doyma etkisi çalışmalarında öncü olacağı söylenebilir.

Çalışmanın bu kısmında önerilen bozunan kaynak yaklaşımı diferansiyel matematiğe dayalı ölü zaman ve sayma oranı düzeltmelerini içermektedir. Bu düzeltme biçimi sistem ölü zamanının sayma üzerinde baskın olduğu sayma oranlarında idealdir. Ayrıca diferansiyel matematik zamanla şiddeti değişen Poisson süreçlerinde doğru bir şekilde uygulanabilir. Buna ek olarak yarı ömrü çok kısa olan radyoizotoplarla yapılan deneylerde bu Poisson sürecinin kullanılması daha doğrudur.

2.5.1. Teorik Arka Plan

1910 yılında Bateman kısa yarı ömürlü olmayan çekirdekler veya kısa süreli deneylerde göz ardı edilebilir olan azalmaya sahip bir kaynaktan t süresince ayrılan N atomlarının olasılığı için kendisinin meşhur formülünü türetti [59]. Bateman'a göre bu olasılık

$$P_N = \frac{(ft)^N e^{-ft}}{N!} \quad (74)$$

ile verilir ve burada f birim zaman başına ayrılan parçacıkların ortalama sayısıdır. Sonra Bortkiewicz bu formülü bozunan bir kaynağa uyguladı. Daha sonrada Ruark ve arkadaşları özel durumlar için Bateman ve Bortkiewicz formüllerini veren olasılığının çok daha geniş bir aralığını kapsayan diferansiyel bir denklem önerdiler [60, 61]. Bu aralıkların her bir durum için başlıca problem (0,t) aralığında oluşan N ayrılmaları ifade eden $P_N(0, t)$ olasılığını belirlemektir. Bu işlemden sonra $P_N(0, t)$ ifadesi ile uyumlu diferansiyel denklemi elde etmek için 0 ve t+dt arasındaki N olayların olasılığı iki terimin toplamı olduğuna dikkat edilmelidir (bu iki olay birbirinden bağımsız olduğundan): 1) (0, t) aralığında N-1 olayının olma olasılığı kere (t, t+dt) arasında bir olayın olması olasılığı; 2) (0, t) aralığında N olayının olması olasılığı kere (t, t+dt) aralığında hiçbir olayın olmama olasılığı [61]. Böylece

$$P_N(0, t + dt) = P_{N-1}(0, t) f_{N-1} dt + P_N(0, t) (1 - f_N dt) \quad (75)$$

veya

$$\frac{dP_N}{dt} = f_{N-1}P_{N-1} - f_N P_N \quad N = 1, 2, \dots, \quad (76)$$

ifadeleri yazılabilir. Eğer f , yalnızca t 'ye bağlı ve t 'nin bilinen bir fonksiyonu ise $(t, t+dt)$ zamanındaki bir olay için (76) ifadesi

$$\frac{dP_N}{dx} = P_{N-1} - P_N \quad (77)$$

haline döner. Burada

$$x = \int_0^t f(t) dt \quad (78)$$

şeklinde tanımlıdır. O halde (77) ifadesinin çözümü

$$P_N(0, t) = \frac{x^N e^{-x}}{N!} \quad (79)$$

ile verilebilir.

2.5.2. Sayma Oranı Modeli

Kurbatov ve arkadaşları tarafından istatistiksel yaklaşım kullanılarak Geiger-Muller sayıcıları için bir düzeltme önerildi [62]. Kaynaktan yayınlanan fotonların tümünün detektör tarafından yakalandığını ve sayma sistemine kayıpsız gönderildiğini varsayalım. $(t-T_D, t)$ aralığında kaynaktan bir fotonun yayınlanma olasılığı $P(t)$ olsun. Bu durumda $(t, t+dt)$ aralığı boyunca detektör tarafından yakalanan ve sayma sistemine gönderilen

fotonların olasılığı $a(t)dt$ olacaktır. Burada $P(t)$, t 'nin sürekli bir fonksiyonudur [62]. Detektör tarafından bir fotonun alınıp sayma sistemine gönderilmesi için gerek ve yeter şartlar şu şekilde ifade edilebilir:

- 1) Bir foton ($t, t+dt$) zaman aralığında detektör tarafından sayma sistemine gönderilir.
- 2) ($t-T_D, t$) aralığında sayma sisteminde herhangi bir sayım olayı meydana gelmez.

Yukarıdaki 1 ve 2 olayları birbirinden bağımsız olaylar oldukları için dt zamanında bir saymanın gerçekleşme olasılığı $[1-P(t)]a(t)dt$ ile verilir [62]. Bu durumda ($t-T_D, t$) aralığında yalnızca bir saymanın gerçekleşebilmesi için bu aralıktaki bir fotonun olasılığı [62]

$$P(t) = \int_{t-\tau}^t [1-P(x)]a(x)dx \quad (80)$$

ile verilebilir. $1-Q(x) = P(x)$ dönüşümü dikkate alındığında

$$Q(t) = 1 - \int_{t-\tau}^t Q(x)a(x)dx \quad (81)$$

ifadesine ulaşılır. Ayrıca (81) denklemi

$$Q'(t) = Q(t-\tau)a(t-\tau) - Q(t)a(t) \quad (82)$$

biçiminde yazılabilir. (80) ve (82) denklemleri (77) ve (78) denklemleri ile benzerdir. Sıfır zamanda N_0 tane atom içeren ve λ bozunma sabitine sahip bir radyoaktif çekirdekte artan N_0 değeri ile f , $N_0 e^{-\lambda t} \lambda$ değerine ulaşır [61, 63]. Bu durumda ölü zaman olmadan t zamanında detektöre ulaşan fotonların beklenen sayısı, (78) denklemi göz önünde bulundurulduğunda,

$$C(t) = \int_0^t N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (83)$$

ile elde edilir. Mukoyama [64] bu ifadeye detektör verimi ε ve radyoaktif çekirdeğin gama enerjisinin γ dallanma oranda ekleyerek

$$C_1(t) = \varepsilon \gamma N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (84)$$

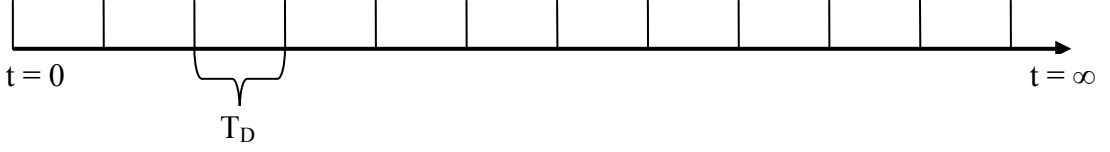
ifadesini türetti. Burada dikkate alınması gereken faktörlerden biride kaynaktan çıkacak fotonların detektör kristali ile etkileşme yapabilmesinin bir ölçüsü olan katı açıdır [61]. Ölçüm süresince geometri değişmeyeceğinden Ω katı açısı sabit olarak kalır. Bu durumda (84) denklemi

$$C_2(t) = \varepsilon \gamma \Omega N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (85)$$

şeklinde tekrar düzenlenebilir. Burada $A_0 = \varepsilon \gamma \Omega N_0$ tanımı yapıldığında

$$C_2(t) = A_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (86)$$

ifadesi bozulan bir kaynak için $[0,t]$ aralığında detektöre ulaşan fotonların sayısını verir. Buraya kadar yapılan çıkarımları göz önünde bulundurduğumuzda oluşturulan modelimizi bozulan kaynak yaklaşımı ile şu şekilde oluşturabiliriz. Bu yaklaşımda her bir dikkate aldığımız yalnızca yükseltici, yalnız analog dijital çevirici ve hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden oluşan sistem bir bozulan kaynak gibi düşünülebilir. Bu durumda radyoaktif kaynaklarda $t = 0$ anında N_0 tane parçacık durumuna benzer olarak sadece yükselticinin, sadece analog dijital çeviricinin ve hem yükseltici hem de analog dijital çeviricin maksimum sayma sayısı olarak bunu ifade edebiliriz.



Şekil 15. Sayma sistemlerinde kullanılan yükseltici, ADC ve yükseltici + ADC elemanları için maksimum sayma sayısını belirleme için önerilen modelleme

Bu maksimum sayıyı belirleme, ardışık olaylar arasındaki zaman aralıklarının gözlenmesi ile belirlenebilen rastgele olayların doğru oranına dayanır. Bu yöntem şu şekilde ifade edilebilir: Poisson dağılım yasasına göre, ortalama bir μ sayma oranında oluşan rastgele olaylar için t aralığında herhangi bir olayın oluşmama olasılığı $e^{-\mu t}$ dir. dt aralığında bir olayın oluşma olasılığı μdt dir. Öyle ki t ve $t + dt$ arasında oluşacak bir t zamanından sonra ilk olayın oluşma olasılığı $\mu e^{-\mu t}$ dir. Bu durumda gözlemlerin büyük bir sayısı ile bulunan olacak bir olayın gerçekleşmesi için beklenen ortalama zaman [65]

$$\bar{T}_D = \mu \int_0^{\infty} t e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (87)$$

olarak elde edilir. Bu durumda ortalama sayma oranı

$$\mu = \frac{1}{\bar{T}_D} \quad (88)$$

ifadesi ile verilebilir. Şekil 15 dikkate alındığında bu zaman aralığı yükseltici, ADC ve yükseltici + ADC sistemleri için ölü zaman olarak alınabilir. O halde her bir modülün bu ölü zamandan dolayı sayma oranı kısıtlaması ortaya çıkmaktadır. Yani sayma oranı modüllerin ölü zamanına direkt olarak bağlıdır. Bu kısıtlama aynı zamanda yükseltici, ADC ve yükseltici + ADC'nin doygunluğa ulaşma noktası olarak da adlandırılabilir. (86) ve (88) denklemleri birlikte düşünüldüğünde, bozunan kaynak yaklaşımında

$$C_3 = \frac{1}{\bar{T}_D} (1 - e^{-n_0 \bar{T}_D}) \quad (89)$$

ifadesi çıkan sayma oranını verir. Burada \bar{T}_D sistemin ortalama ölü zamanıdır.

Bu ölü zaman (43), (44), (45) ve (50) denklemleri bu çalışmanın yapılan çalışmalar bölümü 2.2 kısmında yapılmış olan alt çalışma ile türetilen

$$T_D = B_2 T_p^2 + (B_1 + 1) T_p + A \quad (90)$$

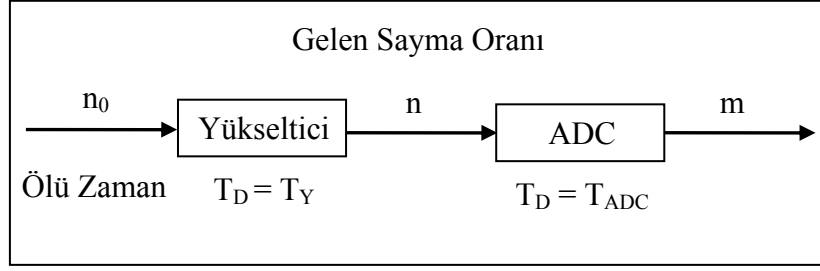
ve

$$T_D = T_p + 1,5 \mu s + \frac{E}{\Delta E} T_{Clock} \quad (91)$$

denklemleri kullanılarak belirlenebilir. Bu denklemlerden (90) numaralı denklem yalnızca yükselticinin neden olduğu ölü zamanı içerirken (91) denklemi hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden kaynaklanan ölü zamanı ifade etmektedir. Bu nedenle (45)'nolu denklem doğrudan analog dijital çevirici zamanını ifade eder. O halde karşımıza iki durum çıkmaktadır: 1) Yükseltici ölü zamanından kaynaklanan sayma oranı kaybı, 2) ADC çevirmesinden kaynaklanan ölü zamandan ileri gelen sayma oranı kaybı. Bu durumlarla ilgili sayma oranı düzeltmeleri aşağıda irdelenmiştir.

2.5.2.1. Yükselticiden Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı

Bozunan kaynak durumunda yükselticinin ve ADC'nin sayma oranı kaybı için kullanılan modelin şematik görünümü Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16'ya göre yükseltici durumunda \bar{T}_D ifadesi (90) denklemine eşit olur. (90) denkleminde yükselticiden kaynaklanan ölü zaman yükselticinin pikleşme zamanına bağlıdır. Pikleşme zamanı ölçüm öncesi seçildikten sonra bir daha değiştirilmediğinden ölçüm boyunca sabit kalmaktadır. Bu nedenle de yükselticiden kaynaklanan ölü zaman ölçüm boyunca sabit olur ve ölçüm



Şekil 16. Sayma oranı modellemesi için dikkate alınan durumun şematik gösterimi

boyunca ardışık olarak birbirini izler. Bu yüzden Poisson istatistiğine uyar. Böylece doğrudan

$$n = \frac{1}{T_Y} (1 - e^{-n_0 T_Y}) \quad (92)$$

ifadesi ile verilir.

2.5.2.2. Analog Dijital Çeviriciden (ADC) Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı

Yine bozunan kaynak yaklaşımını dikkate aldığımızda ADC durumunda T_C ifadesi (45) numaralı denklemle verilir. Bu ifade kanalların E enerjisine göre değişkenlik arz etmektedir. Bu problemin bir çözümü Skinner [66] tarafından ortalama ölü zaman olarak

$$\bar{T}_D = \int_0^{T_D \text{ maksimum}} T_D f(T_D) dT_D \quad (93)$$

şeklinde önerildi. Burada \bar{T}_D ortalama ölü zamandır. Bu ifadenin çözümü Gavron [67] tarafından önerildi. (46) numaralı denklem göz önüne alındığında ADC için ortalama ölü zaman [67, 64]

$$\bar{T}_{ADC} = \frac{\sum_i^{Kanal\ Sayısı} \left(T_P + 1,5 + \frac{E_i}{\Delta E} T_{Clock} \right) Sayım_i}{\sum_i^{Kanal\ Sayısı} Sayım_i} \quad (94)$$

ile verilebilir. Burada Sayım kanaldaki toplam saymadır. Buradan bulunan ortalama ölü zaman (89) denkleminde yerine yazılırsa ADC çıkışındaki sayma oranı belirlenebilir:

$$m = \frac{1}{\bar{T}_{ADC}} \left(1 - e^{-n\bar{T}_{ADC}} \right) \quad (95)$$

2.5.2.3. Yükseltici ve ADC'den Oluşan Birleşik Bir Sistemin Ölü Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı

Bozunan kaynak durumu göz önüne alındığında yükseltici ve ADC'den oluşan sistemin ölü zamanı, minimum çözme zamanı ve analog dijital çevirici arasındaki ilişkiye bağlı olarak yani (41) ve (42) şartları göz önünde bulundurularak (90) ve (91) numaralı denklemler ile verilir. Bu şartlardan (41) numaralı şart göz önüne alındığında ölü zaman, yapılan çalışmalar bölümün 2.5.2.2 kısmında tanımlanan işlemlerin aynısı üzerinde biraz değişiklik yapılarak ortalama olarak belirlenebilir:

$$\bar{T}_{BirSis.} = \frac{\sum_i^m \left(B_2 T_P^2 + (B_1 + 1) T_P + A \right) Sayım_i + \sum_{m+1}^{Kanal\ Sayısı} \left(T_P + 1,5 + \frac{E_{m+1}}{\Delta E} \right) Sayım_{m+1}}{\sum_i^{Kanal\ Sayısı} Sayım_i} \quad (96)$$

Belirlenen bu ortalama zaman kullanılarak (89) denklemi göz önüne alındığında birleşik bir sistem için sayma oranı C_3 yerine m ve \bar{T}_D yerine de \bar{T}_{BirSis} alınması ile hesaplanır.

2.5.2.4. Girilen Sayma Oranı ile Sistemin Toplam Ölü Zamanının Belirlenmesi

Sayma sisteminin toplam ölü zamanı yükseltici, analog dijital çevirici veya hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden çıkan limit sayma oranına bağlı olarak

$$T_{Toplam\ Ölü\ Zaman} = \bar{T}_D N (1 - e^{-N_0 \bar{T}_D}) \cong (1 - e^{-N_0 \bar{T}_D}) \quad (97)$$

ile verilebilir.

2.5.3. Sayma Oranı Düzeltmesi

(56) numaralı denklem kullanılarak her bir kanal için sayma oranı belirlenebilir. Her bir kanal için gözlenen sayma oranının belirlenmesinden sonra sistemin yalnız yükseltici durumu veya analog dijital çevirici ya da hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden oluşan birleşik sistem için ölü zamanlar ilgili denklemler ile hesaplanır. Bu ölü zaman hesaplamalarından sonra sistemin sayma oranı, her bir kanal için, yalnız yükseltici durumu veya analog dijital çevirici ya da hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden oluşan birleşik sistem için ilgili formüllerle yerine konularak aşağıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$n_0 = \frac{1}{T_D} \ln \left(\frac{1}{1 - m \cdot T_D} \right) \quad (98)$$

Bu durumda her bir kanala karşılık gelen düzeltilmiş sayma aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$CC = n_0 T_{Real} \quad (99)$$

2.5.4. SAYma ORanı Programı (SAYOR Programı)

Bu çalışmada, radyasyon belirlemede kullanılan yarıiletken detektörden oluşan sayma sisteminin yükseltici ve analog dijital çeviricisinden oluştuğu kabul edilmektedir. Bu nedenle üretilen fotonların yükselticinin giriş ucuna geldiği varsayıldı. Çalışmanın bu adımında sistemin sayma oranını yalnızca yükseltici ve analog dijital çevirici ve hem yükseltici hem de analog dijital çevirici için üç farklı durum göz önünde bulundurularak yerine getirildi. Bu doğrultuda Compaq Visual Fortran 6 derleyici yardımıyla Fortran 77 programlama dilinde SAYma ORanı (SAYOR) programı kodlandı. SAYOR programı 4 ana alt program ve 3 alt programdan oluşmaktadır. Bu altprogramlar şunlardır:

1) Uret.for: Bu ana altprogram yükselticiye gelen enerjik fotonları üretir. Üretilen fotonlar için ²⁴¹Am radyoizotop kaynağının bozunma enerjisi dikkate alınır. Bu enerjiler rastgele bir şekilde 0 – 60 keV arasında üretilir. Ayrıca üretilen fotonlar için sabit sayma oranı dikkate alınır. Yani simülasyon boyunca üretilen ardışık fotonların arasındaki süre sabit bir değerde ayarlanır. Bu süre saniye başına üretilecek foton sayısı ile belirlenir. Sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

2) Filtre1.for: Bu ana altprogram SAYOR simülasyon programında yükseltici vazifesini görür. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar bölümünün 2.2. kısmında belirlenen ve (90) numaralı denklem ile verilen pikleşme zamanına karşılık gelen ölü zaman filtrelemesini yerine getirir. Bu zaman diliminde yükselticiye giren pulslar kabul edilmez. Böylece buradan yükselticinin pikleşme zamanından ileri gelen ölü zamandan kaynaklanan kayıplar belirlenmiş olur. Bu durum yükselticinin üç mümkün farklı pikleşme zamanı için uygulandı. Sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

3) Filtre2.for: Bu ana altprogram ise SAYOR simülasyon programında analog dijital çevirici vazifesi görür. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar bölümünün 2.2 kısmında belirlenen ve (91) numaralı denklem ile verilen analog dijital çeviriciye gelen pulsun enerjisine (bu çalışmada 0'dan 60 keV'e kadar) karşılık gelen ölü zamanı belirler ve bu filtrelemeyi yerine getirir. Yani bu zaman diliminde ADC'ye gelen pulslar kabul edilmez.

Böylece ADC tarafından kaynaklanan sayma kayıpları belirlenmiş olur. Sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

- 4) Yaz.for: Bu ana altprogram önceki üç ana altprogram sonucu belirlenen durumlar sonucu ortaya çıkan verileri uygun bir halde açılan bir veri dosyasına yazar.
- 5) Sırala.for: Bu altprogram yukarıdaki ilk üç ana altprogramlar sonucu elde edilen veriler için bir spektrumu oluşturmada kullanılan ilk alt programdır. Üretilen, yükseltici ve ADC'den çıkan enerjileri en küçük değerden (sıfır) en yüksek değere doğru sıralar ve sonuçları bir veri dosyasına yazar.
- 6) Sayma.for: Sırala.for altprogramı sonucu elde edilen enerjilere karşılık gelen sayım sonuçlarını verir ve sonuçları bir veri dosyasına yazar.
- 7) Sayma1.for: Sayma.for altprogramı ile belirlenen sayım sonuçlarını enerjileri ile birlikte sayma olarak verir. Sonuçları bir veri dosyasına kaydeder.

2.6. Sistemin Yığılma ve Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranının Belirlenmesi

Yarıiletken detektörler kullanılarak gama veya x ışını ölçme sisteminde, kaynağın bulunduğu ortam ve kaynak-detektör geometrisinden başlamak üzere detektör kristali, ön yükseltici, yükseltici, ADC ve çok kanallı analizör kısımları sayma kayıplarına neden olabilmektedir. Bu sayma kayıpları, kaynak ya da analiz yapılan numuneden gelen ışınların bir kısmının sayma sisteminin ölü zamanından dolayı olabileceği gibi ardışık gelen iki fotonun (pulsun) yüksekliğini analiz edecek olan yükseltici ve ADC birleşiminin zamanlama konumundan dolayı üst üste binerek tek bir pulsmuş gibi davranarak da gerçekleşebilir. Bu bileşik pulsa yığılma pulsu denmektedir. Yığılma pulsları, elektronik aygıtlardan oluşan ve sistem gürültüsü olarak ifade edilen sürekli (background-continuum) pulsların bileşimi, sürekli pulslar ve gama ya da x ışını pulsu birleşimi ve iki ardışık gama veya x ışını pulsundan oluşabilir. Ayrıca son olarak verilen yığılma puls bileşimi, detektör kristalindeki tuzaklanmalardan da meydana gelebilir. Bu tür yığılma pulsları doğrudan detektör kristali üretimi ile ilgili olduğu için bunun çözümü zordur [68]. Çalışmamızın bu kısmında bu konu üzerinde durulmadı.

Radyasyon belirleme sistemlerinde yığılma pulsu başlıca yükseltici ve ADC konumlarında meydana gelir. Bu problemi çözmek için detektör sistemleri üreticileri hızlı bir şekilde ardışık iki pulsu birbirinden ayırt edebilmek için yığılma pulsu yoklama (yığılma rejector) devreleri de oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu devreler sistemde ilave ölü zamana neden olmakla birlikte bazı gelen pulsuların reddedilmesine (PUR) neden olur. Çalışmanın bu kısmı, üretici firmaların tipik zamanlamalarını dikkate alarak şekil 9 ile verilen zamanlama örneği doğrultusunda yalnızca yükseltici ve ADC bileşik durumu için yığılma pulsu, yığılma pulsu reddetme ve yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan minimum ayırma zamanının neden olduğu kayıpları belirlemek için sayma oranı modellemesi üzerinde gerçekleştirildi. Çalışmada sayma oranı performansının teşkil eden ölü zamana bağlı temel sınırlamalar araştırıldı. Modelde kullanılan parametreler ana değişkenin her bir bileşeni için oluşturuldu. Çalışmanın yığılma pulsu, yığılma pulsu reddetmesi ve sayma oranı kaybı ardışık iki olayı içeren tüm üretilen pulslar için minimum ayırma zamanı, ADC çevirme zamanı, yığılma reddetme devresi izin çıkış süresi ve hızlı puls belirleme zamanı üzerinden yerine getirildi.

Hatanın önemli bir kaynağı puls belirleme ve işlemede kullanılan sayma elektroniğinin gerektirdiği sınırlı zamanlamadır. Ölü zaman kayıpları (büyük oranda yükselticide olmak üzere analog dijital çeviriciden ileri gelir) yukarıda önerilen yöntemlerle (düşük, orta ve yüksek sayma oranlı durumlar için) önemli oranda çözümlenirken yükseltici ve analog dijital çevirici bileşiminden kaynaklanan yığılma puls kayıplarını önemli oranda çözmek problem teşkil etmektedir. Tüm saymaların yüzde 10 veya daha fazlası yığılma pulsu kaybı olarak karşımıza çıkmaktadır. Sayma oran kayıplarını belirleme ve düzeltme ile ilişkili birkaç yöntem ve model vardır [69–74]. Bir sayma sisteminin sayma oranı performansını belirlemek için veri kayıplarına neden olan her bir sistem bileşenlerini ayırt etmek ve ölü zamana katkılarını belirlemek gereklidir. Çalışmanın bu bölümünün 2.3 ve 2.4 kısımlarında sistemin ölü zamanı irdelendi ve bunun için ifadeler türetildi. Potansiyel sayma oranı düzeltmeleri hem veri kaybı hem de ayırma kaybı terimlerinca yerine getirilebilir.

İki veya daha fazla puls, puls yükselme zamanından daha düşük bir süre ile ayrılırsa sistem bu pulsları üst üste ekler ve çıkış pulsunu bu iki pulsun toplam yüksekliğine bağlı tek bir puls olarak verir. Yığılma pulsları spektrumda bozulmalara neden olur. Gama ve x ışını ölçümlerinde veri kazanma oranı, yığılma pulslarından ileri gelen maksimum kabul

edilebilir bozulma ile genel olarak sınırlandırılan istenilen doyuruculukta bir doğrulukla başarılabilir. Birkaç araştırmacı bu bozulmaları minimize eden elektronik devreler tasarlar ve bu devrelerin tamamı kullanılan elektronik bileşenlerin özelliklerinden dolayı sınırlı ayırma zamanına sahiptir. Böylece yığılma bozulmalarının tam bir şekilde elimine edilmesi gözlenen verilerin analitik bir davranışını gerekli kılar [75].

Pile up düzeltmeleri için kullanılan yöntemlerden birinin pulser yöntemi olduğu genel bilgiler kısmında ifade edildi. Bu yöntemi önerme doğrultusunda yapılan birkaç çalışma literatürde mevcuttur [76,77]. Fakat bu yöntem, pulserde üretilen puls ile tam enerji pikinin farklı şekillere sahip olması nedeniyle sınırlıdır. Bu sınırlama ile ilgili literatürde birkaç çalışma vardır [78–82]. Ayrıca doğrudan puls yüksekliği dağılımı ve puls biçimine bağlı analitik düzeltme yöntemleri de önerilmiştir. Bu yöntemlerden biri analizörün ölü zamanını göz önünde bulundurmaya ve hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak puls yüksekliği dağılımında yığılma bozulmasını hesaplamaya dayalıdır [83]. Yalnız bu yöntem doğrudan baz çizgisine (ana hat-baseline) dayalıdır ve yöntemde puls genişliğini dikkate alınmaz. Diğer bir analitik düzeltme yönteminde yükselticinin minimum ayırma zamanını ve pulsun genişliğini dikkate alınır [84]. Bu yöntemde sabit sayma oranı göz önünde bulundurulur. Oysa sayma sistemlerinde sayma oranı değişkenlik göstermektedir. Analitik yığılma düzeltmeleri için diğer bir yöntem toplam ölü zaman dikkate alınarak yapılan bozunan kaynak yöntemidir [85,86]. Analitik yığılma düzeltmeleri için başka bir yöntem puls yüksekliği spektrumu ve puls biçimine bağlı zamanla değişmeyen lineer sistemler için önerilmiştir. Bu yöntem aralık olasılık dağılımına dayanmaktadır. Burada puls biçimi parabolik olarak verilir ve bu genişlik zaman aralığı olarak dikkate alınır [87–89].

2.6.1. Yığılma Puls Oranı Modeli

Wytttenbach yığılma pulsu düzeltmeleri için özellikle temel bir yol önerdi [90]. Önerisinde I_0 girme sayma ölçüsünün bir oranı olarak analog dijital çevirici ölü zamanını kullanarak

$$f_p = \frac{I_0}{I} = e^{PT_{\text{Real}}/T_L} \quad (100)$$

şeklinde tanımladığı yığılma düzeltme çarpanı için bir ifade türetti. Burada T_{Live} saniye biriminde işlem zamanı, P birim dizininde yığılma çarpanı, $T_D = T_{\text{Real}} - T_{\text{Live}}$ şeklinde tanımlı sayma süresi boyunca sistemin toplam ölü zamanı, T_{Real} saniye biriminde sayma süresi ve I çıkan sayma oranıdır. P yığılma çarpanı detektör ölü zamanını belirleyen klasik iki kaynak yönteminin bir uzantısı olarak uygun bir şekilde ölçülebilir.

Lindstrom ve arkadaşları, Wyttenbach'ın yığılma düzeltme çarpanı ifadesini bozunan bir kaynak ile yükseltici ve ADC'den oluşan bileşik bir sistem için uyguladılar ve aşağıda verilen yığılma düzeltme çarpanını ifade ettiler [69]:

$$f_p = e^{T_D I_0(0) \exp(-\lambda t)} \quad (101)$$

Burada T_D yükselticinin ölü zamanı, $I_0(0)$ sıfır anında bozunan kaynağın şiddeti, λ kaynağın bozunma sabiti ve t sayma süresidir. (101) nolu denklemi Lindstrom ve arkadaşları [91]

$$f_p = \exp(A(t_1)e^{-\lambda t_1} \exp(A(t_1)e^{-\lambda t_1} \exp(\dots))) \quad (102)$$

tekrarlama bağıntısının nümerik olarak çözülebilmesi halinde yakınsama ile çözdüler. Burada $A(t_1)$

$$A(t_1) = I_0(0)e^{-T_D I_0(0) \exp(-\lambda t_1)} \quad (103)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Böylece sayma sistemi ve belirli bir çekirdeğin T_D ölü zamanı belirlenir belirlenmez A_0 gerçek sayma oranı, A gözlenen sayma oranı ile f_p yığılma düzeltme çarpanının çarpılmasıyla belirlenebilir [92]:

$$A_{0,gerçek} = f_P A_{0,gözlenen} \quad (104)$$

Yalnız burada bazı niceliklerin deneysel olarak belirlenmesi ve sistemin toplam ölü zamanı üzerinden işlem yapılması biraz problemlidir. Bozunan geometri toplam sayma değerini değiştireceğinden ve üç veya daha fazla gözlem durumu sonucu elde edilen sonuç bir takım analitik işlemlerden geçirilerek (ağırlıklandırılmış en küçük kareler yöntemi ve nümerik çözüm bulma vb.) çözüleceğinden fazla zaman alıcı ve can sıkıcıdır. Bu nedenle bu ifade analitik olarak ifade edilerek kısa bir işlem sonucu çözülmelidir.

Bir t zaman aralığında bir radyoizotopun rastgele bozunumundan detektöre gelen gama ışınının oluşma olasılığı (51) ve (79) numaralı denklemlerle Poisson istatistiği ile verilebilir. Yığılma durumunda bir sayma sisteminin çıkma sayma, oranı girme sayma oranı ve T_R ayırma zamanı ile verilebilir. Bu anlamda ayırma zamanı, sayılabilir olan her iki olay arasında minimum zaman aralığı olarak ifade edilebilir [93]. Yalnız burada, bu çalışmada belirlendiği üzere, yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olarak bu ayırma zamanının değiştiğine dikkat edilmelidir ((40) numaralı denklem). Yapılan çalışmalar bölümünün 2.5 kısmında oluşturulan modelde girilen sayma oranı ile çıkan sayma oranı arasındaki ilişki ölü zamana bağlı olarak (89) numaralı denklemle belirlenebilir.

Toplam veri kaybından daha ziyade sabit bir enerji penceresinden ileri gelen kayıpları bilmek önemlidir. Bu enerji penceresi pulsları, yüksekliğine (aynı zamanda bu enerji büyüklüğüne) göre ayırır. Bir enerji penceresindeki veri kayıp oranı $R_{Girme}^{pencere}$ enerji penceresi girme oranı ve enerji penceresinde gerçekleşen $f_{pencere}$ toplam olayların kesrinde yazılabilir [94]:

$$R_{Girme}^{pencere} = f_{pencere} \cdot R_{Girme} \quad (105)$$

2.6.1.1. Yığılma Puls Oranı

Şekil 9 ile verilen sayma sistemi tipik zamanlaması göz önünde bulundurulduğunda yığılma piki oluşma şartı; ardışık iki pulstan ikinci gelen pulsun üretilme zamanından 0,15

* T_P zamanı sonrası içerisinde birinci pulsun ADC çevirme süresinin üretilme zamanının gerisine düştüğünde kesişmesidir. Yani birinci puls t_1 zamanında ikinci puls t_2 zamanında üretilsin. Bu durumda iki puls arasındaki mesafe $t = t_2 - t_1$ olur. Birinci pulsun (45) numaralı denklem ile verilen T_{ADC} ADC çevirme zamanı t_1 'den çıkarıldığında oluşan yeni zaman $t_3 = t_1 - T_{ADC}$ şeklinde tanımlanabilir. İkinci pulsun $0,15 * T_P$ sonraki durumu $t_4 = t_2 + 0,15 * T_P$ ile verilebilir. Eğer $t_2 \leq t_3 < t_4$ ise sistem iki pulsu ayıramaz ve yığılma piki meydana gelir. Bu durumda bu iki puls arasındaki t mesafesi en fazla T_{ADC} kadar olabilir. Bu bağlamda $0,15 * T_P$ bu t zaman dilimi içinde kalabilir ve o halde bu iki zaman arasında bir oran kurulabilir. Kurulan bu oran o zaman toplam yığılma pik olay kesri olarak nitelendirilebilir. Bu zamanlama örnekleme Şekil 17'de gösterilmiştir. Buradan yığılma pulsu olay kesri için

$$f_{pile\ up} = \frac{0,15 * T_P}{T_{ADC}} \quad (106)$$

tanımı yapılabilir. Şekil 9 ve Şekil 15 ile birlikte (87) ve (88) numaralı denklemler göz önünde bulundurulduğunda girme sayma oranı için

$$R_{girme} = \frac{1}{T_R + 1,5 \mu s} \quad (107)$$

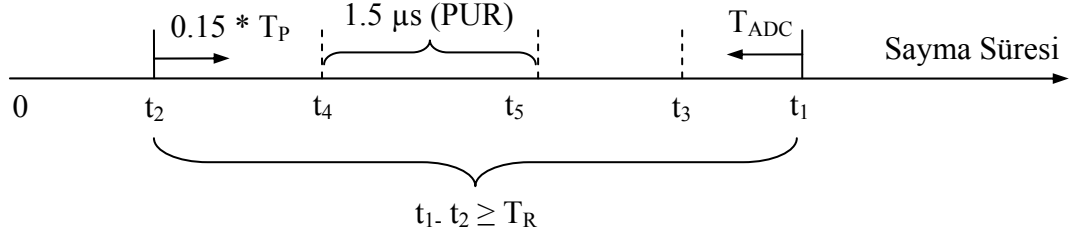
ifadesi yazılabilir. Böylece yığılma pulsu (piki) enerji penceresine girecek sayma oranı için maksimum değer

$$R_{girme}^{pencere} = f_{pile\ up} * R_{girme} \quad (108)$$

ile verilebilir. O halde tüm sistemin yığılma piki sayma oranını (89) numaralı denkleme benzer olarak

$$N_{pile\ up} = R_{girme}^{pencere} \left(1 - e^{-n_0 \bar{T}_{ADC}} \right) \quad (109)$$

ile verilebilir. Burada n_0 yükselticiye (detektörden) gelen sayma oranı ve \bar{T}_{BirSis} ise (96) numaralı denklemle verilen bileşik sistemin ortalama ölü zamanıdır.



Şekil 17. Modellemede dikkate alınan sayma sistemi zaman örnekleme

2.6.1.2. Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranı

Şekil 9 ile verilen sayma sistemi tipik zamanlaması göz önünde bulundurulduğunda yığılma pulsu reddetmenin oluşma şartı; ardışık iki pulstan ikinci gelen pulsun üretilme zamanından $t_2 + 0,15 * T_P$ zamanı sonrası ve $t_2 + 0,15 * T_P + 1,5 \mu s$ içerisinde birinci pulsun ADC çevirme süresi birinci pulsun üretilme zamanının gerisine düştüğünde kesişmesidir. Burada $1,5 \mu s$ yığılma pulsu reddetme zamanıdır. Üretici firma tarafından yükselticiye ilave edilir. Yani birinci puls t_1 zamanında ikinci puls t_2 zamanında üretilsin. Bu durumda iki puls arasındaki mesafe $t = t_2 - t_1$ olur. Birinci pulsun (45) numaralı denklem ile verilen T_{ADC} ADC çevirme zamanı t_1 'den çıkarıldığında oluşan yeni zaman $t_3 = t_1 - T_{ADC}$ şeklinde tanımlanabilir. İkinci pulsun $0,15 * T_P + 1,5 \mu s$ sonraki durumu $t_5 = t_2 + 0,15 * T_P + 1,5 \mu s$ ile verilebilir. Eğer $t_4 \leq t_3 < t_5$ ise sistem iki pulsu birbirinden ayıramaz fakat ikinci pulsu reddeder ve yığılma pulsu reddetme (PUR) olayı meydana gelir. Bu durumda bu iki puls arasındaki t mesafesi en fazla T_{ADC} kadar olabilir. Bu bağlamda $1,5 \mu s$ bu t zaman dilimi içinde kalabilir ve o halde bu iki zaman arasında bir oran kurulabilir. Kurulan bu oran o

zaman toplam yığılma pulsu reddetme olay kesri olarak nitelendirilebilir. Bu zamanlama örnekleme için Şekil 17'ye bakılabilir. Buradan yığılma pulsu reddetme olay kesri için

$$f_{pile\ up\ ret} = \frac{1,5\ \mu s}{T_{ADC}} \quad (110)$$

tanımı yapılabilir. Burada da girme sayma oranı için (107) numaralı denklem geçerlidir. Böylece yığılma pulsu reddetme (PUR) enerji penceresine girecek sayma oranı için maksimum değer (108) numaralı denklemde $f_{pile\ up}$ yerine $f_{pile\ up\ ret}$ ifadesinin alınarak bu denklem ile verilebilir. O halde tüm sistemin yığılma pulsu reddetme sayma oranı (109) numaralı denklem ile belirlenebilir.

2.6.1.3. Yükselticinin Minimum Ayırma Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı

Şekil 9 ile verilen sayma sistemi tipik zamanlaması göz önünde bulundurulduğunda yükseltici tarafından sayma oranı kaybı oluşma şartı, ardışık iki pulsun arasındaki zaman farkının yükselticinin (50) numaralı denklemle verilen minimum ayırma zamanından küçük olmasıdır. Yani birinci puls t_1 zamanında ikinci puls t_2 zamanında üretilsin. Bu durumda iki puls arasındaki mesafe $t = t_2 - t_1$ olur. Bu durumda $t < T_R$ ise ardışık iki pulsdan ikincisi dikkate alınmaz ve sayma oranı kaybı meydana gelir. Bu zamanlama örnekleme için Şekil 17'ye bakılabilir. Burada Şekil 15 ile birlikte (87) ve (88) numaralı denklemler göz önünde bulundurulduğunda maksimum girilebilecek kabul sayma oranı

$$R_{girme} = \frac{1}{T_R} \quad (111)$$

ifadesi ile verilecektir. Ayrıca ölü zaman, hem yükselticinin minimum ayırma zamanı hem de yığılma pulsu reddetme devresinin çıkışı olan $1,5\ \mu s$ ile birlikte verilebilir. Bu durumda sistemin ölü zamanı

$$T_D = T_R + 1,5 \mu s \quad (112)$$

olur. O halde yükselticinin minimum ayırma zamanı filtresini geçebilecek sayma oranı (yani çıkma) sayma oranı

$$N_R = R_{gime} (1 - e^{-n_0 T_D}) \quad (113)$$

şeklinde tanımlanabilir.

2.6.2. Yığılma (PILEUP) Programı

Bu çalışmada radyasyon belirlemede kullanılan yarıiletken detektörden oluşan sayma sisteminin yükseltici ve analog dijital çeviricisinden oluştuğu varsayılmaktadır. Bu nedenle üretilen fotonların yükselticinin giriş ucuna geldiği varsayılır. Çalışmanın bu adımında sistemin yığılma pulsu (piki) sayma oranı, yığılma pulsu reddetme sayma oranı ve yükselticinin minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranı kayıpları irdelendi. Bu doğrultuda Compaq Visual Fortran 6 derleyici yardımıyla Fortran 77 programlama dilinde yığılma sayma oranı (PILEUP) programı kodlandı. PILEUP programı 4 ana alt program ve 3 alt programdan oluşmaktadır. Bu altprogramlar şunlardır:

1) Uret.for: Bu ana altprogram yükselticiye gelen enerjik fotonları üretir. Üretilen enerjiler için ²⁴¹Am radyoizotop kaynağının bozunma enerjisi dikkate alınır (0 – 60 keV). Ayrıca üretilen fotonlar için sabit sayma oranı göz önünde bulunduruldu. Yani simülasyon boyunca üretilen ardışık fotonların arasındaki süre sabit bir değerde ayarlandı. Bu süre saniye başına üretilecek foton sayısı ile belirlendi. Sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

2) Minayzam.for: Bu ana altprogram PILEUP simülasyon programında uret.for ile üretilen enerjik fotonların yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olarak hesaplanan minimum ayırma zamanı süzgecini vazifesini görür. Yapılan çalışmalarının 2.2.6 kısmında belirlenen ve (50) numaralı denklem ile verilen pikleşme zamanına karşılık gelen minimum ayırma zamanı filtrelemesini yerine getirir. Bu zaman diliminde yükselticiye giren pulslar kabul

edilmez. Böylece buradan yükselticinin pikleşme zamanından ileri gelen minimum ayırma zamanından kaynaklanan kayıplar belirlenmiş olur. Bu durum yükselticinin üç mümkün farklı pikleşme zamanı için uygulandı. Sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

3) Pileup1.for: Bu ana altprogram ise PILEUP simülasyon programında yığılma pulsu ve yığılma puls reddedilmesini örnekler. Örnekleme işleminde Şekil 9 ve Şekil 17 ile verilen tipik sayma sistemi zamanlaması ve modelleme işlemleri yerine getirilir ve sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

4) Yaz.for: Bu ana altprogram önceki üç ana altprogram sonucu belirlenen durumlar için ortaya çıkan verileri uygun bir halde açılan bir veri dosyasına yazar.

5) Sırala.for: Bu altprogram yukarıdaki ilk üç ana altprogramlar sonucu belirlenen veriler için bir spektrum oluşturmada kullanılan ilk alt programdır. Üretilen, yükseltici ve ADC den çıkan enerjileri en küçük değerden (sıfır) en yüksek değere doğru sıralar ve sonuçlar bir veri dosyasına yazılır.

6) Sayma.for: Sırala.for altprogramı sonucu belirlenen enerjilere karşılık gelen sayım sonuçlarını verir ve sonuçları bir veri dosyasına yazar.

7) Sayma1.for: Sayma.for altprogramı ile belirlenen sayım sonuçlarını enerjileri ile birlikte sayma olarak verir. Sonuçları bir veri dosyasına kaydeder.

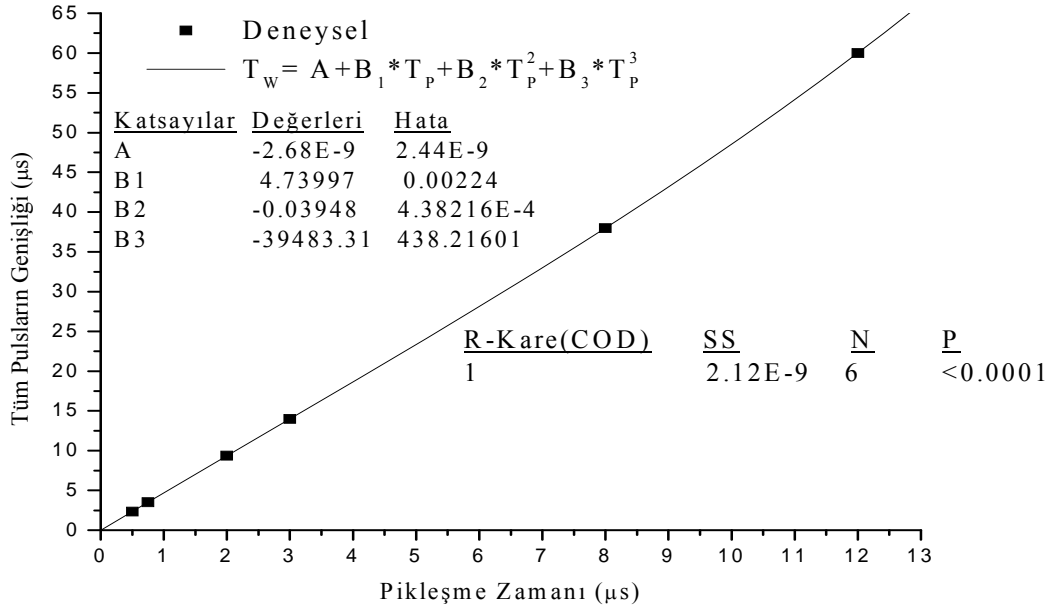
3. BULGULAR

Yapılan çalışmalar sonunda aşağıda ifade edilen bulgulara ulaşıldı. Bu bulguların birbirleri ile uyumlu olması yanında birbirlerini destekleyici içerikte olduğu da görüldü.

3.1. Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi

3.1.1. Tüm Puls Genişliğinin Pikleşme Zamanı ile Değişimi

Minimum ayırma zamanı, pikleşme zamanı ve tüm pulsaların genişliği arasındaki ilişki (40) numaralı denklem ile verilir [32]. Bu denkleme göre yükselticinin pikleşme zamanına karşılık gelen tüm puls genişlikleri osiloskop yardımıyla okundu. Bu üç zaman değişkeni ile belirlenen pikleşme zamanı ve tüm puls arasındaki ilişki şekil 18'de görülmektedir.



Şekil 18. Yükselticinin pikleşme zamanı ile tüm puls genişliğinin değişimi

Bu grafikten görüldüğü üzere yükselticinin pikleşme zamanı ile tüm pulsların genişliği arasındaki ilişki üçüncü dereceden bir polinomdur. Şekil 18 ve fit denkleminde tüm pulsların genişliğinin artan pikleşme zamanı ile hızlı bir şekilde arttığı sonucu çıkarılabilir. Yani bu daha küçük pikleşme zamanının daha küçük tüm puls genişliği demek olduğudur. Böylece, minimum ayırma zamanı en küçük değerinde elde edilebilir. Bu grafikten elde edilen fit denklemi aşağıda verilmiştir:

$$T_w = B_3 T_p^3 + B_2 T_p^2 + B_1 T_p + A \quad (114)$$

Burada A, B₁, B₂ ve B₃ katsayıları, sırasıyla -2,68E-9, 4,73997, -0,03948 ve -39483,31 dir. Ayrıca, bu fit denkleminin R², standart sapma ve P değerleri sırasıyla 1, 2,12E-9 ve <0,0001'dir.

3.1.2. Pikleşme Zamanı ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki

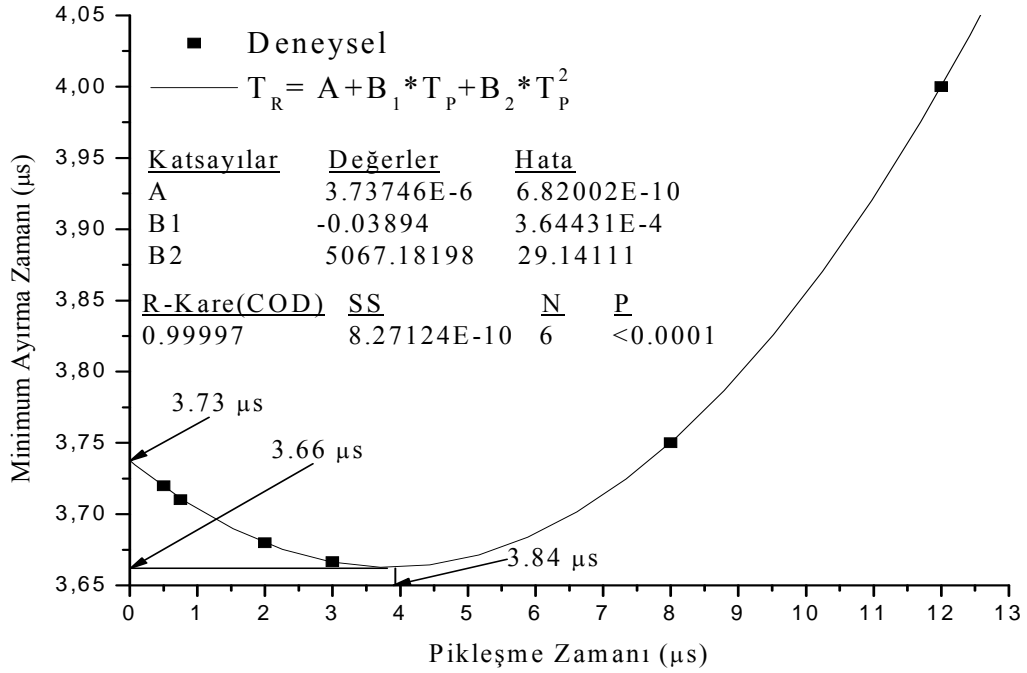
Denklem (40)'tan faydalanarak elde edilen minimum ayırma zamanı ile pikleşme zamanı arasındaki ilişki Şekil 19'da görülmektedir. Bu grafikten elde edilen fit denklemi pikleşme zamanı ile minimum ayırma zamanı arasındaki ilişkinin Denklem (50) ile verilebileceğini gösterdi. Buradaki A katsayısı, yükselticinin pikleşme zamanı sıfır olduğunda minimum ayırma zamanına karşılık gelmektedir. Bu nedenle, bu değeri yükselticinin karakteristik minimum ayırma zamanı olarak tanımlayabiliriz. Ayrıca minimum ayırma zamanı sayma kayıpları ve herhangi bir yükseltici için önemli bir nicelik olduğundan bunun minimum değeri belirlenmelidir. Bu nedenle bu fit denkleminin yerel minimum uç noktası aşağıdaki işlemlerle belirlenebilir:

$$\frac{dT_R}{dT_p} = 0 \quad (115)$$

Buna göre Denklem (50) yeniden düzenlenirse;

$$2B_2T_p + B_1 = 0 \quad (116)$$

ifadesi elde edilir.



Şekil 19. Pickleşme zamanı ile minimum ayırma zamanı arasındaki ilişki

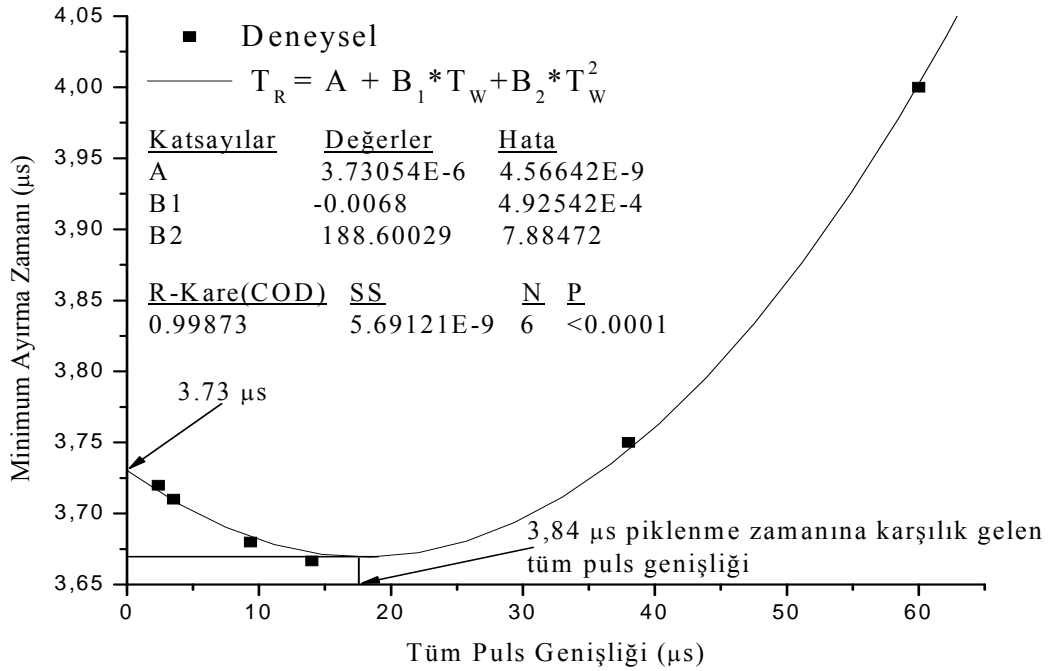
Böylece Tennelec marka TC 244 yükselticinin $T_{PKritik}$ kritik pikleşme zamanı Denklem (116)'dan $3.84 \mu s$ olarak hesaplandı. Kritik pikleşme zamanına bağlı olarak yükselticinin $T_{RKritik}$ kritik minimum ayırma zamanı $3.66 \mu s$ olarak tespit edildi. Ayrıca, Şekil 19'dan görüldüğü üzere minimum ayırma zamanı $4 \mu s$ pikleşme zamanı civarında minimum olmaktadır.

3.1.3. Tüm Puls Genişliği ile Minimum Ayırma Zamanı Arasındaki İlişki

Denklem (40) vasıtasıyla hesaplanan tüm puls genişliği ile minimum ayırma zamanı arasındaki ilişki Şekil 20’de verilmiştir. Bu grafikten elde edilen fit denklemi aşağıdaki gibidir:

$$T_R = B_2 T_W^2 + B_1 T_W + A \quad (117)$$

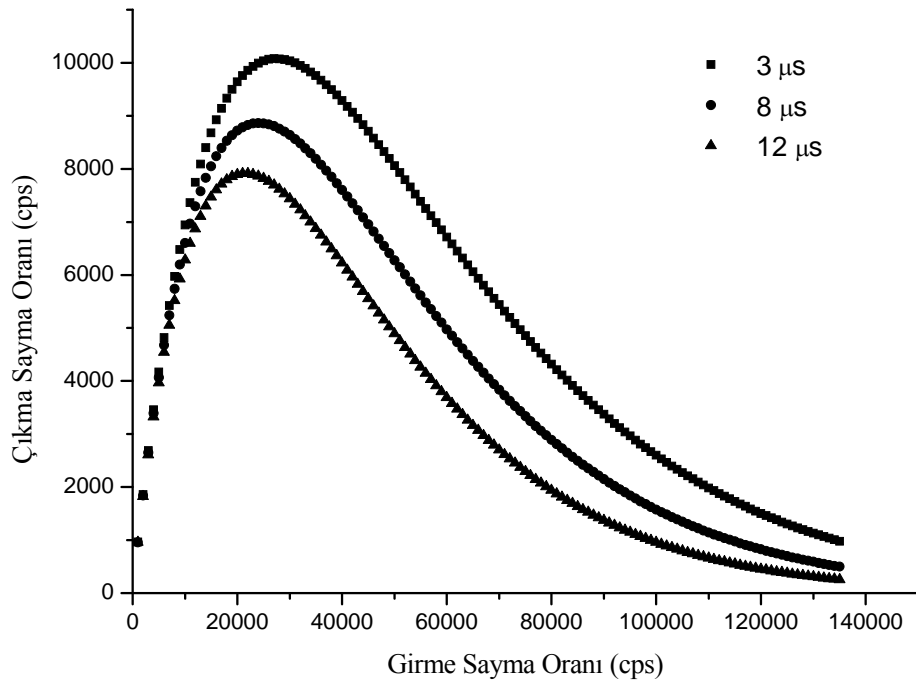
Burada A, B₁ ve B₂ katsayıları sırasıyla 3,73054E-6, -0,0068 ve 188,60029 dur. Ayrıca bu denklemin R², standart sapma ve P’si sırayla 0,99873, 5,69121E-9 ve <0,0001 dir. Şekil 20’den görüldüğü üzere minimum ayırma zamanı, 3,84 µs piklenme zamanına karşılık gelen tüm puls genişliğinde minimumdur. Bu durum, bulgular bölümünün 3.1.2 kısımdaki sonucu ile aynıdır.



Şekil 20. Minimum ayırma zamanı ile tüm puls genişliği arasındaki ilişki

3.1.4. Sistemin Çıkma Sayma Oranının Belirlenmesi

Yükselticinin 3, 8 ve 12 μs gibi mümkün 3 farklı pikleşme zamanına göre sistemin girme sayma oranlarına karşın sistemin çıkma sayma oranları grafiği Şekil 21’de verilmiştir. Şekil 21’den görüldüğü gibi en yüksek çıkma sayma oranı 3 μs ’dedir.

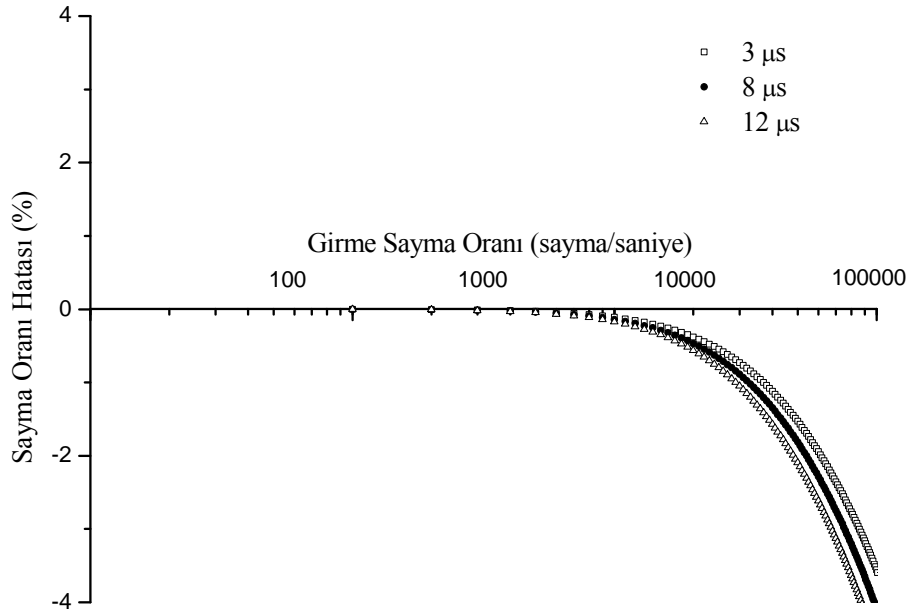


Şekil 21. Sistem çıkma sayma oranı

3.1.5. Pikleşme Zamanının İşlem Zamanı Düzeltmesine Etkisi

Saf Se elementi için, Şekil 22’de girme sayma oranına karşı çıkma sayma oranı yüzde hatasını görülmektedir. Çıkma sayma oranı yüzde hatasını belirlemek için öncelikle girme sayma oranına karşılık çıkan sayma oranı, Denklem (35)’e göre hesaplandı. Daha sonra sayma oranı yüzde hatası (46) numaralı denklemden faydalanılarak hesaplandı. Bu şekilden görüldüğü üzere, sayma oranı kaybı artan pikleşme zamanı ile artar. Bu durumda

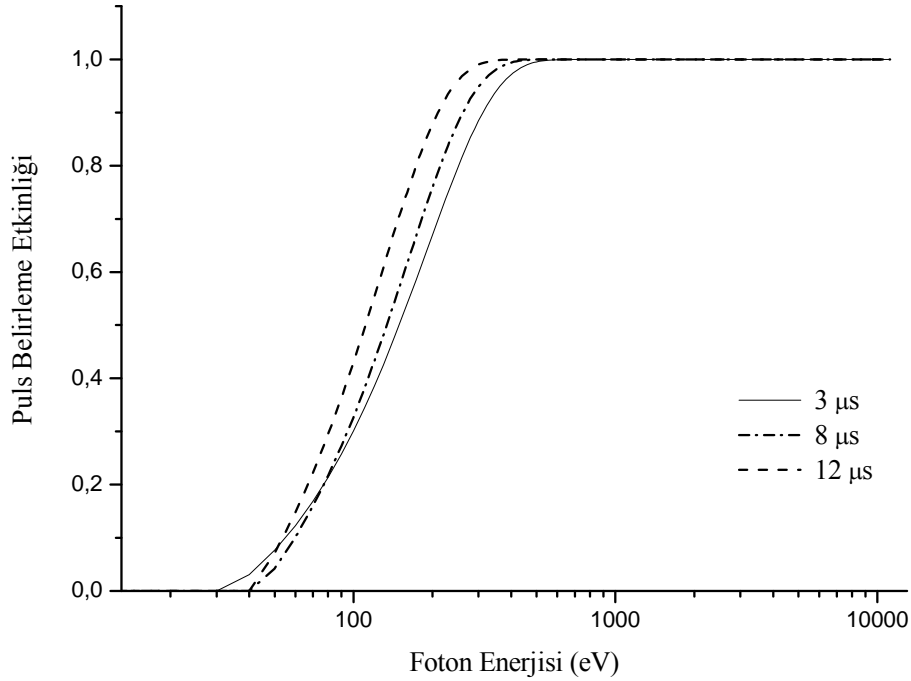
minimum hata $3 \mu\text{s}$ 'lik pikleşme zamanında görünmektedir. Diğer saf Fe ve Zn elementleri içinde durum benzerdir.



Şekil 22. Pikleşme zamanının işlem zamanı düzeltmesine etkisi

3.1.6. Puls Belirleme Etkinliğinin Belirlenmesi

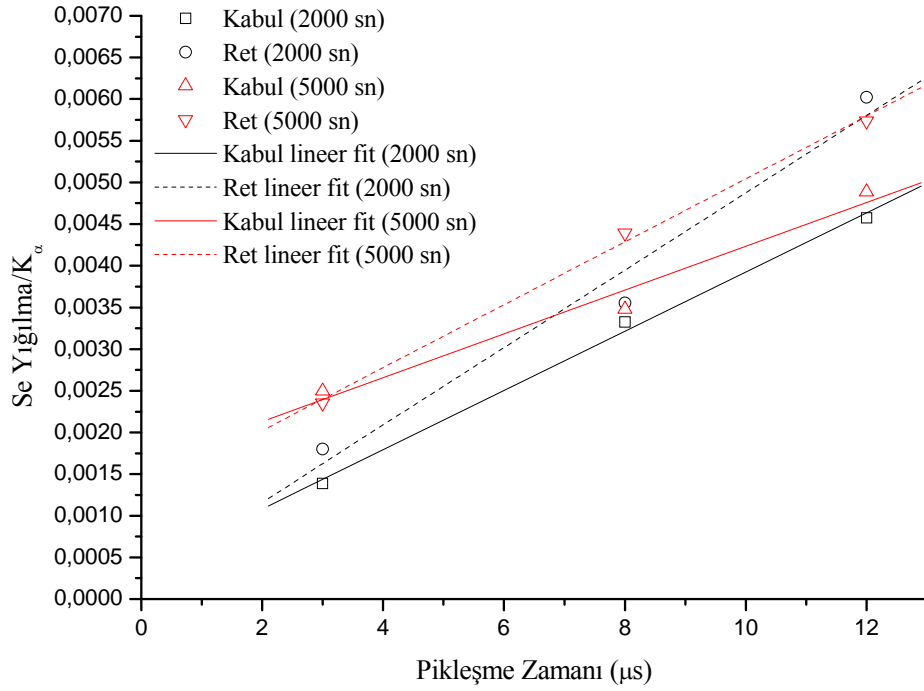
Sistemin puls belirleme etkinliği Şekil 23'te verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere 3 , 8 ve $12 \mu\text{s}$ 'lik pikleşme zamanına karşılık gelen puls belirleme etkinliği çalışılan enerji aralığında 1'dir. Bu da bize 3 farklı pikleşme zamanında pulsların sistem tarafından aynı etkinlikte belirlenebildiğini göstermektedir. Yani saf Fe, Zn ve Se elementi ile ilgili karakteristik piklerin belirlenebilme oranı yükselticinin mümkün farklı üç pikleşme zamanı için aynıdır.



Şekil 23. Çalışılan enerji aralığında puls belirleme etkinliği

3.1.7. Pikleşme Zamanı ile Yığılma/ K_{α} Puls Oranının Değişimi

Saf Se elementi için K_{α} yığılma/ K_{α} oranı Şekil 24'te gösterilmektedir. K_{α} yığılma/ K_{α} oranı bu şekilden görüldüğü üzere artan sayma zamanı ile artmaktadır. Yani, K_{α} net yığılma pik alanı artan sayma zamanı ile artan net K_{α} pik alanından daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Diğer bir deyişle K_{α} yığılma/ K_{α} oranı artan pikleşme zamanı ile artmaktadır. Buna ek olarak K_{α} yığılma/ K_{α} oranı 3 µs pikleşme zamanında minimumdur. Ayrıca bu oran sayma zamanının artmasıyla da azalmaktadır. Yığılma pulsu reddetme devresi tamamen aktif hale geldiğinde yani PUR konumunda bu oranın arttığı görülmektedir.



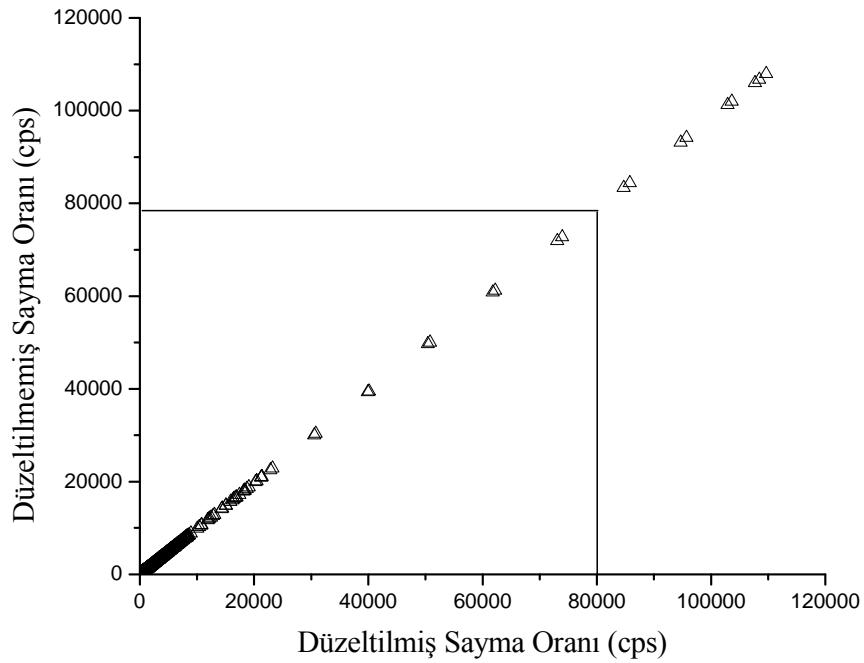
Şekil 24. Pikleşme zamanı ile yığılma/ K_{α} puls oranı değişimi

3.2 Sistem Ölü Zamanı ve Sayma Kayıpları

Bu çalışmada önerilen yöntem ile yapılan ölü zaman düzeltmesi sonucu elde edilen düzeltilmiş sayma oranı ile düzeltilmemiş sayma oranı arasındaki ilişki Şekil 25'te verilmiştir. Çalışmada önerilen yeni model (analitik model) sayma oranı düzeltmesinde integral düzeltme öngörmektedir. Bu model ölü zamanın sayma sistemi üzerinde baskın olmadığı düşük sayma oranlarında etkilidir.

Tablo 1'de, radyasyon ölçümünde kullanılan Genie 2000 spektrometre yazılımı ve bu çalışmada önerilen yöntemle elde edilen sistemin toplam ölü zamanı verilmiştir. Sistemin toplam ölü zamanı yükselticinin mümkün üç farklı pikleşme zamanına göre test edildi. Tablo 1'den görüldüğü üzere, Genie 2000 yazılımı yalnızca sistemin toplam ölü zamanını verirken bu çalışmada önerilen yeni yöntemle hem ADC'nin toplam ölü zamanını hem de sistemin toplam ölü zamanını elde etmek mümkündür. Böylece, sistem ölü zamanlarından ileri gelen sayma kayıpları için istenen düzeltmeler (paralyzable veya non-paralyzable ya

da her ikisini kapsayan birleşik bir sistem için) kolaylıkla yapılabilir. Sistem ölü zamanı hem Genie 2000 hem de burada önerilen yöntemde yükselticinin artan pikleşme zamanı ile artmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur (Denklem (43), (44) ve (51) bu durumu göstermektedir). Modelde, ADC çevirmesinden ileri gelen toplam ölü zaman yükselticinin mümkün farklı üç pikleşme zamanı için hemen hemen aynıdır.



Şekil 25. Ölü zaman modeli ile düzeltilmiş sayma oranı ile düzeltilmemiş sayma oranı arasındaki ilişki

Tablo 1. Analitik yöntem ve Genie 2000 yazılımı ile elde edilen sistemin toplam ölü zamanlarının karşılaştırılması

| Pikleşme Zamanı (μ s) | Sayma Süresi (s) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|---------|------------|----------|---------|------------|
| | t = 2000 | | | t = 5000 | | |
| | Model | | Genie 2000 | Model | | Genie 2000 |
| | TDT* | TADCT** | | TDT* | TADCT** | |
| 3 | 31.21 | 15.05 | 20.51 | 77.95 | 37.59 | 51.22 |
| 8 | 49.10 | 15.49 | 56.84 | 122.52 | 38.62 | 141.88 |
| 12 | 59.01 | 14.58 | 79.96 | 147.26 | 36.41 | 199.61 |

TDT* : Toplam Ölü Zaman

TADCT** : Toplam Analog-Dijital Çevirme Zamanı

3.3. Sistem Ölü Zamanının Sayma Oranına Etkisi

Yapılan çalışmalar bölümünün 2.5 kısmında ifade edilen modelleme üzere kodlanan SAYOR programının çalıştırıldı. Program sonucun aşağıda verilen bulgulara ulaşıldı.

3.3.1. Sayma Oranı Üzerine Pikleşme Zamanının Etkisi

İlk olarak yükselticinin pikleşme modülünde bulunan ve sıklıkla kullanılan mümkün üç farklı pikleşme zamanının (3, 8 ve 12 μ s) sayma oranı üzerine etkisi irdelendi. Bu irdeleme doğrudan yükseltici ve analog dijital çevirici ve yükseltici + analog dijital çeviriciden oluşan birleşik bir sistem olmak üzere üç farklı durum için uygulandı. Sayma oranı, saniye başına sayım olarak tanımlandığından 1 saniyede istenilen sayma keyfi olarak belirlendi. Uygulama programın başlangıcında girilen doğru (gerçek) sayma oranından program sonunda çıkan (gözlenen) sayma oranının belirlenmesi esasına dayanır. Her bir pikleşme zamanı için doğru (gerçek) sayma oranı olarak, saniye başına 1 sayımdan başlamak üzere 3000000 sayıma kadar olan 27 farklı sayma oranı tespit edildi. SAYOR programı her bir pikleşme zamanı için girilen (gerçek) sayma oranına bağlı olarak 27 defa çalıştırıldı. Buradaki 3000000 sayım uygulanan zaman fitresi için yaklaşık 333 ns zaman

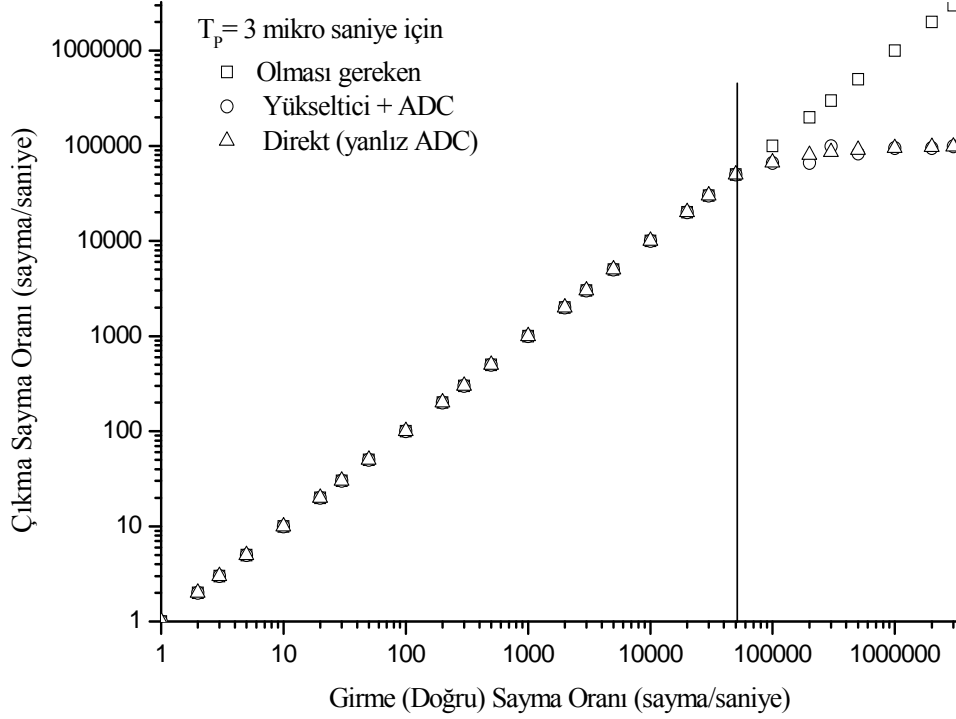
aralığına gelmektedir ki buda genel olarak Şekil 7 ile verilen sayma sisteminde asgari bir pulsun oluşması için gerekli zaman aralığına karşılık gelmektedir. Her bir sayım (ya da rastgele puls) arasındaki zaman fitresi aynı büyüklükte uygulandı. Yani ilk ardışık iki puls arasındaki mesafe en son ardışık iki puls arasındaki zaman farkına eşittir. Tüm çalışma boyunca yalnız ADC durumunda (direk) yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan ölü zaman dikkate alınmadı. Yalnızca kıyaslama için pikleşme zamanı tabiri kullanıldı.

Yükselticinin 3 μ s pikleşme zamanına bağlı olarak çalıştırılan SAYOR programı sonucu aşağıdaki tablo oluşturuldu.

Tablo 2. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları

| Üretilen Foton Sayısı | Fitre (s) | Detektör | Yükseltici | ADC | Direk |
|-----------------------|-------------|----------|------------|-------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 0,333333333 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 0,2 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 0,1 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 20 | 0,05 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 30 | 0,033333333 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 50 | 0,02 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100 | 0,01 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 200 | 0,005 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 300 | 0,003333333 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 500 | 0,002 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 1000 | 0,001 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2000 | 0,0005 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| 3000 | 0,000333333 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| 5000 | 0,0002 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| 10000 | 0,0001 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 20000 | 0,00005 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| 30000 | 3,33333E-05 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 |
| 50000 | 0,00002 | 50000 | 50000 | 50000 | 50000 |
| 100000 | 0,00001 | 100000 | 100000 | 66100 | 66748 |
| 200000 | 0,000005 | 200000 | 100000 | 66188 | 79919 |
| 300000 | 3,33333E-06 | 300000 | 150000 | 99229 | 85616 |
| 500000 | 0,000002 | 500000 | 125000 | 82781 | 90782 |
| 1000000 | 0,000001 | 1000000 | 142858 | 94697 | 94834 |
| 2000000 | 0,0000005 | 2000000 | 142858 | 94493 | 97181 |
| 3000000 | 3,33333E-07 | 3000000 | 150000 | 99341 | 97890 |

Tablo 2 ile verilen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.



Şekil 26. Yükselticinin 3 µs'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranı ile değişimi

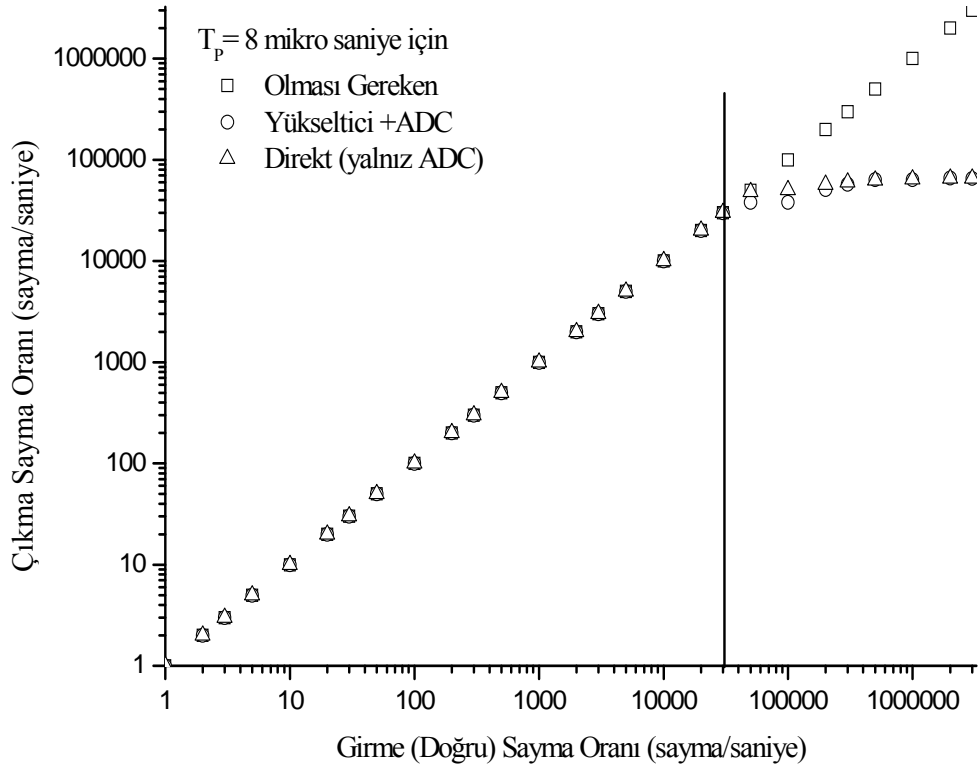
Şekil 26'da girilen sayma oranlarına göre yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çeviriciden çıkan sayma oranları görülmektedir. Girilen sayma oranının belirli bir değerine (yaklaşık 50000 sayma/saniye) kadar lineer bir artış gözlenirken bu noktadan sonra bu lineerlik bozulmaktadır. Bozulmanın başladığı sayma oranı yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çevirici için aynıdır. Bu durum sayma sisteminin her iki hali için sayma oranı kaybının aynı olduğunu göstermektedir.

Yükselticinin 8 µs pikleşme zamanına bağlı olarak çalıştırılan SAYOR programı sonucu aşağıdaki tablo oluşturuldu.

Tablo 3. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları

| Üretilen Foton Sayısı | Fitre (s) | Detektör | Yükseltici | ADC | Direkt |
|-----------------------|-------------|----------|------------|-------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 0,333333333 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 0,2 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 0,1 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 20 | 0,05 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 30 | 0,033333333 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 50 | 0,02 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100 | 0,01 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 200 | 0,005 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 300 | 0,003333333 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 500 | 0,002 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 1000 | 0,001 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2000 | 0,0005 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| 3000 | 0,000333333 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| 5000 | 0,0002 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| 10000 | 0,0001 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 20000 | 0,00005 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| 30000 | 3,33333E-05 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 |
| 50000 | 0,00002 | 50000 | 50000 | 38007 | 48215 |
| 100000 | 0,00001 | 100000 | 50000 | 38121 | 50221 |
| 200000 | 0,000005 | 200000 | 66667 | 50736 | 57098 |
| 300000 | 3,33333E-06 | 300000 | 75000 | 57275 | 59862 |
| 500000 | 0,000002 | 500000 | 83334 | 63669 | 62454 |
| 1000000 | 0,000001 | 1000000 | 83334 | 63684 | 64325 |
| 2000000 | 0,0000005 | 2000000 | 86957 | 66195 | 65413 |
| 3000000 | 3,33333E-07 | 3000000 | 85715 | 65230 | 65773 |

Tablo 3 ile verilen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.



Şekil 27. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranı ile değişimi

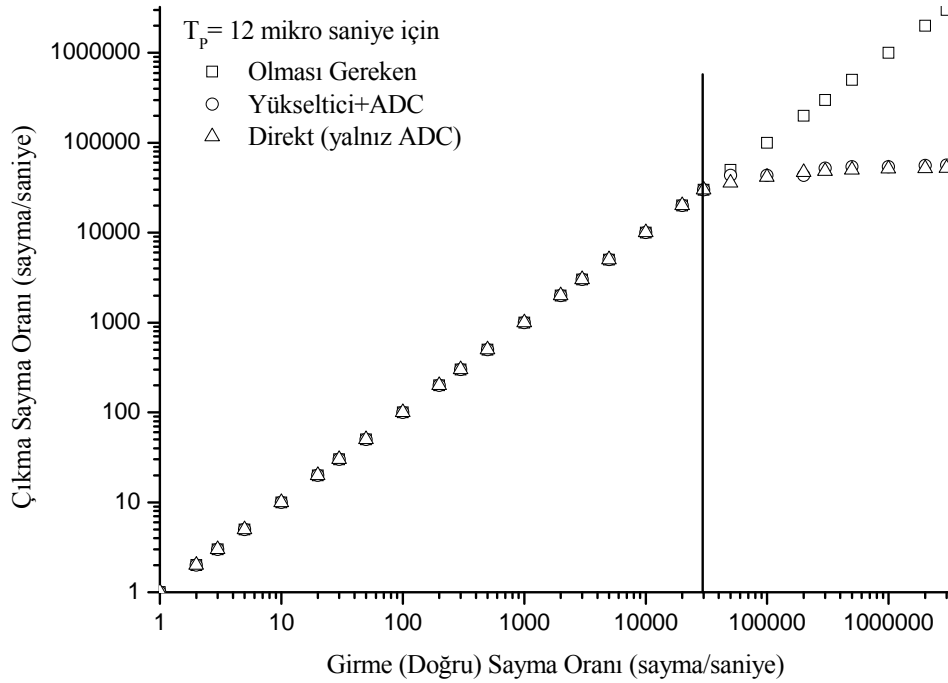
Şekil 27'de girilen sayma oranlarına göre yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çeviriciden çıkan sayma oranları görülmektedir. Girilen sayma oranının belirli bir değerine (yaklaşık 30000 sayma/saniye) kadar lineer bir artış gözlenirken bu noktadan sonra bu lineerlik bozulmaktadır. Bozulmanın başladığı sayma oranı yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çevirici için aynıdır. Bu durum sayma sisteminin her iki hali için sayma oranı kaybının aynı olduğunu göstermektedir.

Yükselticinin 12 μ s pikleşme zamanına bağlı olarak çalıştırılan SAYOR programı sonucu aşağıdaki tablo oluşturuldu.

Tablo 4. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için giren ve çıkan sayma oranları

| Üretilen Foton Sayısı | Fitre (s) | Detektör | Yükseltici | ADC | Direkt |
|-----------------------|-------------|----------|------------|-------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 0,333333333 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 0,2 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 0,1 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 20 | 0,05 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 30 | 0,033333333 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 50 | 0,02 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100 | 0,01 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 200 | 0,005 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 300 | 0,003333333 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 500 | 0,002 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 1000 | 0,001 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2000 | 0,0005 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| 3000 | 0,000333333 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| 5000 | 0,0002 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| 10000 | 0,0001 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 20000 | 0,00005 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |
| 30000 | 3,33333E-05 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 |
| 50000 | 0,00002 | 50000 | 50000 | 43339 | 35660 |
| 100000 | 0,00001 | 100000 | 50000 | 43329 | 41590 |
| 200000 | 0,000005 | 200000 | 50000 | 43328 | 46830 |
| 300000 | 3,33333E-06 | 300000 | 60000 | 52065 | 48077 |
| 500000 | 0,000002 | 500000 | 62500 | 54220 | 49937 |
| 1000000 | 0,000001 | 1000000 | 62500 | 54109 | 51119 |
| 2000000 | 0,0000005 | 2000000 | 64517 | 55916 | 51890 |
| 3000000 | 3,33333E-07 | 3000000 | 65218 | 56499 | 52054 |

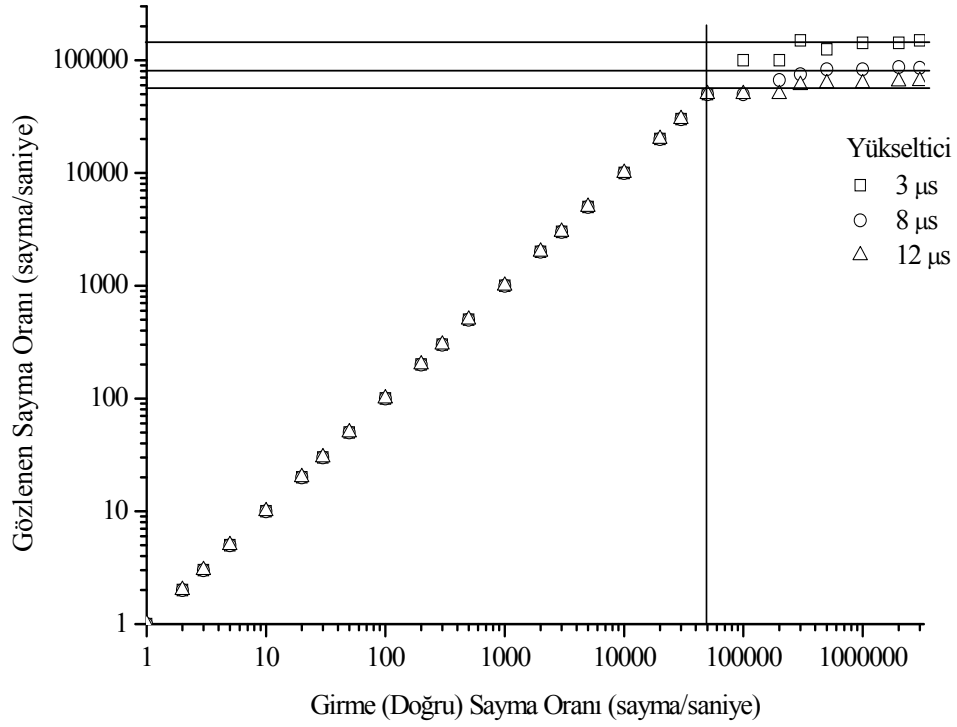
Tablo 4 ile verilen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.



Şekil 28. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için çıkan sayma oranının girme sayma oranı ile değişimi

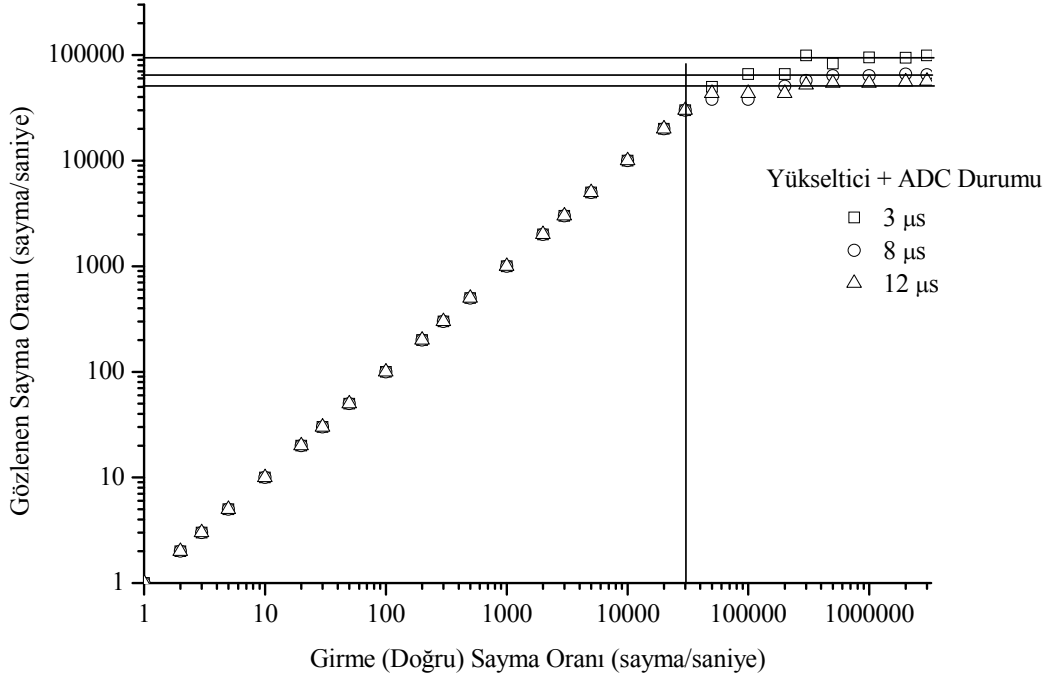
Şekil 28'de girilen sayma oranlarına göre yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çeviriciden çıkan sayma oranları görülmektedir. Girilen sayma oranının belirli bir değerine (yaklaşık 30000 sayma/saniye) kadar lineer bir artış gözlenirken bu noktadan sonra bu lineerlik bozulmaktadır. Bu durum 3 ve 8 μ s'lik pikleşme zamanları için gözlenenlerle hemen hemen aynıdır. Bozulmanın başladığı sayma oranı yükseltici + analog dijital çevirici ve doğrudan analog dijital çevirici için aynıdır. Bu durum 3 ve 8 μ s pikleşme zamanlarında olduğu gibi sayma sisteminin her iki hali için sayma oranı kaybının aynı olduğunu göstermektedir.

Ayrıca yine Tablo 2, 3 ve 4'ten girilen sayma oranlarına karşılık gözlenen sayma oranları, yükselticinin mümkün 3 farklı pikleşme zamanı için yalnız yükseltici, yalnız analog dijital çevirici ve hem yükseltici hem de analog dijital çevirici gibi üç farklı durumda ayrı ayrı belirlendi. Şekil 29'da yalnızca yükseltici durumu için verilen grafik görülmektedir.



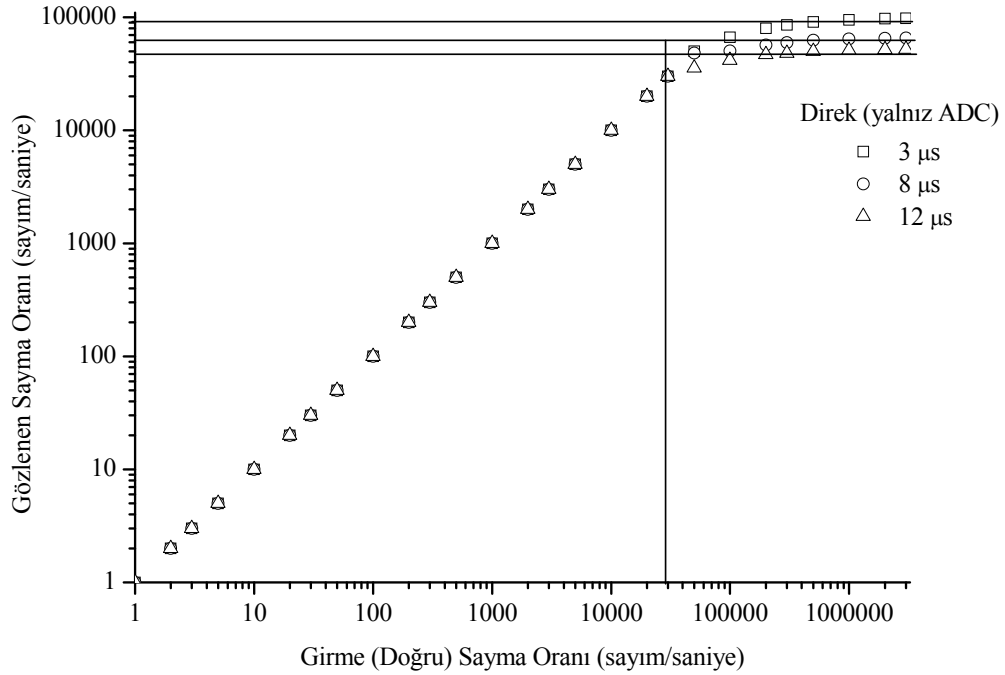
Şekil 29. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yükselticide gözlenen sayma oranları

Şekil 29'da girilen sayma oranlarına göre yükselticinin mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 µs) zamanlarına karşılık gelen gözlenen sayma oranları görülmektedir. Her üç pikleşme zamanında belirli bir girilen sayma oranına kadar (yaklaşık 50000 sayma/saniye) lineer bir artış vardır. Bu girilen sayma oranından sonra lineerlik bozulmaktadır. 3 µs'ye karşılık gelen gözlenen sayma oranı diğerlerinden daha fazladır. Ayrıca yatay eksene paralel çizilen çizgiler ilgili durumun maksimum gözlenen sayma oranlarını ve bu sayma oranlarının bir maksimumuna ulaştıktan sonra sabitleştiğini göstermektedir. Hem yükseltici hem de analog dijital çevirici için de benzeri bir davranışın olduğu Şekil 30'da görülmektedir.



Şekil 30. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yükseltici ve analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları

Şekil 30'da girilen sayma oranlarına göre yükselticinin mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 µs) zamanlarına karşılık hem yükseltici hem de analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları görülmektedir. Her üç pikleşme zamanında belirli bir girilen sayma oranına kadar (yaklaşık 30000 sayma/saniye) lineer bir artış vardır. Bu girilen sayma oranından sonra lineerlik bozulmaktadır. 3 µs'ye karşılık gelen gözlenen sayma oranı diğerlerinden daha fazla olmasına rağmen yalnızca yükselticide gözlenen sayma oranına göre düşüktür. Yalnızca analog dijital çevirici için de benzeri bir davranışın olduğu Şekil 31'de görülmektedir.

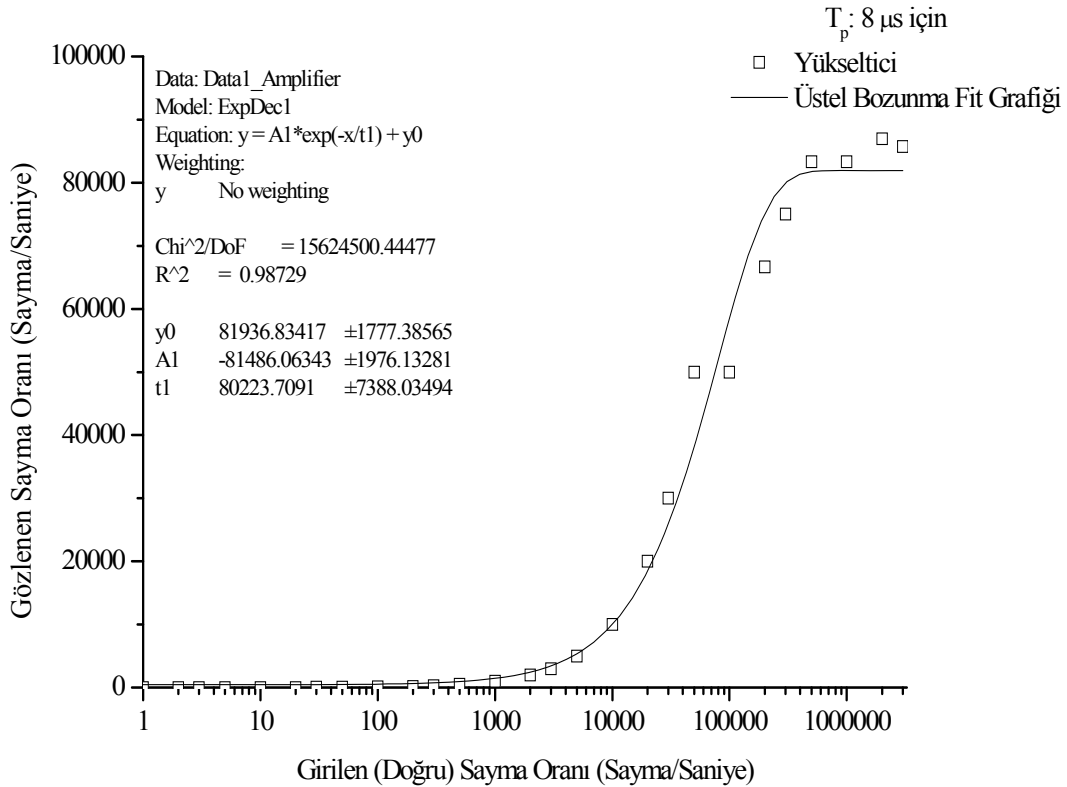


Şekil 31. Yükselticinin 3 farklı pikleşme zamanında girilen sayma oranlarına karşılık yalnızca analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları

Şekil 31'de girilen sayma oranlarına göre yükselticinin mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanlarına karşılık yalnızca analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranları görülmektedir. Her üç pikleşme zamanında belirli bir girilen sayma oranına kadar (30000 sayma/saniye'den biraz düşük) lineer bir artış vardır. Bu girilen sayma oranından sonra lineerlik bozulmaktadır. Bu girilen sayma oranı yükseltici ve ADC'den oluşan birleşik sistemin sayma oranı ile hemen hemen aynıdır. 3 μ s'e karşılık gelen gözlenen sayma oranı diğerlerinden daha fazla olmasına rağmen yalnızca yükselticide gözlenen sayma oranına göre düşüktür. Fakat hem yükseltici hem de analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranını ile hemen hemen aynıdır.

3.3.2. Giren ve Çıkan Sayma Oranları Arasındaki İlişkilerin Ampirik İfadeleri

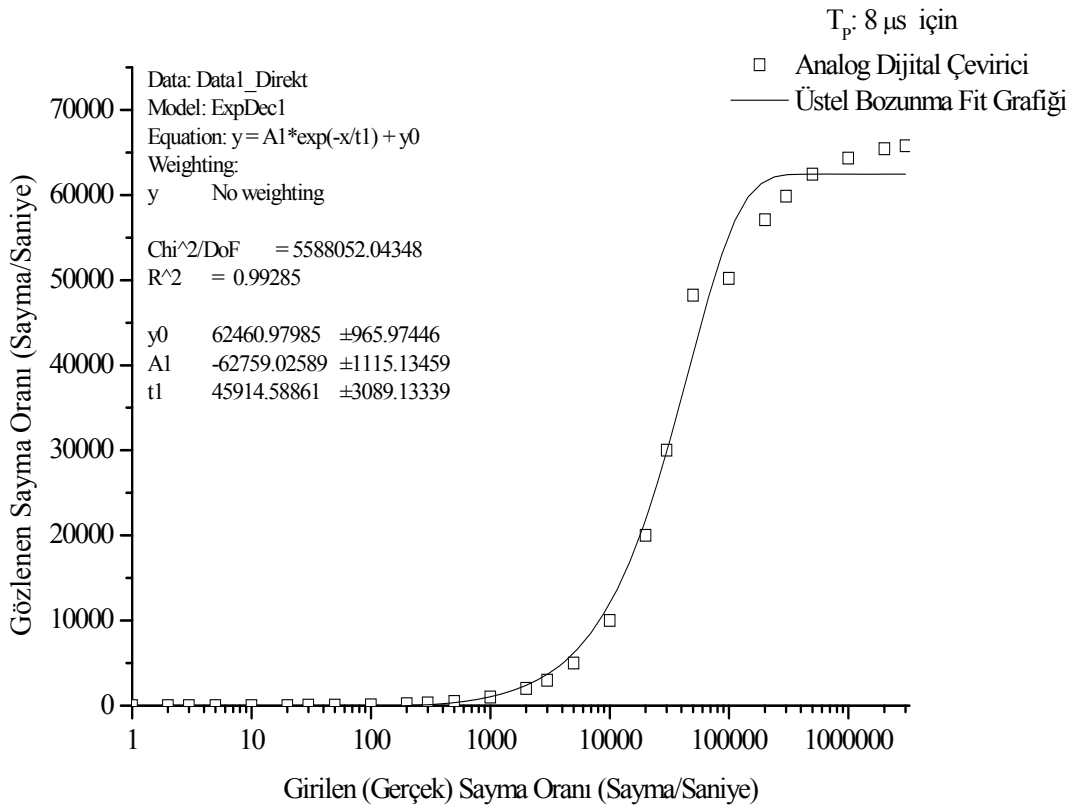
Yükselticinin pikleşme modülünde bulunan mümkün üç farklı (3, 8 ve 12 μ s) pikleşme zamanının sayma oranına etkisi, doğrudan yükseltici, analog dijital çevirici ve yükseltici ve analog dijital çeviriciden oluşan birleşik sistem olmak üzere üç farklı durum için irdelendi. Yükselticiye giren ve çıkan sayma oranları arasındaki ilişkinin deneye dayalı ifadeleri için yalnızca 8 μ s pikleşme zamanı ile oluşturulan değerler kullanıldı. Diğer pikleşme zamanlarında da aynı davranış gözlemlendiğinden burada bu pikleşme zamanına ait davranışlar gösterildi. Tablo 3'ten faydalanarak yalnızca yükseltici için girilen sayma oranı değerlerine karşılık gelen gözlenen sayma oranı için aşağıda verilen fit grafiği çizildi.



Şekil 32. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnız yükselticide gözlenen sayma oranı

Şekil 32'den görüldüğü üzere girilen (doğru-gerçek) sayma oranı ile çıkma sayma oranı arasında ilişki, girilen sayma oranının belirli bir değerine kadar lineer artan bir özellik gösterirken bu değerden (yaklaşık 50000 sayma/saniye) sonra lineer artma özelliği bozulmaktadır. Ayrıca bu belirli girilen sayma oranından sonra (yaklaşık 400000 sayma/saniye) gözlenen sayma oranı sabitlenmektedir. Bu gözlenen sabit sayma oranı da yaklaşık 80000 değerine karşılık gelmektedir. Girilen ve gözlenen sayma oranları arasındaki ilişkinin, bu verilere göre bir eğri uydurulmaya çalışıldığında üstel bozunma kanununa uygun olduğu gözlemlendi.

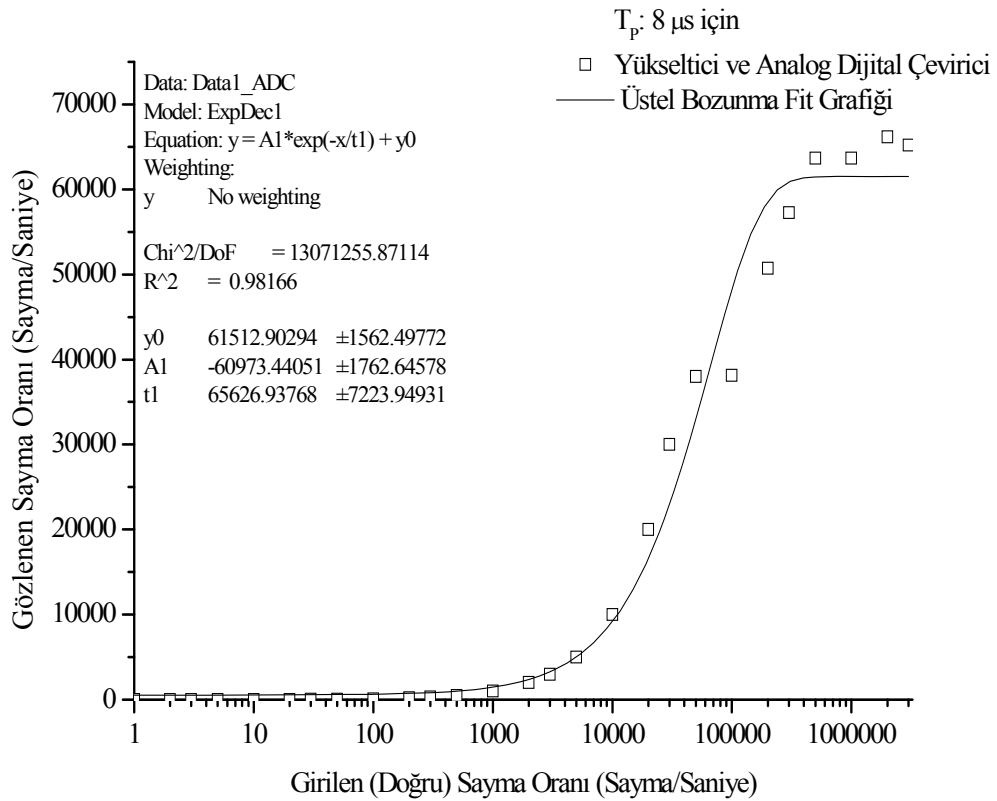
Yalnız analog dijital çevirici halinde girilen sayma oranı değerine karşılık gözlenen sayma oranı için aşağıda verilen grafik çizildi:



Şekil 33. Yükselticinin 8 µs'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnız analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranı

Şekil 33'ten görüldüğü üzere girme sayma oranı ile çıkma sayma oranı arasındaki ilişki, girme sayma oranının belirli bir değerine kadar lineer artan bir özellik gösterirken bu değerden (yaklaşık 30000 sayma/saniye) sonra lineer artma özelliği bozulmaktadır. Ayrıca bu belirli girme sayma oranından sonra gözlenen sayma oranı sabitlenmektedir. Bu gözlenen sayma oranı da yaklaşık 60000 değerine karşılık gelmektedir. Yine girilen ve gözlenen sayma oranları arasındaki ilişkinin, bu verilere göre bir eğri uydurulmaya çalışıldığında üstel bozunma kanununa uygun olduğu gözlemlendi.

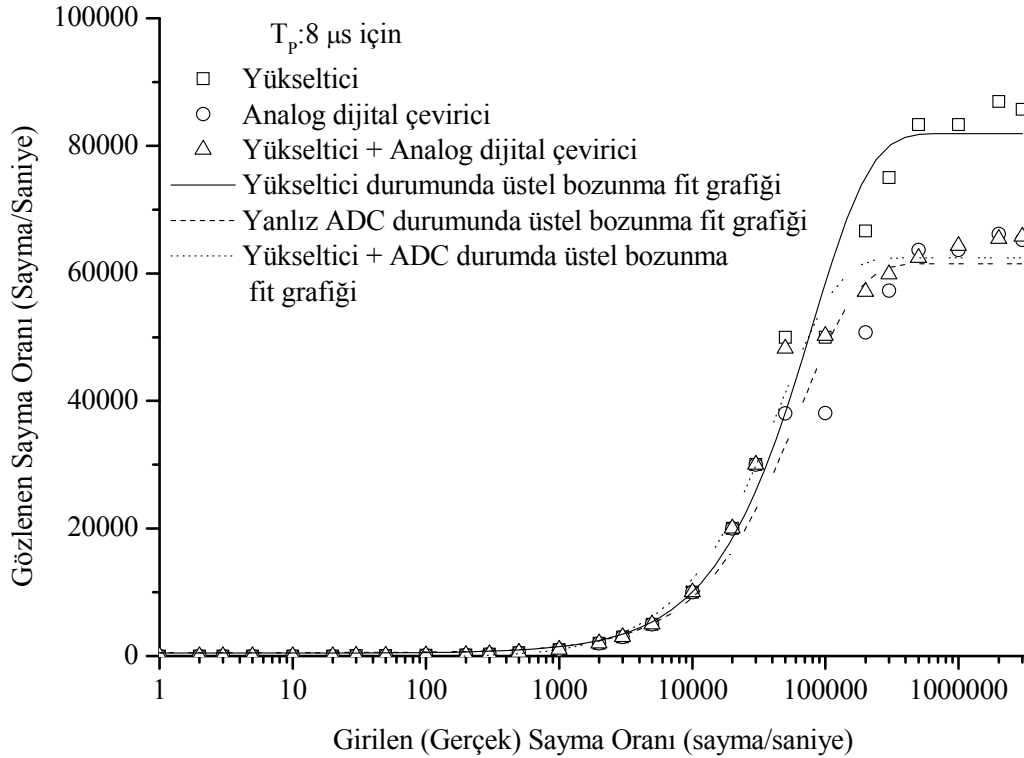
Önce yükseltici sonra analog dijital çevirici için girilen sayma oranı değerine karşılık gözlenen sayma oranı için aşağıda verilen grafik çizildi.



Şekil 34. Yükselticinin $8 \mu s$ 'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık önce yükseltici sonra analog dijital çeviricide gözlenen sayma oranı

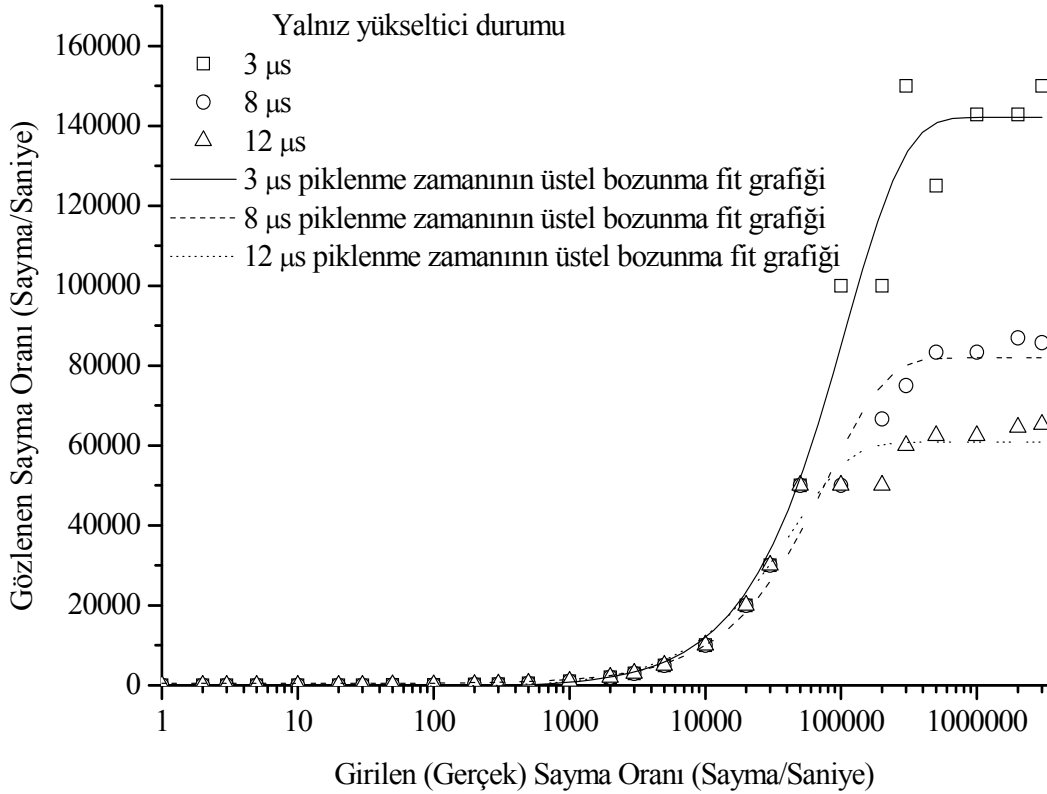
Şekil 34'ten görüldüğü üzere girme sayma oranı ile çıkma sayma oranı arasındaki ilişki, girme sayma oranının belirli bir değerine kadar lineer artan bir özellik gösterirken bu değerden (yaklaşık 30000 sayma/saniye) sonra lineer artma özelliği bozulmaktadır. Ayrıca bu belirli bir girme (doğru) sayma oranından sonra gözlenen sayma oranı sabitlenmektedir. Bu gözlenen sayma oranı da yaklaşık 60000 değerine karşılık gelmektedir. Yine girilen ve gözlenen sayma oranları arasındaki ilişkinin, bu verilere göre bir eğri uydurulmaya çalışıldığında üstel bozunma kanununa uygun olduğu gözlemlendi. Ayrıca bu durumdaki davranış ile yalnız analog dijital çevirici durumunda gözlenen davranışın hemen hemen aynı olduğu söylenebilir.

Her üç durumu bir arada görebilmek amacıyla girilen sayma oranı değerine karşılık gelen gözlenen sayma oranı için aşağıdaki grafik çizildi.



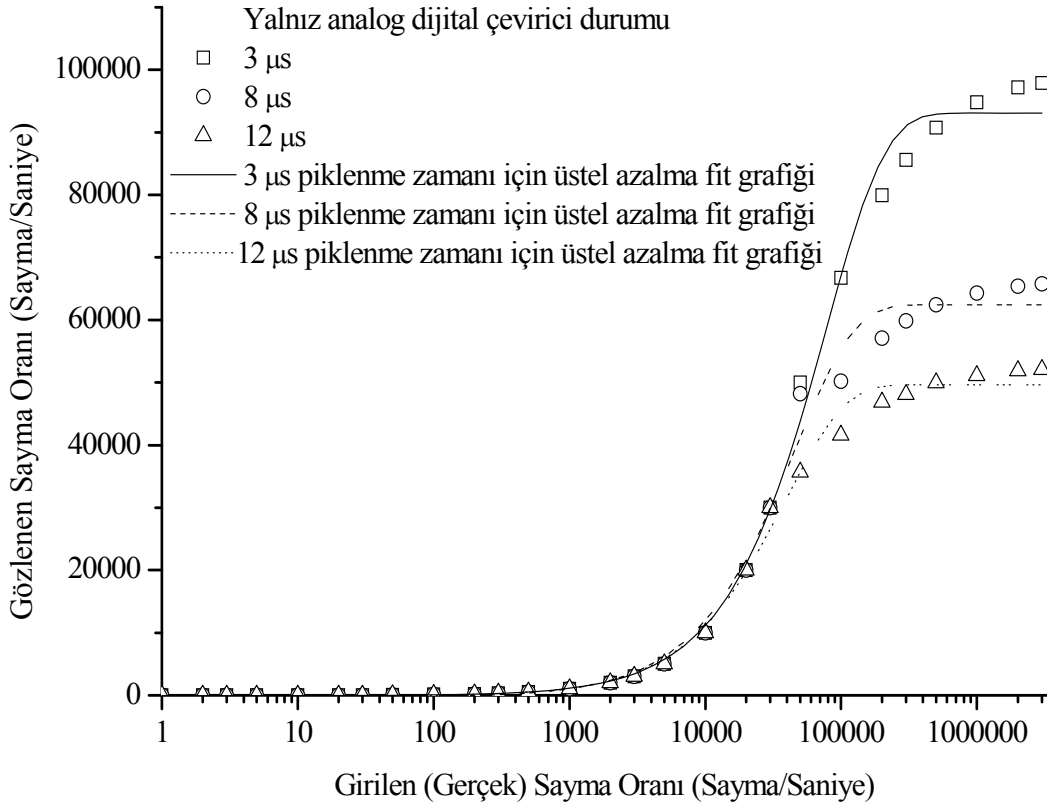
Şekil 35. Yükselticinin $8 \mu s$ 'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık her üç durumun gözlenen sayma oranı

Yükselticinin mümkün her üç pikleşme zamanı için her bir durumun (yalnız yükseltici, analog dijital çevirici ve yükseltici + analog dijital çevirici oluşan durum) grafikleri sırasıyla aşağıda verildi:



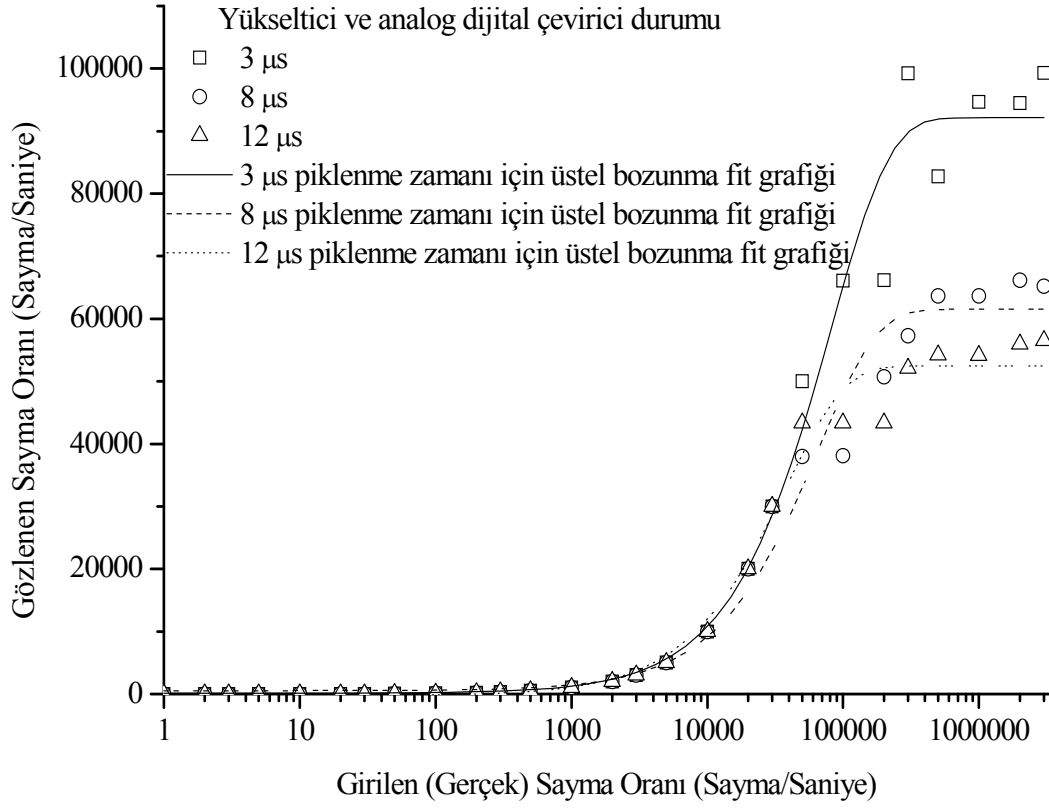
Şekil 36. Yükselticinin 3, 8 ve 12 µs'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yalnızca yükselticinin gözlenen sayma oranları

Yükselticinin girilen üç olası pikleşme zamanına göre yükselticiye giren ve yükselticiden çıkan sayma oranları arasındaki ilişki Şekil 36'da görülmektedir. Yalnızca yükselticiden oluşan sistemler için pikleşme zamanının artmasıyla yükselticiden çıkan pulsların sayısı önemli oranda azalmaktadır. Bu nedenle bu tür sayma sistemleri için sayma kayıplarını azaltma uygun pikleşme zamanını gerektirmektedir.



Şekil 37. Yükselticinin 3, 8 ve 12 µs'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık direk analog dijital çeviricinin gözlenen sayma oranları

Analog dijital çeviriciye direk giren ve çıkan sayma oranları Şekil 37'de görülmektedir. Yalnız analog dijital çeviriciden oluşan sistemler için rastgele gelen pulsların enerji değerinin belirlenmesi için geçen süre (çevrilme zamanı) gözlenen pulsların sayısını önemli oranda azaltmaktadır. Ayrıca bu durumda yığılma pulslarının oluşması ihtimali birleşik sistemlerde oluşma ihtimalinden daha fazladır. Şekil 38 ile verilen grafik ise yükseltici ve analog dijital çeviriciden oluşan birleşik durumda yükselticiye giren ve analog dijital çeviriciden çıkan puls (sayma) oranları arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 38. Yükselticinin 3, 8 ve 12 µs'lik pikleşme zamanında girilen sayma oranına karşılık yükseltici ve analog dijital çeviricinin gözlenen sayma oranları

Şekil 38 ile direk analog dijital giren ve çıkan sayma oranlarını arasındaki ilişkiyi veren Şekil 37 ile hemen hemen aynıdır. Ayrıca burada yığılma pulslarını azaltmak için yükselticiyi de içeren sayma sistemlerinin kullanılmasıyla daha fazla bir sayma kaybının olmadığı ifade edilebilir. Yani yığılma pulslarından kaçınmak için yükselticinin kullanılması ek kayıpların yaşanmasına yol açmamaktadır.

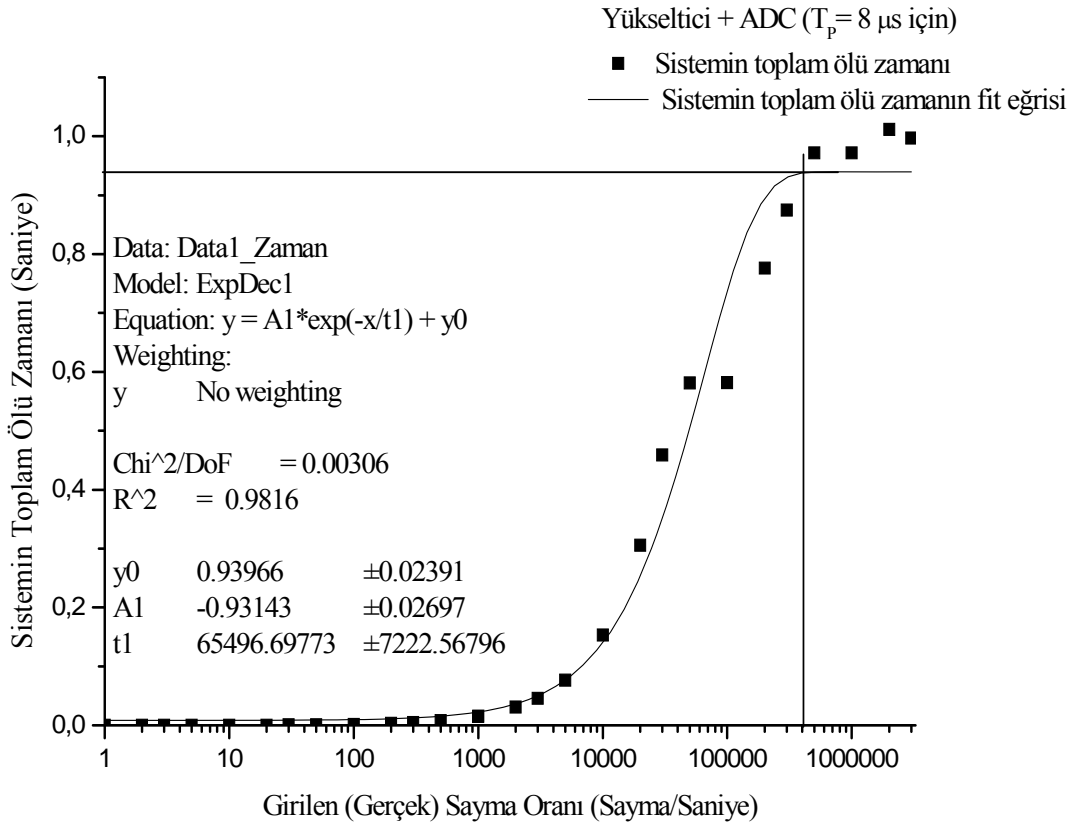
3.3.3. Girilen Sayma Oranı ile Ölü Zaman Arasındaki İlişki

Girilen sayma oranlarına karşılık gelen sistemin toplam ölü zamanı, SAYOR programına yapılan çalışmalar bölümünün 2.2 kısmında detaylı bir şekilde irdelemesi yapılan ve (43–45) numaralı denklemler ile verilen ölü zaman ifadeleri ve Denklem (43)'ün içerisinde bulunan yükselticinin minimum ayırma zamanını veren (50) numaralı denklemi içeren bir modülün eklenmesiyle belirlendi. Girilen sayma oranları (üretilen foton sayısı) ve bunlara karşılık gelen sistemin toplam ölü zamanı Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Sayma oranlarına karşılık gelen ölü zamanlar

| Üretilen Foton Sayısı | Sistemin Toplam Ölü Zaman (s) |
|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 0,0000118 |
| 2 | 0,0000235 |
| 3 | 0,0000397 |
| 5 | 0,0000794 |
| 10 | 0,0001504 |
| 20 | 0,0003212 |
| 30 | 0,0004874 |
| 50 | 0,0007946 |
| 100 | 0,001537 |
| 200 | 0,0030724 |
| 300 | 0,0045927 |
| 500 | 0,0076011 |
| 1000 | 0,0152965 |
| 2000 | 0,0305782 |
| 3000 | 0,0458646 |
| 5000 | 0,0767402 |
| 10000 | 0,1528964 |
| 20000 | 0,3059243 |
| 30000 | 0,4588688 |
| 50000 | 0,5813559 |
| 100000 | 0,5818101 |
| 200000 | 0,7761602 |
| 300000 | 0,8749008 |
| 500000 | 0,9720183 |
| 1000000 | 0,9718153 |
| 2000000 | 1,0120046 |
| 3000000 | 0,9973315 |

Üretilen foton sayısı (girilen sayma oranı) ve buna karşılık gelen sistemin toplam ölü zamanı arasındaki ilişkiyi daha iyi görebilmek için aşağıdaki grafik çizildi ve ilişkinin saptanabilmesi için fit edildi.



Şekil 39. Sayma oranına karşılık ölü zaman grafiği

Girilen sayma oranının artması ile ölü zamanın da arttığı Şekil 39'dan görülmektedir. Ayrıca girilen sayma oranı ile sistemin toplam ölü zamanı arasındaki ilişkinin üstel artma şeklinde olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak girilen sayma oranının belli bir değerine (yaklaşık 400000 sayma/saniye) kadar ölü zaman artmakta bu noktadan sonra sabitleşmektedir. Bu sabitleşme noktası yaklaşık 0,9 saniyedir. Bu da bize yüksek sayma oranlarında neredeyse tüm zamanın ölü zaman olduğunu göstermektedir. Yani detektör şok olmakta ve işlevini yerine getirememektedir.

3.4. Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu, Yığılma Pulsu Reddetme ve Sayma Oranı Üzerine Etkisi

Yapılan çalışmalar bölümünün 2.6 kısmında ifade edilen modelleme üzerine kodlanan PILEUP programı çalıştırıldı. Program sonucunda aşağıda verilen bulgulara ulaşıldı.

3.4.1. Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu Oranına Etkisi

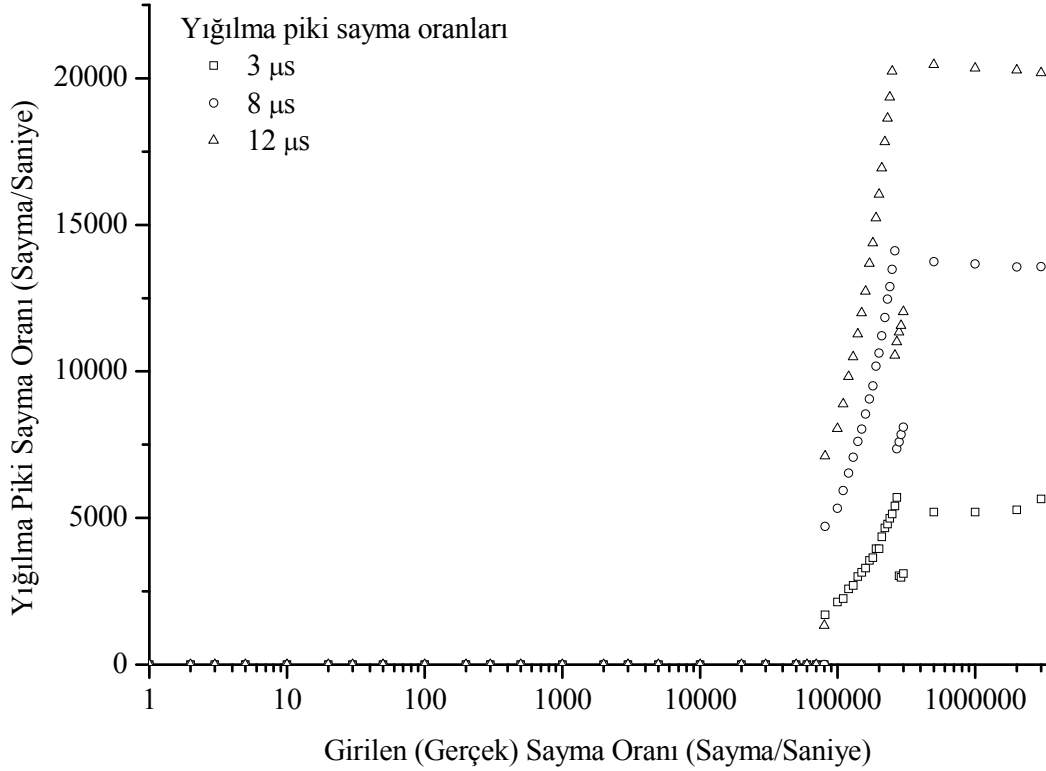
İlk olarak yükselticinin pikleşme modülünde bulunan ve sıklıkla kullanılan mümkün üç farklı pikleşme zamanının (3, 8 ve 12 μ s) yığılma pulsu (piki) sayma oranına etkisi irdelendi. İrdeleme yükseltici ve analog dijital çeviriciden oluşan birleşik durum için yerine getirildi. İrdeleme, programın başlangıcında girilen (doğru) sayma oranından program sonunda çıkan yığılma pulsu sayma oranının belirlenmesi esasına dayanır. Bu kısımdaki çalışma her bir pikleşme zamanı için girilen sayma oranı saniye başına 1 sayımdan başlamak üzere 3000000 sayıma kadar olan 49 farklı sayma oranı için yapıldı. Yığılma pulsunun oluşmaya başladığı kritik sayma oranlarında girilen sayma oranı aralığı sıklaştırıldı. Bu sıklaştırma bu sayma oranlarındaki değişimi daha net görebilmek adına yapıldı. Her bir sayım arasındaki zaman filtresi aynı büyüklükte uygulandı. Yani ilk ardışık iki puls arasındaki süre en son ardışık iki puls arasındaki süreye eşittir.

Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanlarına bağlı olarak çalıştırılan PILEUP programı sonucu ulaşılan yığılma pulsu sayma oranı sonuçları ve yapılan çalışmalar bölümünün 2.6 kısmında önerilen model ile teorik olarak hesaplanan yığılma piki sayma oranı sonuçları için aşağıda verilen tablo oluşturuldu.

Tablo 6. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan yığılma pik oranları

| Üretilen Foton Sayısı | 3 μ s | | 8 μ s | | 12 μ s | |
|-----------------------|------------|---------|------------|----------|------------|----------|
| | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model |
| 1 | 0 | 0,03 | 0 | 0,08 | 0 | 0,12 |
| 2 | 0 | 0,06 | 0 | 0,16 | 0 | 0,24 |
| 3 | 0 | 0,09 | 0 | 0,23 | 0 | 0,35 |
| 5 | 0 | 0,15 | 0 | 0,39 | 0 | 0,59 |
| 10 | 0 | 0,29 | 0 | 0,78 | 0 | 1,18 |
| 20 | 0 | 0,59 | 0 | 1,56 | 0 | 2,35 |
| 30 | 0 | 0,88 | 0 | 2,35 | 0 | 3,53 |
| 50 | 0 | 1,47 | 0 | 3,91 | 0 | 5,88 |
| 100 | 0 | 2,94 | 0 | 7,82 | 0 | 11,77 |
| 200 | 0 | 5,88 | 0 | 15,64 | 0 | 23,53 |
| 300 | 0 | 8,82 | 0 | 23,45 | 0 | 35,28 |
| 500 | 0 | 14,69 | 0 | 39,06 | 0 | 58,77 |
| 1000 | 0 | 29,34 | 0 | 78,02 | 0 | 117,38 |
| 2000 | 0 | 58,53 | 0 | 155,63 | 0 | 234,11 |
| 3000 | 0 | 87,57 | 0 | 232,84 | 0 | 350,20 |
| 5000 | 0 | 145,20 | 0 | 386,04 | 0 | 580,48 |
| 10000 | 0 | 286,70 | 0 | 762,07 | 0 | 1145,22 |
| 20000 | 0 | 558,95 | 0 | 1485,16 | 0 | 2229,15 |
| 30000 | 0 | 817,48 | 0 | 2171,28 | 0 | 3255,07 |
| 50000 | 0 | 1296,13 | 0 | 3440,02 | 0 | 5145,16 |
| 60000 | 0 | 1517,52 | 0 | 4026,15 | 0 | 6015,03 |
| 70000 | 0 | 1727,76 | 0 | 4582,30 | 0 | 6838,36 |
| 80000 | 0 | 1927,40 | 0 | 5110,00 | 1333 | 7617,62 |
| 81000 | 1697 | 1946,80 | 4710 | 5161,27 | 7106 | 7693,22 |
| 100000 | 2133 | 2297,01 | 5333 | 6085,83 | 8048 | 9053,27 |
| 110000 | 2254 | 2467,97 | 5942 | 6536,63 | 8883 | 9714,01 |
| 120000 | 2586 | 2630,32 | 6534 | 6964,38 | 9821 | 10339,38 |
| 130000 | 2694 | 2784,49 | 7067 | 7370,25 | 10488 | 10931,29 |
| 140000 | 3002 | 2930,88 | 7608 | 7755,37 | 11270 | 11491,52 |
| 150000 | 3144 | 3069,91 | 8030 | 8120,79 | 11993 | 12021,77 |
| 160000 | 3286 | 3201,92 | 8550 | 8467,51 | 12729 | 12523,65 |
| 170000 | 3554 | 3327,29 | 9056 | 8796,51 | 13678 | 12998,66 |
| 180000 | 3650 | 3446,34 | 9512 | 9108,67 | 14375 | 13448,26 |
| 190000 | 3949 | 3559,39 | 10180 | 9404,88 | 15227 | 13873,80 |
| 200000 | 3954 | 3666,74 | 10622 | 9685,93 | 16032 | 14276,56 |
| 210000 | 4353 | 3768,68 | 11219 | 9952,60 | 16925 | 14657,77 |
| 220000 | 4662 | 3865,49 | 11830 | 10205,64 | 17828 | 15018,58 |
| 230000 | 4793 | 3957,42 | 12467 | 10445,74 | 18635 | 15360,08 |
| 240000 | 4996 | 4044,72 | 12890 | 10673,56 | 19359 | 15683,30 |
| 250000 | 5139 | 4127,62 | 13482 | 10889,72 | 20241 | 15989,23 |
| 260000 | 5413 | 4206,34 | 14108 | 11094,83 | 10548 | 16278,79 |
| 270000 | 5706 | 4281,10 | 7364 | 11289,45 | 11002 | 16552,85 |
| 280000 | 3032 | 4352,09 | 7594 | 11474,11 | 11339 | 16812,24 |
| 290000 | 2977 | 4419,50 | 7852 | 11649,33 | 11563 | 17057,76 |
| 300000 | 3113 | 4483,52 | 8092 | 11815,59 | 12036 | 17290,13 |
| 500000 | 5197 | 5261,00 | 13745 | 13820,65 | 20456 | 20031,94 |
| 1000000 | 5203 | 5657,65 | 13669 | 14821,81 | 20347 | 21312,54 |
| 2000000 | 5283 | 5689,82 | 13565 | 14899,59 | 20281 | 21399,64 |
| 3000000 | 5642 | 5690,00 | 13570 | 14900,00 | 20185 | 21400,00 |

Tablo 6’da yükselticinin mümkün üç pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanına bağlı olarak PILEUP programı ile belirlenen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.

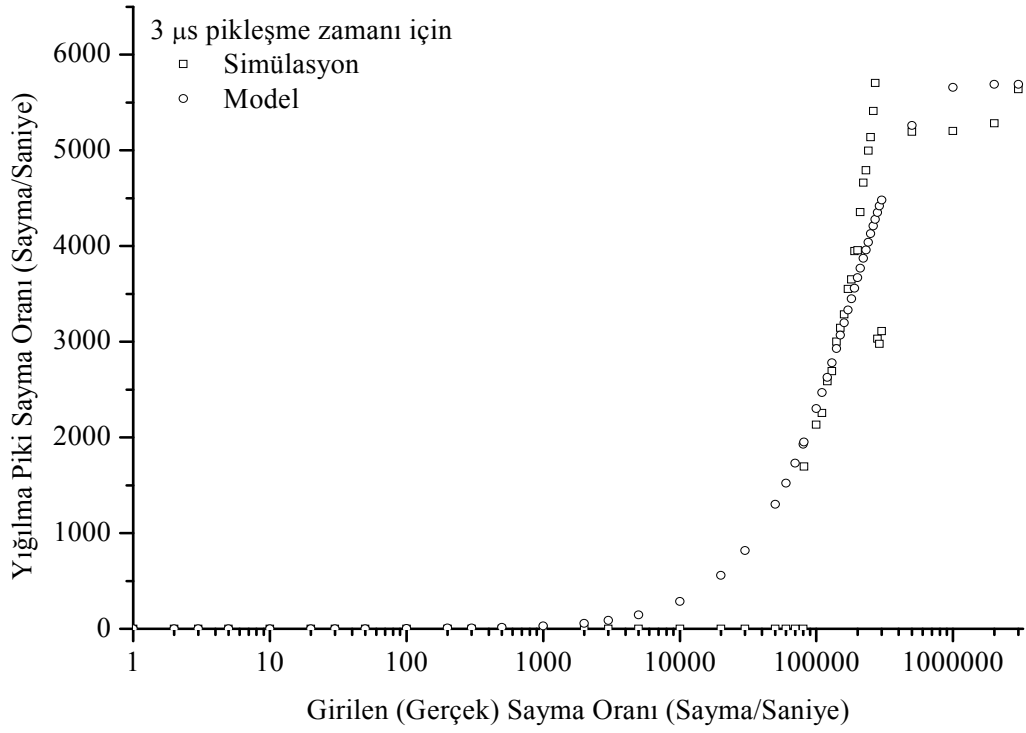


Şekil 40. Yükselticinin pikleşme zamanı ile yığılma pik sayma oranlarının değişimi

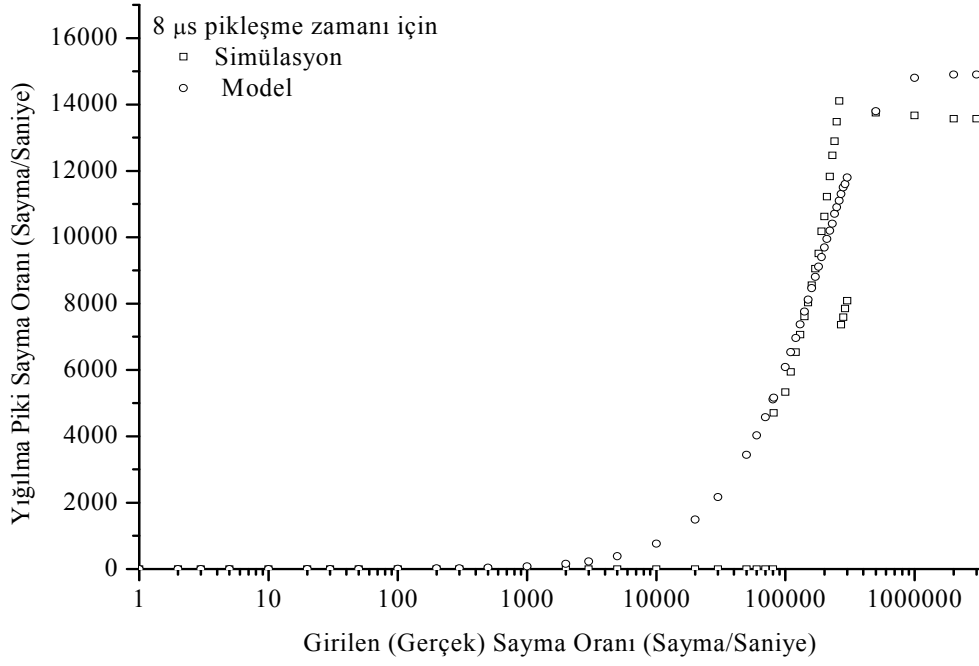
Şekil 40’ta yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olarak sistemin yığılma piki sayma oranı değişimi görülmektedir. Bu grafikten hem girilen foton sayısının artması hem de girilen pikleşme zamanı ile yığılma pik sayma oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca belirli bir girilen sayma oranında bu yığılma piki sayma oranı sabitleşmektedir. Bunlara ek olarak belirli bir girme sayma oranında, artmakta olan yığılma piki sayma oranı aniden belirli bir yığılma piki sayma oranı değerine düşmekte ve sonra artan girilen sayma oranı ile birlikte tekrar artmaya başladığı görülmektedir.

Önerilen model ile yükselticinin en çok kullanılan mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanında girilen sayma oranlarına karşılık gelen yığılma piki sayma oranları ile

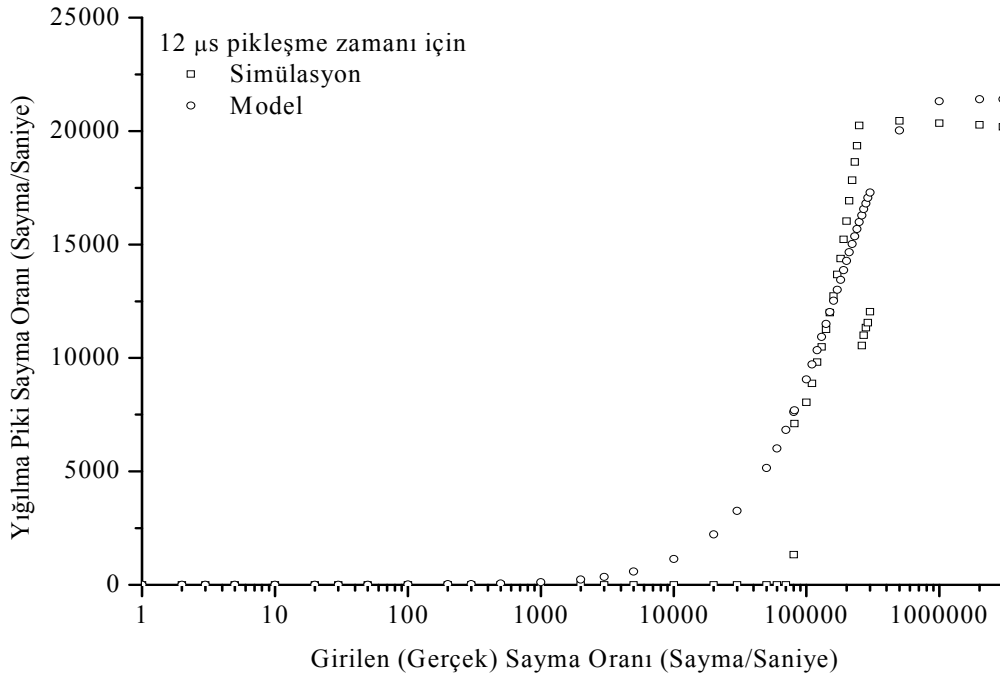
simülasyon sonucu belirlenen yığılma piki sayma oranlarının karşılaştırılması amacıyla aşağıda verilen grafikler sırayla çizildi.



Şekil 41. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması



Şekil 42. Yükselticinin 8 μ slik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması



Şekil 43. Yükselticinin 12 μ slik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik oranlarının karşılaştırılması

Şekil 41–43'ten yükselticinin mümkün üç pikleşme zamanı için hem PILEUP programı ile hesaplanan hem de model ile öngörülen yığılma piki sayma oranlarının oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

3.4.2. Pikleşme Zamanının Yığılma Pulsu Reddetme (PUR) Oranına Etkisi

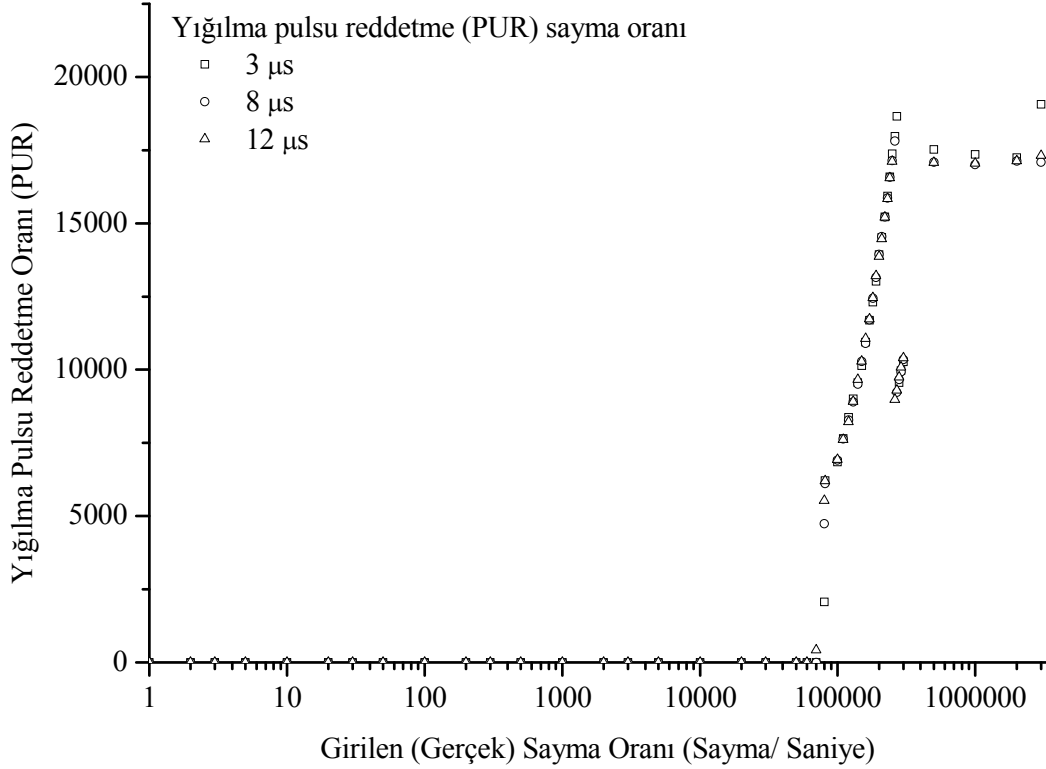
Yükselticinin pikleşme modülünde bulunan ve sıklıkla kullanılan mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanının yığılma pulsu (piki) reddetme (PUR) sayma oranına etkisi irdelendi. İrdeleme yükseltici ve analog dijital çeviriciden oluşan birleşik durum için yerine getirildi. İrdeleme, programın başlangıcında girilen (doğru) sayma oranından program sonunda çıkan sayma oranının belirlenmesi esasına dayanır. Bu kısımdaki çalışma, her bir pikleşme zamanı için girilen sayma oranı saniye başına 1 sayımdan başlamak üzere 3000000 sayıma kadar olan 49 farklı sayma oranı için yapıldı. Yığılma pulsu reddetmenin başladığı kritik sayma oranlarında girilen sayma oranı aralığı sıklaştırıldı. Bu sıklaştırma bu sayma oranlarındaki değişimi daha net görebilmek adına yapıldı. Her bir sayım arasındaki zaman filtresi aynı büyüklükte uygulandı. Yani ilk ardışık iki puls arasındaki süre en son ardışık iki puls arasındaki süreye eşittir.

Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanlarına bağlı olarak çalıştırılan PILEUP programı sonucu ulaşılan yığılma pulsu (piki) reddetme (PUR) sayma oranı sonuçları ve yapılan çalışmalar bölümünün 2.6 kısmında önerilen model ile teorik olarak hesaplanan yığılma piki reddetme (PUR) sayma oranı sonuçları için aşağıda verilen tablo oluşturuldu.

Tablo 7. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan yığılma piki reddetme (PUR) oranları

| Üretilen Foton Sayısı | 3 μ s | | 8 μ s | | 12 μ s | |
|-----------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model |
| 1 | 0 | 0,10 | 0 | 0,10 | 0 | 0,10 |
| 2 | 0 | 0,20 | 0 | 0,20 | 0 | 0,20 |
| 3 | 0 | 0,29 | 0 | 0,29 | 0 | 0,29 |
| 5 | 0 | 0,49 | 0 | 0,49 | 0 | 0,49 |
| 10 | 0 | 0,98 | 0 | 0,98 | 0 | 0,98 |
| 20 | 0 | 1,96 | 0 | 1,96 | 0 | 1,96 |
| 30 | 0 | 2,95 | 0 | 2,95 | 0 | 2,94 |
| 50 | 0 | 4,91 | 0 | 4,91 | 0 | 4,89 |
| 100 | 0 | 9,82 | 0 | 9,81 | 0 | 9,79 |
| 200 | 0 | 19,64 | 0 | 19,62 | 0 | 19,57 |
| 300 | 0 | 29,45 | 0 | 29,43 | 0 | 29,35 |
| 500 | 0 | 49,05 | 0 | 49,02 | 0 | 48,88 |
| 1000 | 0 | 97,98 | 0 | 97,92 | 0 | 97,63 |
| 2000 | 0 | 195,45 | 0 | 195,32 | 0 | 194,73 |
| 3000 | 0 | 292,42 | 0 | 292,22 | 0 | 291,29 |
| 5000 | 0 | 484,86 | 0 | 484,49 | 0 | 482,83 |
| 10000 | 0 | 957,34 | 0 | 956,42 | 0 | 952,56 |
| 20000 | 0 | 1866,44 | 0 | 1863,93 | 0 | 1854,15 |
| 30000 | 0 | 2729,74 | 0 | 2725,02 | 0 | 2707,49 |
| 50000 | 0 | 4328,03 | 0 | 4317,34 | 0 | 4279,62 |
| 60000 | 0 | 5067,29 | 0 | 5052,95 | 0 | 5003,16 |
| 70000 | 0 | 5769,31 | 0 | 5750,94 | 416 | 5687,98 |
| 80000 | 2070 | 6435,96 | 4737 | 6413,22 | 5534 | 6336,15 |
| 81000 | 6220 | 6500,75 | 6113 | 6477,56 | 6196 | 6399,03 |
| 100000 | 6852 | 7670,17 | 6913 | 7637,91 | 6920 | 7530,29 |
| 110000 | 7649 | 8241,04 | 7637 | 8203,69 | 7608 | 8079,88 |
| 120000 | 8368 | 8783,14 | 8278 | 8740,53 | 8217 | 8600,05 |
| 130000 | 9011 | 9297,93 | 8904 | 9249,92 | 8907 | 9092,38 |
| 140000 | 9557 | 9786,78 | 9505 | 9733,25 | 9660 | 9558,37 |
| 150000 | 10134 | 10251,00 | 10277 | 10191,86 | 10280 | 9999,42 |
| 160000 | 10942 | 10691,83 | 10896 | 10627,01 | 11065 | 10416,86 |
| 170000 | 11695 | 11110,45 | 11706 | 11039,91 | 11725 | 10811,97 |
| 180000 | 12312 | 11507,98 | 12446 | 11431,69 | 12461 | 11185,93 |
| 190000 | 13019 | 11885,47 | 13152 | 11803,43 | 13206 | 11539,89 |
| 200000 | 13932 | 12243,95 | 13939 | 12156,16 | 13864 | 11874,89 |
| 210000 | 14525 | 12584,36 | 14547 | 12490,85 | 14469 | 12191,98 |
| 220000 | 15222 | 12907,62 | 15223 | 12808,42 | 15207 | 12492,09 |
| 230000 | 15929 | 13214,59 | 15860 | 13109,75 | 15834 | 12776,14 |
| 240000 | 16584 | 13506,10 | 16573 | 13395,67 | 16545 | 13044,99 |
| 250000 | 17375 | 13782,91 | 17137 | 13666,96 | 17110 | 13299,46 |
| 260000 | 17971 | 14045,78 | 17815 | 13924,38 | 8982 | 13540,30 |
| 270000 | 18657 | 14295,41 | 9235 | 14168,63 | 9289 | 13768,26 |
| 280000 | 9563 | 14532,46 | 9666 | 14400,39 | 9739 | 13984,02 |
| 290000 | 9962 | 14757,56 | 9923 | 14620,30 | 10080 | 14188,23 |
| 300000 | 10271 | 14971,32 | 10349 | 14828,96 | 10402 | 14381,51 |
| 500000 | 17522 | 17567,47 | 17091 | 17345,38 | 17071 | 16662,08 |
| 1000000 | 17349 | 18891,99 | 17008 | 18601,87 | 17047 | 17727,26 |
| 2000000 | 17248 | 18999,39 | 17124 | 18699,49 | 17125 | 17799,70 |
| 3000000 | 19068 | 19000,00 | 17084 | 18700,00 | 17307 | 17800,00 |

Tablo 7’de yükselticinin mümkün üç pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanına bağlı olarak PILEUP programı ile belirlenen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.

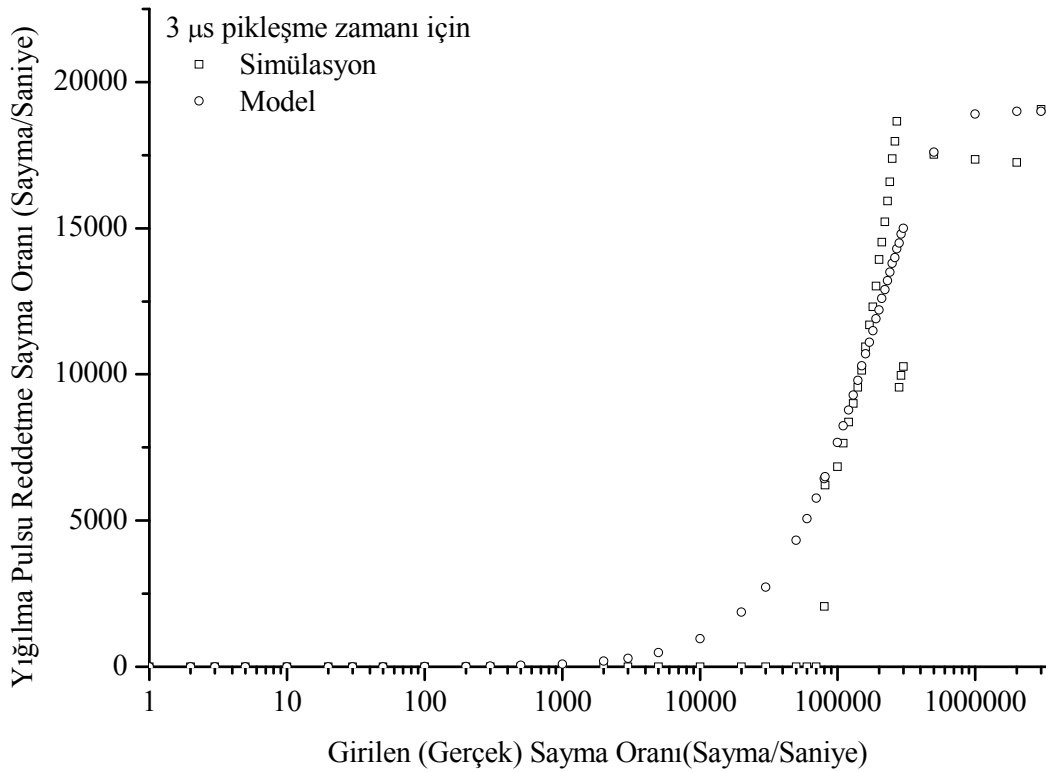


Şekil 44. Yükselticinin pikleşme zamanı ile yığılma piki reddetme (PUR) sayma oranlarının değişimi

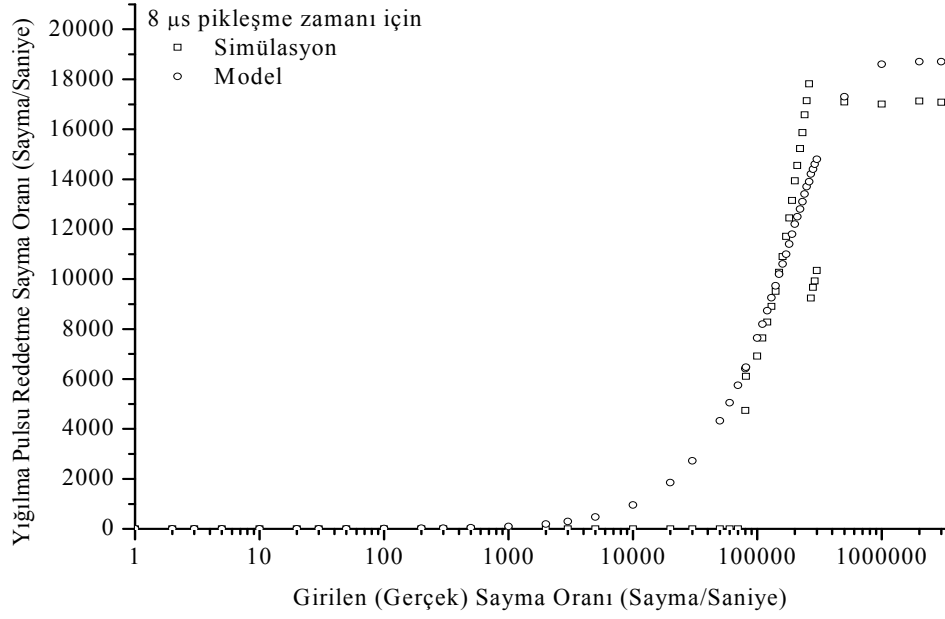
Şekil 44’te yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olarak sistemin yığılma piki reddetme sayma oranı değişimi görülmektedir. Bu grafikten girilen foton sayısının artması yığılma piki reddetme (PUR) sayma oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca girilen üç pikleşme zamanı için de yığılma reddetme (PUR) sayma oranı aynı miktarda artmaktadır. Belirli bir girilen sayma oranında bu yığılma piki reddetme sayma oranı sabitleşmektedir. Bunlara ek olarak belirli bir girme sayma oranında, artmakta olan yığılma piki reddetme

sayma oranı aniden belirli bir yığılma piki reddetme sayma oranına düşmekte ve sonra artan girilen sayma oranı ile birlikte tekrar arttığı görülmektedir.

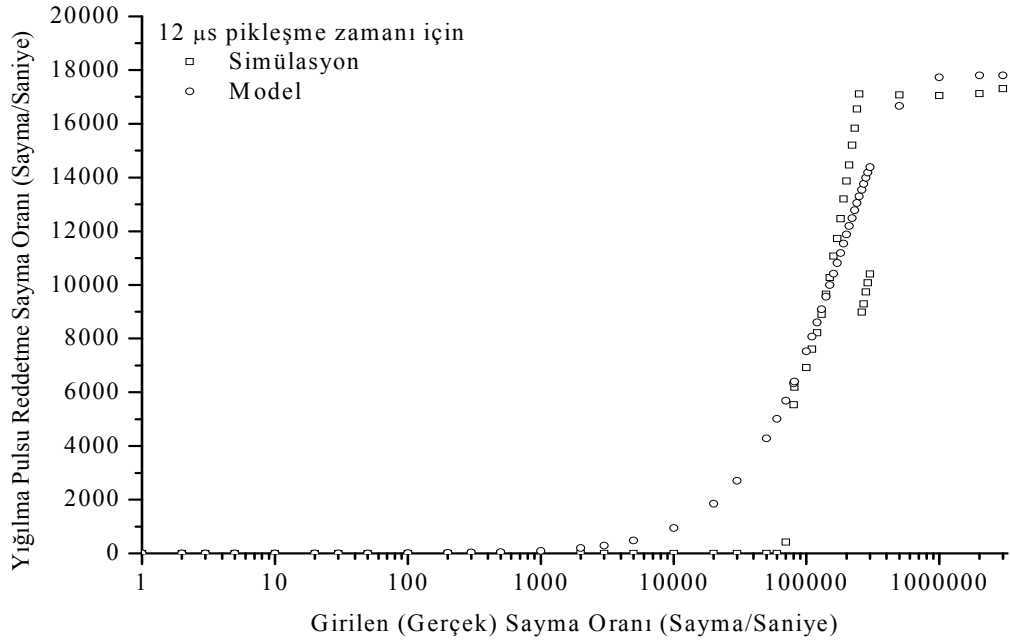
Önerilen model ile yükselticinin en çok kullanılan mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanında girilen sayma oranlarına karşılık gelen yığılma piki reddetme sayma oranları ile simülasyon sonucu belirlenen yığılma piki reddetme sayma oranlarının karşılaştırılması amacıyla aşağıda verilen grafikler sırayla çizildi.



Şekil 45. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan pik reddetme oranlarının karşılaştırılması



Şekil 46. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik reddetme oranlarının karşılaştırılması



Şekil 47. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan yığılma pik reddetme oranlarının karşılaştırılması

Şekil 45–47’den yükselticinin mümkün üç pikleşme zamanı için hem PILEUP programı ile hesaplanan hem de model ile öngörülen yığılma piki reddetme (PUR) sayma oranlarının oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

3.4.3. Minimum Ayırma Zamanının Sayma Oranı Kaybına Etkisi

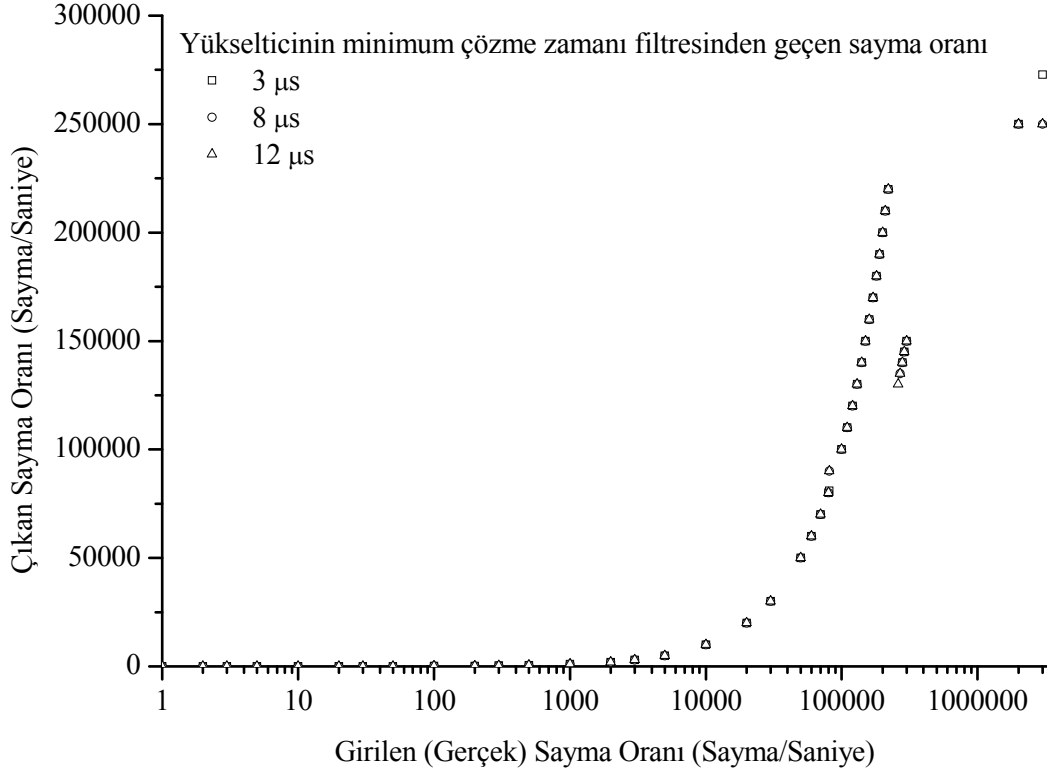
Yükselticinin pikleşme modülünde bulunan ve sıklıkla kullanılan üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanına karşılık gelen yükselticinin minimum ayırma zamanının sayma oranı kaybına etkisi irdelendi. İrdeleme, minimum ayırma zamanı yalnız yükselticinin giriş-çıkışı ile ilişkili olduğundan yükseltici için yerine getirildi. İrdelemenin uygulaması, programın başlangıcında girilen (doğru) sayma oranından program sonunda çıkan sayma oranının belirlenmesi esasına dayanır. Bu kısımdaki çalışma, her bir pikleşme zamanı için girilen sayma oranı saniyede başına 1 sayımdan başlamak üzere 3000000 sayıma kadar olan 49 farklı sayma oranı için yapıldı. Yığılma pulsu ve bu pulsu reddetmenin oluşmaya başladığı kritik sayma oranlarında girilen sayma oranı aralığı sıklaştırıldı. Bu sıklaştırma bu sayma oranlarındaki değişimi daha net görebilme adına yapıldı. Her bir sayım arasındaki zaman filtresi aynı büyüklükte uygulandı. Yani ilk ardışık iki puls arasındaki süre en son ardışık iki puls arasındaki süreye eşittir.

Yükselticinin 3, 8 ve 12 μ s’lik pikleşme zamanlarına bağlı olarak çalıştırılan PILEUP programı sonucu ulaşılan yükselticinin bu minimum ayırma zamanı filtresini geçen sayma oranı sonuçları ve yapılan çalışmalar bölümünün 2.6 kısmında önerilen model ile teorik olarak hesaplanan sayma oranı sonuçları için aşağıda verilen tablo oluşturuldu.

Tablo 8. PILEUP programına ve modele göre hesaplanan minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranları kaybı

| Üretilen Foton Sayısı | 3 μ s | | 8 μ s | | 12 μ s | |
|-----------------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model | Simülasyon | Model |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 7 |
| 10 | 10 | 14 | 10 | 14 | 10 | 14 |
| 20 | 20 | 28 | 20 | 28 | 20 | 27 |
| 30 | 30 | 42 | 30 | 42 | 30 | 41 |
| 50 | 50 | 71 | 50 | 70 | 50 | 69 |
| 100 | 100 | 141 | 100 | 140 | 100 | 137 |
| 200 | 200 | 282 | 200 | 280 | 200 | 275 |
| 300 | 300 | 423 | 300 | 420 | 300 | 412 |
| 500 | 500 | 705 | 500 | 700 | 500 | 687 |
| 1000 | 1000 | 1408 | 1000 | 1398 | 1000 | 1371 |
| 2000 | 2000 | 2808 | 2000 | 2789 | 2000 | 2735 |
| 3000 | 3000 | 4202 | 3000 | 4172 | 3000 | 4091 |
| 5000 | 5000 | 6967 | 5000 | 6918 | 5000 | 6781 |
| 10000 | 10000 | 13755 | 10000 | 13656 | 10000 | 13379 |
| 20000 | 20000 | 26818 | 20000 | 26613 | 20000 | 26041 |
| 30000 | 30000 | 39222 | 30000 | 38908 | 30000 | 38027 |
| 50000 | 50000 | 62187 | 50000 | 61643 | 50000 | 60107 |
| 60000 | 60000 | 72809 | 60000 | 72146 | 60000 | 70269 |
| 70000 | 70000 | 82896 | 70000 | 82112 | 70000 | 79887 |
| 80000 | 80000 | 92475 | 80000 | 91568 | 80000 | 88991 |
| 81000 | 81000 | 93405 | 90000 | 92487 | 90000 | 89874 |
| 100000 | 100000 | 110208 | 100000 | 109055 | 100000 | 105763 |
| 110000 | 110000 | 118411 | 110000 | 117133 | 110000 | 113481 |
| 120000 | 120000 | 126200 | 120000 | 124798 | 120000 | 120787 |
| 130000 | 130000 | 133597 | 130000 | 132071 | 130000 | 127702 |
| 140000 | 140000 | 140621 | 140000 | 138972 | 140000 | 134247 |
| 150000 | 150000 | 147291 | 150000 | 145520 | 150000 | 140441 |
| 160000 | 160000 | 153625 | 160000 | 151733 | 160000 | 146304 |
| 170000 | 170000 | 159640 | 170000 | 157629 | 170000 | 151854 |
| 180000 | 180000 | 165351 | 180000 | 163223 | 180000 | 157106 |
| 190000 | 190000 | 170775 | 190000 | 168530 | 190000 | 162077 |
| 200000 | 200000 | 175926 | 200000 | 173567 | 200000 | 166782 |
| 210000 | 210000 | 180817 | 210000 | 178345 | 210000 | 171236 |
| 220000 | 220000 | 185462 | 220000 | 182880 | 220000 | 175451 |
| 230000 | 230000 | 189873 | 230000 | 187182 | 230000 | 179440 |
| 240000 | 240000 | 194061 | 240000 | 191264 | 240000 | 183216 |
| 250000 | 250000 | 198039 | 250000 | 195138 | 250000 | 186790 |
| 260000 | 260000 | 201816 | 260000 | 198813 | 130000 | 190173 |
| 270000 | 270000 | 205402 | 135000 | 202301 | 135000 | 193374 |
| 280000 | 140000 | 208808 | 140000 | 205610 | 140000 | 196405 |
| 290000 | 145000 | 212043 | 145000 | 208750 | 145000 | 199273 |
| 300000 | 150000 | 215114 | 150000 | 211729 | 150000 | 201988 |
| 500000 | 250000 | 252417 | 250000 | 247659 | 250000 | 234018 |
| 1000000 | 250000 | 271448 | 250000 | 265599 | 250000 | 248978 |
| 2000000 | 250000 | 272991 | 250000 | 266993 | 250000 | 249996 |
| 3000000 | 272728 | 273000 | 250000 | 267000 | 250000 | 250000 |

Tablo 8’de yükselticinin mümkün üç pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanına bağlı olarak PILEUP programı ile belirlenen verilerin davranışını görebilmek için aşağıda verilen grafik çizildi.

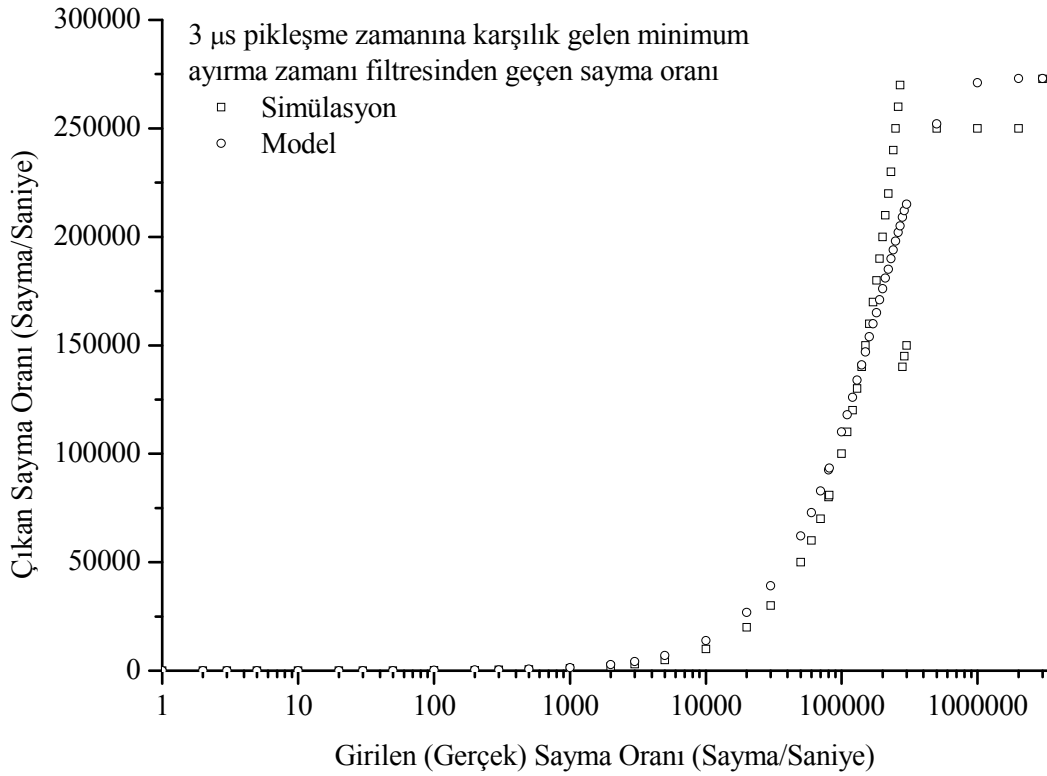


Şekil 48. Yükselticinin pikleşme zamanından kaynaklanan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranları kaybının değişimi

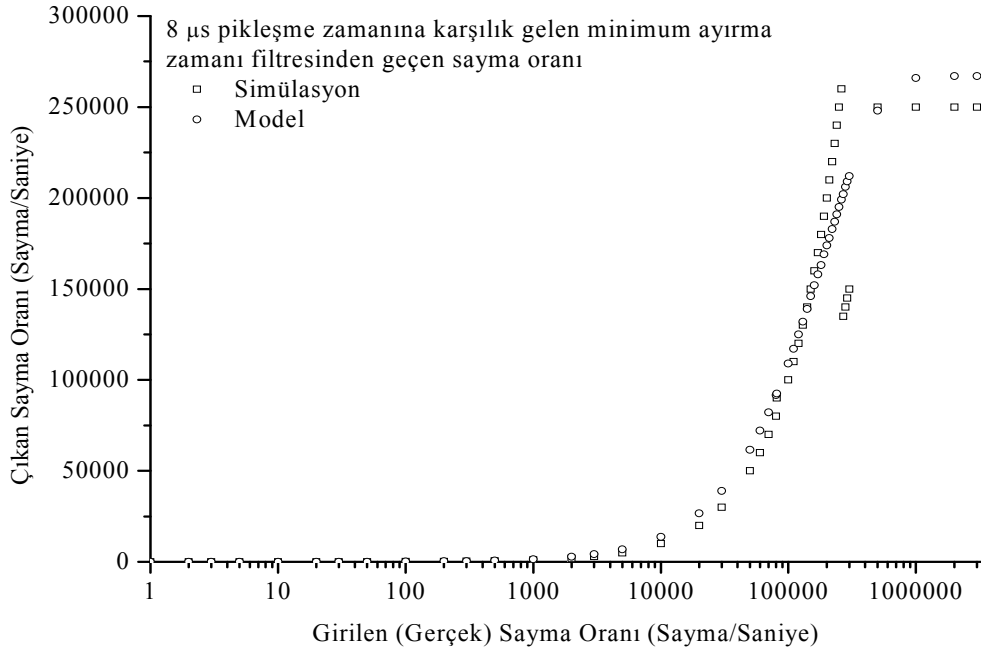
Şekil 48’de yükselticinin pikleşme zamanına bağlı olarak sistemin minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kaybı değişimi görülmektedir. Ayrıca girilen foton sayısının artması ile sayma oranının kayıplarının arttığı da görülmektedir. Bunlara ilaveten, girilen üç pikleşme zamanı için de sayma oranı kaybı hemen hemen aynı oranda artmaktadır. Burada Denklem (50) ile verilen minimum ayırma zamanının pikleşme zamanına bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Belirli bir girilen sayma oranında minimum ayırma zamanı filtresini geçen foton sayısı sabitleşmektedir. Bunlara ek olarak belirli bir girme sayma oranında, artmakta olan filtreyi geçen foton sayısı aniden belirli bir değere düşmekte ve sonra artan girilen sayma oranı ile birlikte tekrar arttığı görülmektedir. Bu ani

düşüşlerin nedeni filtre süresinin (foton üretilme aralığı) sistemin hemen hemen ölü zamanına karşılık gelmesi olarak ifade edilebilir.

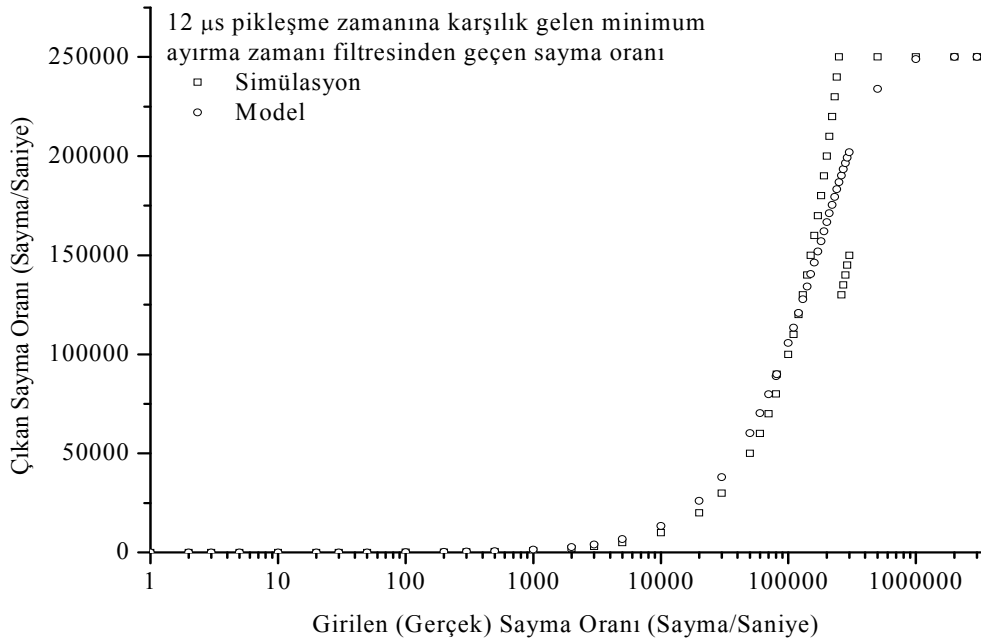
Önerilen model ile yükselticinin en çok kullanılan mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanına karşılık gelen minimum ayırma zamanı geçen fotonların sayma oranı ile simülasyon sonucu belirlenen sayma oranının karşılaştırılması amacıyla aşağıda verilen grafikler sırayla çizildi.



Şekil 49. Yükselticinin 3 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması



Şekil 50. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması



Şekil 51. Yükselticinin 12 μ s'lik pikleşme zamanı için önerilen model ile hesaplanan ve program sonucu oluşan minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıplarının karşılaştırılması

Şekil 49–51’den yükselticinin mümkün üç pikleşme zamanı için hem PILEUP programı ile hesaplanan hem de model ile öngörülen yükselticinin pikleşme zamanından ileri gelen minimum ayırma zamanının neden olduğu sayma oranları kayıplarının iyi bir uyum sağladığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

4.1. Uygun Pikleşme Zamanının Belirlenmesi

Nicel (kantitatif) ve nitel (kalitatif) analizlerde sayma kayıplarını azaltmanın en iyi yolu sistemin ölü zamanını azaltmaktır. (43), (44), (45) ve (50) numaralı denklemler bir arada düşünüldüğünde sistemin ölü zamanı (90) ve (91) numaralı denklemler ile verilebilir. Sistemin ölü zamanı büyük oranda yükselticinin pikleşme zamanı bağlı olduğu için yükselticinin pikleşme zamanı daha küçük değerlere ayarlanmalıdır. Ayrıca, Se ve Zn K_{α} yığılma / K_{α} oranları azalan pikleşme zamanı ile azalmaktadır (Şekil 24).

Bulgular bölümün 3.1. kısmında görüldüğü üzere çalışmanın sonuçları tutarlıdır ve uyumludur. Bu sonuçlar dikkate alındığında bu çalışmada dikkate alınan enerji değerlerinde Ultra-LEGe detektörleri içeren ve Şekil 7 ile verilen sayma sistemlerinde yükselticinin uygun pikleşme zamanı 4 μ s olarak belirlendi.

Tennelec 244 yükseltici için minimum karakteristik ayırma zamanı 3.73 μ s olarak tespit edildi. Buna ek olarak yükseltici ve böylesi sayma sistemleri için kritik pikleşme zamanı 3.84 μ s olarak belirlenirken ve buna karşılık gelen kritik minimum ayırma zamanı 3.66 μ s olarak tespit edildi. Bu nedenle tespit edilen bu değerlere yakın pikleşme zamanında çalışılırsa yükselticinin pikleşme zamanından ileri gelen ölü zamanın etkisi minimuma indirgenir ve böylece sayma kayıpları minimum olur.

Ayrıca Şekil 19'dan görüldüğü üzere minimum ayırma zamanı, belirlenen uygun pikleşme zamanında minimum seviyeye yakındır ve diğer bir pikleşme zamanlarında keskin bir şekilde artmaktadır. Bu durum yükselticinin doğal frekansı ile pikleşme zamanı uyumu ile açıklanabilir. Bu nedenle bu veya benzeri çalışmalarla belirlenen yükselticinin kritik pikleşme zamanları (bu çalışma için 3.84 μ s) üretici firmalar tarafından yükseltici ayarlarına bir seçenek olarak eklenmeli ve spektrometre çalışanları bu pikleşme zamanları ile çalışmalarını benimsemelidirler. Ayrıca kullanıcılar daha güvenilir ölçümler yapabilmek için kullandıkları yükselticinin uygun pikleşme zamanını tanımlamalıdır.

Yığılma piki baskısından kurtulmak için uzun sayma süreleri seçilmelidir. Bu durum Şekil 24'den görülebilmektedir. Ayrıca yine bu şekilden yığılma piki reddetme (PUR)

durumunda yığılma piki / K_a oranının artması şu şekilde açıklanabilir: Yükseltici PUR konumundayken ardışık iki pulstan birincisinin analog dijital çeviricide enerjisi belirlenirken yükselticinin yığılma yoklama devresine gelen ikinci puls her zaman reddedilmektedir. Karakteristik ya da tam enerji pikinin spektrometreye gelme olasılığı daha fazla olduğundan ardışık iki pulstan ikincisinin bu pik olma ihtimali ve dolayısıyla da reddedilme ihtimali daha fazladır. Bu durumda ölçülmüş spektrumda karakteristik ya da tam enerji piki net alanı yığılma piki net alanından daha hızlı azalacaktır. Bu da bu oranın azalmasına neden olacaktır.

4.2. Sistem Ölü Zamanı ve Sayma Kayıpları

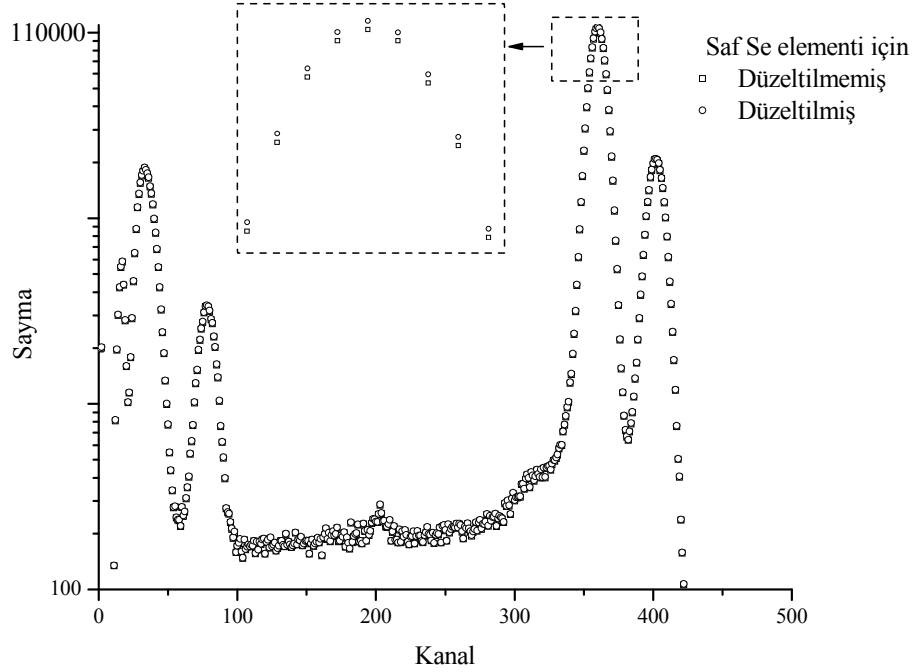
Genie 2000 yazılımı ile elde edilen ve yükselticinin pikleşme zamanına göre belirlenen ölü zamandaki artma, bu çalışmanın yapılan çalışmalar bölümü 2.3 kısmında önerilen analitik düzeltme modeli ile elde edilen ölü zamandan daha keskin bir şekilde artmaktadır. Yani, yükselticinin sıfır pikleşme zamanı için Genie 2000 yazılımındaki ölü zaman neredeyse sıfırdır. Bu durum iki bakış açısından dolayı problemlidir: 1) her bir yükselticinin karakteristik bir ayırma zamanı vardır. Yani, yükselticinin pikleşme zamanı sıfır olsa bile yükseltici gelen pulsları bir birinden ayırmak için bu karakteristik minimum ayırma zamanını kullanacaktır. Sonuç olarak, yığılma pulsları artar. 2) Gelen pulsların ADC tarafından pik enerjisinin belirlenmesi için bir ölü zamana ihtiyaç vardır. Bu yüzden de, sıfır civarında bir ölü zaman elde etmek mümkün değildir.

Genie 2000 yazılımı ile yerine getirilen ölçme ve önerilen analitik modelle yapılan düzeltme Şekil 24'te görülmektedir. Bu düzeltme direkt olarak sayma süresi ile ilişkili olduğundan düşük sayma oranlarında yani ölü zamanın baskın olmadığı sayma oranlarında etkin bir düzeltme sağlar. Ayrıca pik şekli her bir durumda aynıdır. Bu nedenle de hem ölçüm sonucu elde edilen pik hem de düzeltilmiş sayma aynı istatistiğe uyar (Şekil 52'ye bakınız).

Bu analitik düzeltme modelinde, hem uzatılmış (paralyzable) hem de uzatılmamış (non-paralyzable) ölü zamanlar ayrı ayrı belirlenebilir. Fakat Genie 2000 yazılımında yalnızca sistemin toplam ölü zamanı belirlenebilir.

Çalışmada önerilen analitik düzeltme yöntemi ile ilgili bir uygulama Tablo 9'da verilmiştir. Uygulama yükselticinin üç pikleşme zamanına göre saf Se elementinin tesir

kesitlerini hesaplama olarak yerine getirilmiştir. Hesaplanan bu tesir kesitleri teorik değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 52. Saf Se elementinin düzeltilmemiş ve düzeltilmiş spektrumlarının karşılaştırılması

Bu çalışmada önerilen yeni analitik düzeltme yöntemi ile yığılma puls, paralyzable ve non-paralyzable sistem ölü zamanları olarak ifade edilen üç mekanizmanın birleşiminden ileri gelen sayma kayıplarını telafi edilebilir. Sayma sisteminin ölü zamanı analitik bir formül ile belirlenebilir. Bu ölü zaman boyunca oluşan sayma kayıpları Poisson davranışına uyan düzeltilmemiş spektrum göz önünde bulundurularak telafi edilebilir. Bu yeni yöntem sabit düşük sayma oranlarında sayma kaybını yeteri kadar düzeltebilmektedir. Sistemin ölü zamanı ve saf Se elementinin K_{α} ve K_{β} tesir kesitleri yükselticinin mümkün üç pikleşme zamanına göre test edildi. Bu yeni yöntem (analitik yöntem – integral düzeltme yöntemi) hem sayma sisteminin ölü zamanını tahmin etmede hem de saf Se elementinin K_{α} ve K_{β} tesir kesitlerinin hesaplanmasında Scofield'in teorik değerlerine yakın çok daha doğru sonuçlar verdiği belirlendi.

Tablo 9. Bir uygulama: Saf Se elementinin K_{α} ve K_{β} tesir kesitleri

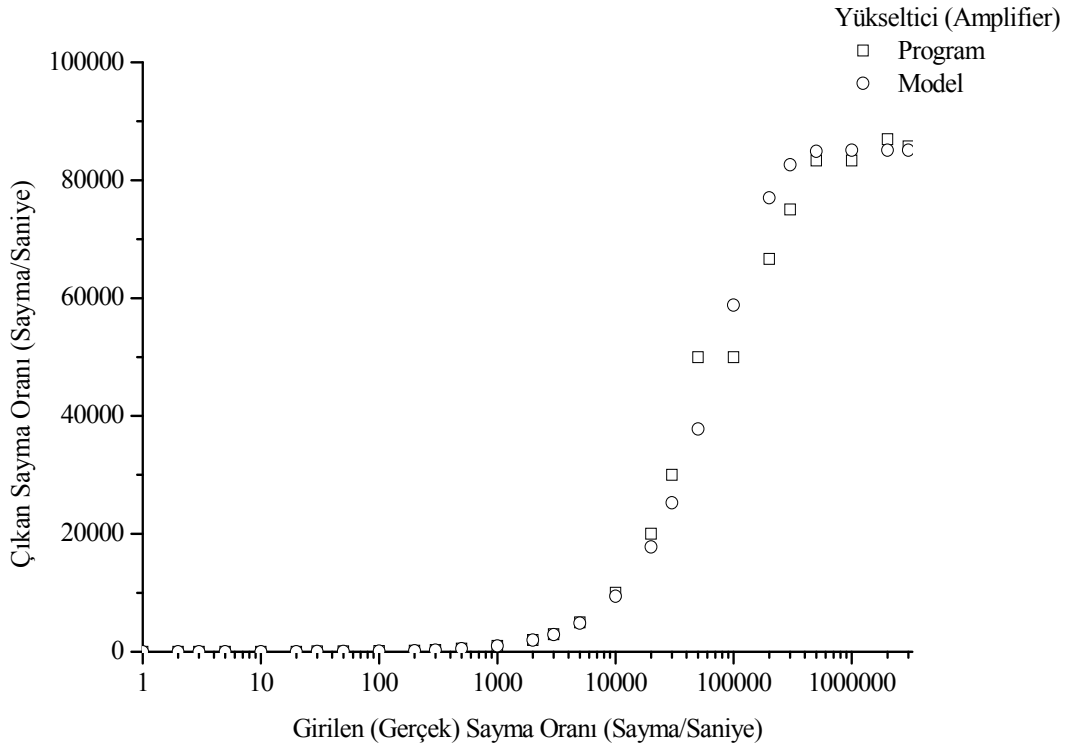
| Tesir Kesiti | Pikleşme Zamanı (μ s) | | | | | | Teorik* |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| | 3 | | 8 | | 12 | | |
| | Düzetilmemiş | Düzeltilmiş | Düzetilmemiş | Düzeltilmiş | Düzetilmemiş | Düzeltilmiş | |
| Se $\sigma_{K\alpha}$ (b/atom) | 124.1 \pm 9.9 | 126.1 \pm 6.3 | 124.0 \pm 9.9 | 127.3 \pm 6.4 | 114.2 \pm 9.1 | 117.7 \pm 5.9 | 129.0 |
| Se $\sigma_{K\beta}$ (b/atom) | 18.1 \pm 1.4 | 18.4 \pm 0.9 | 18.3 \pm 1.5 | 18.8 \pm 1.0 | 16.8 \pm 1.3 | 17.4 \pm 0.9 | 20.9 |

*J.H. Scofield [26]

4.3. Sistemin Ölü Zamanı ve Sayma Oranı Kaybı

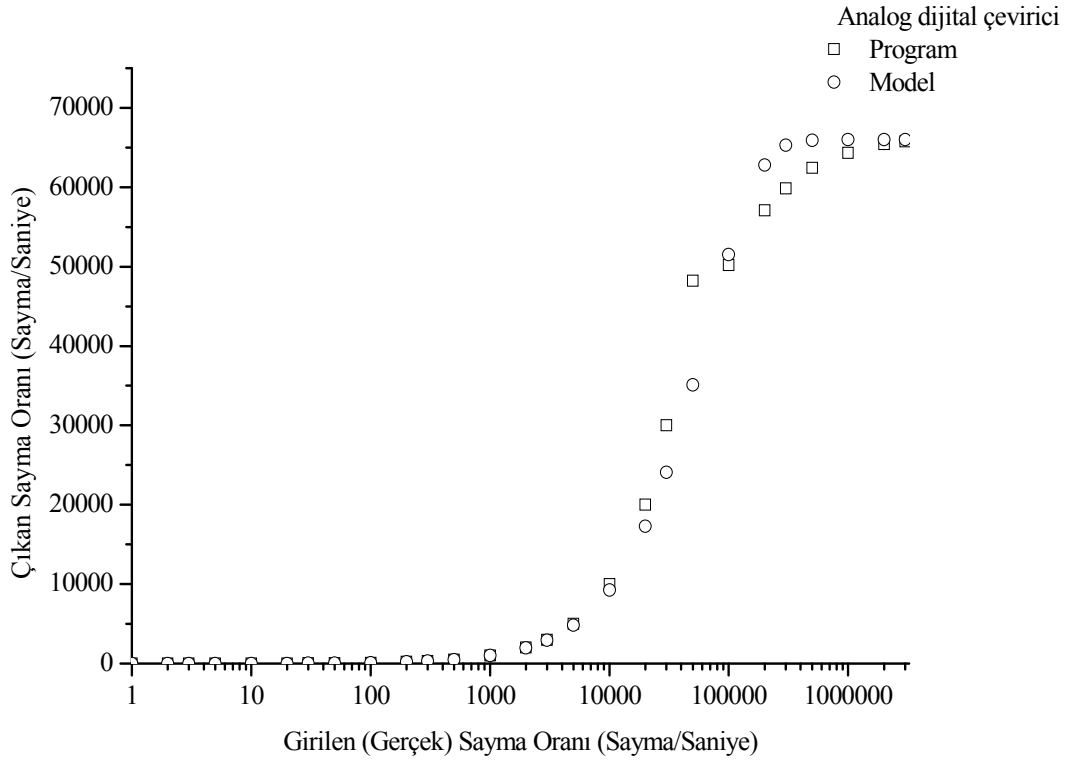
Sayma oranı üzerine pikleşme zamanının önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Bu durum (50), (90) ve (91) numaralı denklemlerin açık bir sonucudur. Yani bu denklemler ölü zaman üzerinde pikleşme zamanının büyük bir öneme sahip olduğunu ifade etmektedirler. Ayrıca artan pikleşme zamanı ölü zamanı artırırken beraberinde sayma kayıplarını da artırmaktadır. Bu durum bu çalışmanın bulgular bölümünün 3.3. kısmında açıkça görülmektedir. (90) nolu denklem direk olarak pikleşme zamanı ile ilişkili olduğu için yalnızca yükselticiden kaynaklanan ölü zamanı ifade ederken (91) denklemi hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden kaynaklanan ölü zamanı ifade etmektedir. Yükselticinin sıklıkla kullanılan ve mümkün üç farklı pikleşme (3, 8 ve 12 μ s) zamanları için yapılan çalışmalarda belirli bir sayma oranına ulaşıldıktan sonra sistem bir doyuma ulaşmaktadır. Bu belirli sayma oranı pikleşme zamanı ve gelen pulsun enerjisi ile doğrudan ilişkilidir. Yani artan pikleşme zamanı ve puls enerjisi ile çıkan sayma oranı azalmaktadır.

Sayma sistemine giren ve çıkan sayma oranları arasındaki ilişki SAYOR simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar kullanılarak tespit edildi. Ayrıca yapılan çalışmalar bölümünün 2.5. kısmında teorik olarak oluşturulan bozunan kaynak yaklaşımı (modeli) ile bu ilişki belirlendi. Bozunan kaynak yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar SAYOR simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmalar, yükselticinin sıklıkla kullanılan ve mümkün her üç pikleşme zamanı için yalnızca yükseltici ve analog dijital çevirici ve hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden oluşan birleşik durumları için yapıldı. Her bir karşılaştırmada sonuçların birbirleriyle çok güzel bir uyum sağladığı görüldü. Aşağıda yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık gelen durum için önerilen model ve SAYOR simülasyon programı sonuçlarının karşılaştırılması, yalnızca yükseltici, yalnızca analog dijital çevirici ve birleşik sistem için sırasıyla grafikler halinde verilmiştir. Benzer sonuçlar yükselticinin diğer iki pikleşme zamanı için de elde edildi fakat fazla yer tutmaması için burada grafiklerine yer verilmedi.



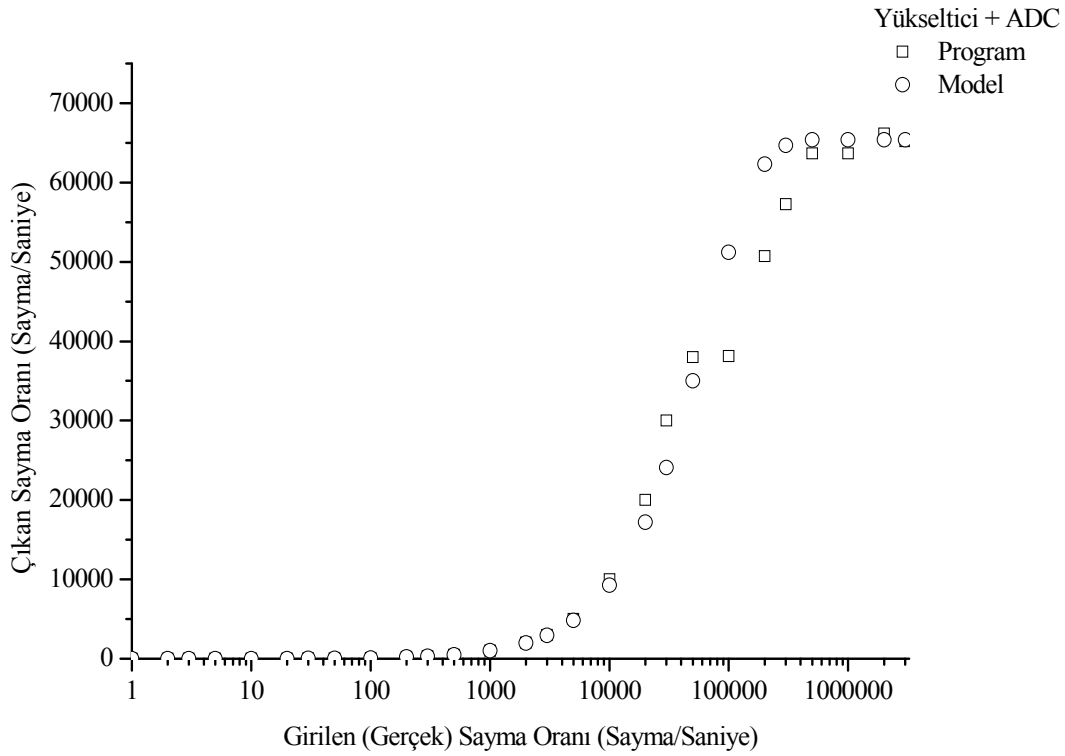
Şekil 53. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık yalnızca yükseltici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması

Şekil 53 yalnızca yükseltici durumunu ifade etmektedir. Buradan görüldüğü üzere simülasyon ve model ile oluşturulan (92) numaralı denklem sonucu arasındaki çok iyi bir uyumun olduğu belirlendi. Benzer uyumlar yükselticinin 3 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanlarında da görülmüştür.



Şekil 54. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık yalnızca analog dijital çevirici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması

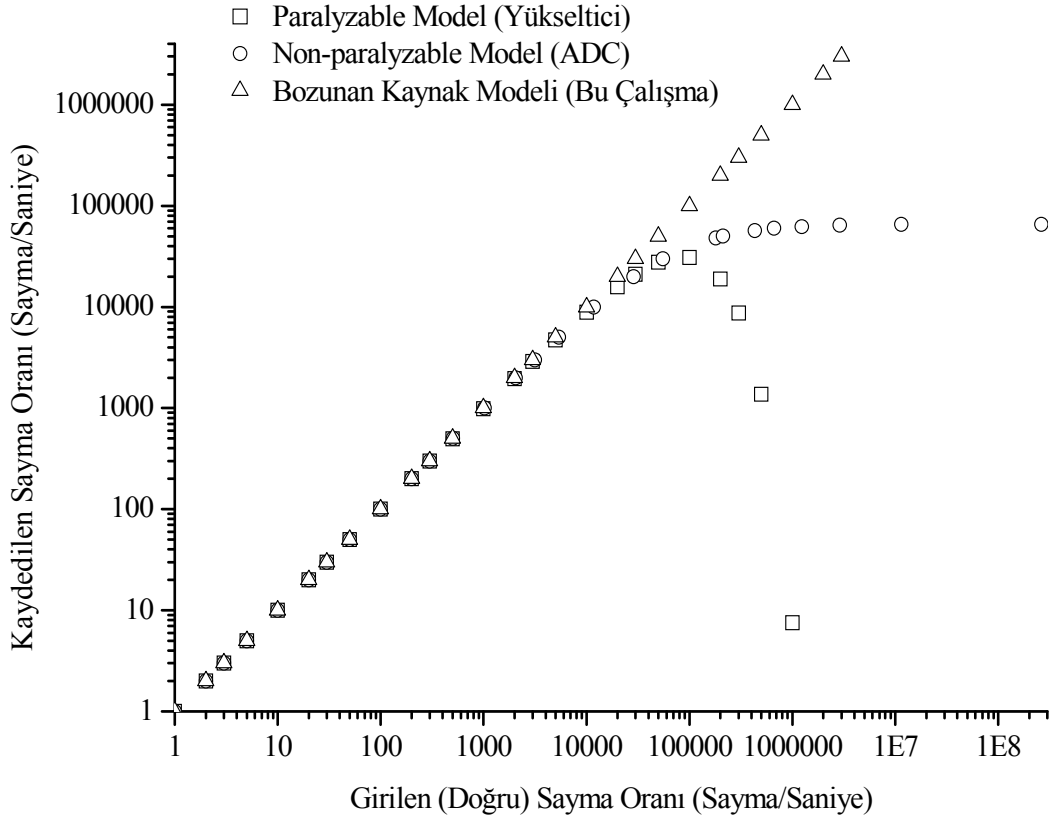
Şekil 54 yalnızca analog dijital çevirici (ADC) durumunu ifade etmektedir. Buradan görüldüğü üzere simülasyon ve model ile oluşturulan (95) numaralı denklemin sonucu arasındaki çok iyi bir uyum vardır. Benzer uyumlar yükselticinin 3 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanlarında da görülmüştür.



Şekil 55. Yükselticinin 8 μ s'lik pikleşme zamanına karşılık hem yükseltici hem de analog dijital çevirici durumunda simülasyon ile modelin karşılaştırılması

Şekil 55 hem yükseltici hem de analog dijital çeviriciden oluşan birleşik durumu ifade etmektedir. Buradan görüldüğü üzere simülasyon ve model ile oluşturulan (95) numaralı denklemde (96) numaralı denklem kullanılarak elde edilen ortalama ölü zamanın kullanılmasıyla ulaşılan sonuç arasında çok iyi bir uyum vardır. Benzer uyumlar yükselticinin 3 ve 12 μ s'lik pikleşme zamanlarında da görülmüştür.

Sayma sisteminin ölü zamanına göre yükseltici, analog dijital çevirici ve ikisi birlikte bir limit değere kadar sayım alabilmektedir. Bu limit değerleri bu tarz elektronik aygıtların doyum noktasını teşkil etmektedir. Yani ölü zamanın büyüklüğü sayma sistemlerinde kullanılan bu aygıtların doyma noktasını belirler. Bu Poisson istatistiğinin de bir sonucudur. Bu durum yapılan çalışmalar bölümünün 2.5.2. kısmındaki (87) ve (88) numaralı denklemlerden açıkça görülmektedir. Ölü zaman, pikleşme zamanı ve puls enerji değerinin bir fonksiyonu olduğundan aygıtların bu doyma noktaları bunlarla doğrudan ilişkilidir. Düşük pikleşme zamanı düşük ölü zamanı, düşük ölü zaman da yüksek doyma noktasını (ya da sayma oranını) belirler.



Şekil 56. Bu çalışmada önerilen bozunan kaynak modelinin paralyzable ve non-paralyzable model sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 56, bu çalışmada önerilen bozunan kaynak modelinin literatürde yer alan ve sıklıkla kullanılan genel iki model ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Genel olarak bu iki model düşük sayma oranlarında doğru sonuçları verirken yüksek sayma oranlarında doğru sonuçlardan sapmaktadır. Önerilen bozunan kaynak modeli hem düşük sayma oranlarında hem de orta ve yüksek sayma oranlarında doğru sonuçları vermektedir. Literatüre bakıldığında giren ve çıkan sayma oranlarının bir biri ile lineer olması gerektiği ifade edilir. Genel olarak kullanılan iki model burada görüldüğü üzere yüksek sayma oranlarında lineerlikten sapmaktadır. Oysa bozunan kaynak modeli bu lineerliği düşük ve yüksek sayma oranlarında sağlamaktadır. Yani güvenilir bir model olarak ifade edilebilir.

Yükseltici (paralyzable-extending) ve analog dijital çevirici (non-paralyzable-non-extending) modellerde giren ve çıkan sayma oranları arasındaki ilişkiler sırasıyla (34) ve (35) denklemleri ile verilir. Fakat genel olarak sayma sistemleri bu iki sistemin

birleşmesinden oluşan yeni bir sistem gibi çalışır. Yani ortak bir ifade olması gerekir. Bu durumla ilgili Gardner ve çalışma arkadaşları [27] tarafından bu iki modelin bir birleşimi olan hibrit model önerdiler. Bu çalışmada önerilen bozunan kaynak modelinde giren ve çıkan sayma oranlarındaki ilişki genel olarak

$$n = \frac{1}{T_D} (1 - e^{-n_0 \bar{T}_D}) \quad (118)$$

denklemleri ile verilir ve bu denklem her üç mümkün durum (yükseltici, analog dijital çevirici ve yükseltici + ADC) için geçerlidir.

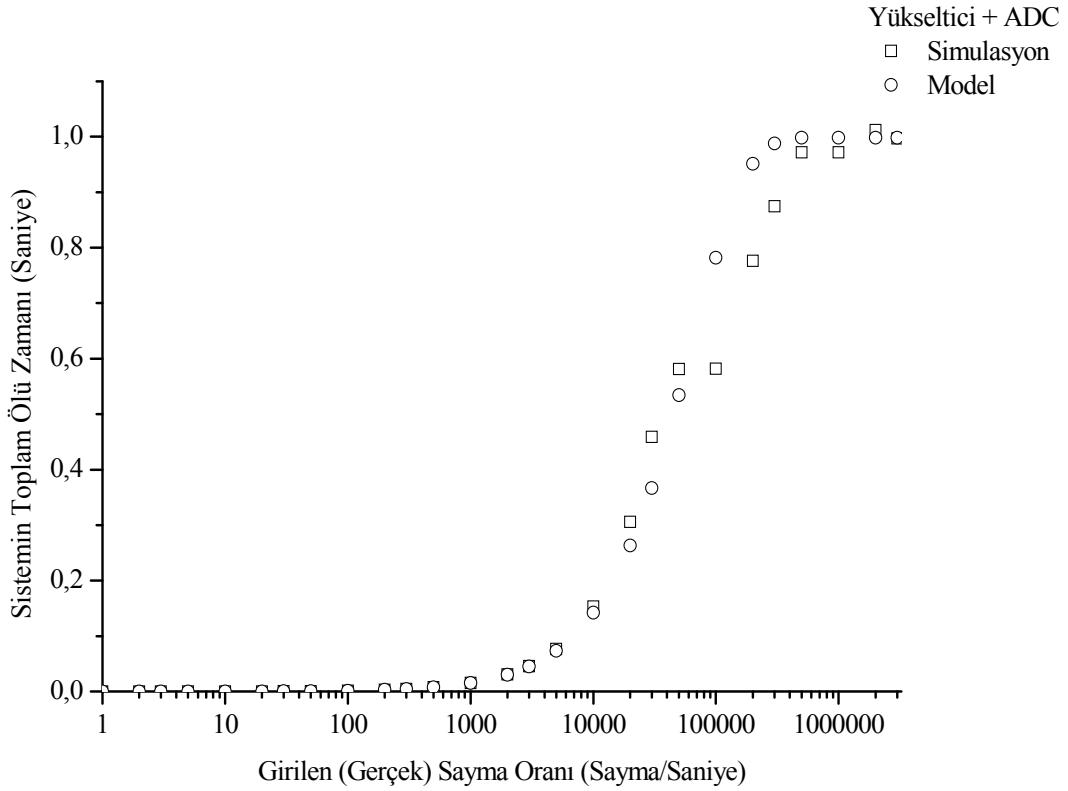
Ayrıca yüksek sayma oranlarına çıkıldıkça ölü zamanın arttığı Şekil 57'den görülmektedir. Ölü zamandaki bu artış belirli bir noktadan sonra 1 saniye civarında sabitleşmektedir. Bu sabitleşme noktası elektronik aygıtların doyum noktası ulaştıkları sayma oranına tekabül etmektedir. Bu oran limit sayma oranı değeri olduğundan ölü zamanda bir limit değere ulaşmakta ve bu değerinde sabitlenmektedir. Bu durumda, bu çalışmadaki enerji aralığına göre, girilen sayma oranı yaklaşık 300000 civarına geldiğinde ölü zaman neredeyse 1 saniye olmaktadır. Yani bu değer ve sonrasındaki sayma oranlarında detektör görevini yapamaz duruma gelmektedir. Girilen ve limit çıkma sayma oranlarına göre sistemin toplam ölü zamanı her bir durum için (97) denklemi ile verilebilir.

Bunlara ek olarak ölü zamandan kaynaklanan sayma oranı kayıpları dikkate alındığında x veya gama ışını spektrometresinde sayma oranları kabaca aşağıda verilen şekilde sınıflandırılabilir:

Düşük sayma oranı < 30000 saniye başına sayma (cps)

$30000 <$ Orta sayma oranı < 100000 saniye başına sayma (cps)

Yüksek sayma oranı > 100000 saniye başına sayma (cps)



Şekil 57. Bu çalışmada önerilen bozulan kaynak modeli ile elde edilen girilen sayma oranlarına karşılık gelen sistemin toplam ölü zamanı

Bu yeni yöntem (bozulan kaynak yaklaşımı-diferansiyel düzeltme yöntemi) bir mermer örneğine uygulandı. Uygulama mermer numunesinin kütle soğurma katsayılarının belirlenmesi şeklinde gerçekleştirildi. Uygulama standart nokta kaynaklar ile yapıldı. Düzeltilmemiş sonuçlar direkt Genie 2000 yazılımından elde edilen spektrumundan alınan veriler ile yapılan hesaplamaları, düzeltilmiş sonuçlar ise Genie 2000 yazılımı ile elde edilen spektruma bu kısımda önerilen düzeltme yöntemi uygulanarak elde edilen hesaplamaları göstermektedir. Ayrıca hesaplamalar XCOM programı ile yapılan teorik hesaplamalar ile karşılaştırıldı. Karşılaştırılmalı sonuçlar Tablo 10 ile verilmiştir. Önerilen düzeltme ile yapılan hesaplamalar teorik hesaplamalara daha yakın olarak gerçekleşmiştir. Bu da bize burada önerilen modelin uygun düzeltmeyi sağladığını göstermektedir.

Tablo 10. Bir uygulama: Mermer numunesinin kütle azaltma katsayıları

| Kaynak | Enerji (keV) | Kütle Azaltma Katsayıları (cm ² /gr) | | |
|-------------------|--------------|---|-------------|---------------------|
| | | Düzeltilmemiş | Düzeltilmiş | Teorik ^a |
| ¹¹⁹ Cd | 88 | 0.181±0.059 | 0.182±0.055 | 0.189 |
| ⁵⁷ Co | 122 | 0.166±0.01 | 0.168±0.01 | 0.155 |
| | 136 | 0.131±0.028 | 0.137±0.026 | 0.147 |
| ¹³³ Ba | 276 | 0.108±0.012 | 0.110±0.012 | 0.110 |
| | 302 | 0.101±0.008 | 0.103±0.008 | 0.106 |
| | 356 | 0.098±0.005 | 0.099±0.005 | 0.100 |
| | 383 | 0.083±0.012 | 0.086±0.012 | 0.096 |
| ¹³⁷ Cs | 661 | 0.088±0.004 | 0.089±0.004 | 0.076 |
| ⁵⁴ Mn | 834 | 0.057±0.01 | 0.059±0.01 | 0.069 |
| ⁶⁰ Co | 1173 | 0.049±0.006 | 0.051±0.006 | 0.058 |
| | 1332 | 0.052±0.006 | 0.053±0.006 | 0.054 |
| ²² Na | 1274 | 0.052±0.005 | 0.054±0.005 | 0.056 |

^aXCOM [95].

4.4. Sistemin Yığılma Pulsu Oranı, Yığılma Pulsu Reddetme Oranı ve Yükselticinin Minimum Ayırma Zamanından Kaynaklanan Sayma Oranı Kaybı

Sistemin yığılma piki sayma oranı ve minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranı kaybı üzerinde pikleşme zamanının etkisinin önemli olduğu görülmüştür. Bu durum yapılan çalışmalar bölümün 2.3.1 kısmında verilen (50) nolu denklemin ve 2.6.1.1. kısmındaki modellemenin açık bir göstergesidir. Fakat yığılma piki reddetme (PUR) devresinin PUR çıkışı sabit olduğundan yığılma piki reddetme sayma oranında yükselticinin pikleşme zamanının her hangi bir etkisi görülmemiştir (yapılan çalışmalar bölümünün 2.6.1.2 kısmına bakınız). Ayrıca artan pikleşme zamanı, yükselticinin minimum ayırma zamanını ve yığılma piki belirleme devresinin hızlı çözümleme zamanını artırdığından yığılma piki sayma oranını ve sayma kayıplarını da artırmaktadır. Bu durum bulgular bölümünün 3.4.1 ve 3.4.3 kısımlarında açıkça görülmektedir. Yükselticinin sıklıkla kullanılan ve mümkün üç pikleşme (3, 8 ve 12 µs) zamanı için yapılan çalışmalarda belirli bir sayma oranına ulaştıktan sonra sistem bir doyuma ulaşmaktadır. Bu

belirli sayma oranı pikleşme zamanı ve gelen pulsun enerjisi ile doğrudan ilişkilidir. Yani artan pikleşme zamanı ve puls enerjisi ile yığılma piki sayma oranı ve sayma oranı kaybı artmaktadır. .

Sayma sistemine giren ve çıkan yığılma piki sayma oranları, yığılma piki reddetme sayma oranları (PUR) ve minimum ayırma zamanından kaynaklanan sayma oranı kayıpları arasındaki ilişki PILEUP simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar kullanılarak elde edildi. Ayrıca yapılan çalışmalar bölümünün 2.6. kısmında oluşturulan teorik model ile bu ilişki belirlendi. Model ile elde edilen sonuçlar PILEUP simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmalar, yükselticinin her üç pikleşme zamanı için yığılma piki sayma oranı, yığılma piki reddetme sayma oranı ve minimum ayırma zamanından ileri gelen sayma oranı kayıpları için ayrı ayrı yerine getirildi. Her bir karşılaştırmada sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görüldü.

Bunlara ek olarak deneysel saf (% 99,9 saflıkta) demir, çinko ve selenyum elementleri için yığılma pik durumlarının spektrumları elde edildi. Bu spektrumdan elde edilen yığılma pikleri saymaları (2000 s sayma süresi için) aşağıdaki tabloda verilmiştir. Yani çok düşük oranda da olsa bu saf elementlerde yığılma piklerine rastlanmıştır. Bu durum ile ilgili örnek bir spektrum yapılan çalışmalar bölümünün 2.2.7 kısmında saf Se elementi için verilmiştir (Şekil 11'e bakınız). Bu spektrum oluşumunda sistemin sayma oranı yaklaşık 2000 sayma/saniyedir. Bu çalışmada önerilen model ve yığılma piki simülasyonunda pikleşme zamanının artmasıyla yığılma piki sayma oranının artacağı bulgular bölümünün 3.4.1 kısmındaki Tablo 6'dan görülmektedir. Ayrıca artan enerji ile yığılma piki sayma oranı artacaktır. Aşağıda verilen Tablo 10'nun sonuçlarıyla yığılma modeli ve simülasyonu sonuçları iyi bir uyum içindedir.

Ulaşılan diğer önemli bir husus yığılma simülasyonu (modelde hemen hemen tüm sayma oranlarında karşılaşılabılırken) pikleşme zamanına bağlı olmak koşuluyla yüksek sayma oranlarında karşılaşıldığıdır. Yani 3 μ s'lik pikleşme zamanı için yaklaşık 80000 sayma/saniye durumunda yığılma piki başlamaktadır. Bu noktadan itibaren hem model hem de simülasyon hemen hemen aynı yığılma piki sayma oranını vermektedir. Bu noktadan bakıldığında düşük sayma oranlarında gözlenen (deneysel olarak) yığılma piki sayma oranları yükselticiden önceki elektronik aygıtlardan (ön yükseltici, FET vb.) ve detektörden kaynaklanabilir. Yani detektördeki kusurlar yük tuzaklanmalarına neden olabilir. Bu tuzaklanmalardan kurtulan yükler yığılma piki olarak yükselticiye ulaşabilir

veya detektör uçları arasında yük toplama süreci yığılma pulslarına neden olabilir. Ya da ön yükselticide, akım pulsları voltaj pulsuna çevrilirken yığılma pulslarına neden olabilir.

Tablo 11. Deneysel olarak elde edilen pile up piki sayma oranları (2000 s sayma süresi için)

| Element | Yığılma Piki Enerjisi ($2K\alpha$) | Pikleşme Zamani (μs) | | |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------|------|------|
| | | 3 | 8 | 12 |
| Demir (Fe) | 12.80 keV | 1110 | 1200 | 1310 |
| Çinko (Zn) | 17.25 keV | 1250 | 1721 | 3113 |
| Selenyum (Se) | 22.40 keV | 2112 | 5037 | 6425 |

5. ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma bir x veya gama ışını radyasyonunun belirlenmesinde kullanılan sayma sisteminin yalnızca yükseltici ve analog dijital çevirici kısmını içermektedir. Bu nedenle böylesi bir sistemin tam bir modellemesini yapmak için kaynak, kaynak-detektör geometrisi, detektör ve ön yükseltici kısımlarının da içermelidir. Bu amaç doğrultusunda sayma sisteminin bu bileşenleri ile ilgili modellerde oluşturulmalıdır. Bunlar, bu çalışmada oluşturulan modellerle birleştirilerek sayma sisteminin tam bir modellemesi oluşturulmuş olur.

Bu çalışmada ²⁴¹Am kaynağı dikkate alınarak modeller oluşturuldu. Bu nedenle diğer kaynak durumları ve yüksek enerjili gama ışınları için bu modeller test edilmelidir. Böylece mümkün karşılaşılabilecek hemen hemen tüm enerji değerleri için istenilen düzeltmeler çok sağlıklı bir biçimde yerine getirilebilir. Ayrıca çalışma sürecinde Şekil 7 ile verilen sayma sistemi için uygun pikleşme zamanı 3.84 µs olarak belirlendi. Belirlenen bu uygun pikleşme zamanı dikkate alınarak yükselticinin tüm mümkün pikleşme zamanları kullanılarak çalışmanın en uygun çalışma ayarları belirlenebilir.

Bu çalışmada yalnızca yükseltici ve analog dijital çevirici durumları için yığılma pulslarından kaynaklanan kayıpları belirlemek için bir model oluşturuldu. Bu modelde yığılma düzeltmeleri, detektör kristalindeki yük toplanma süreçleri ve yüklerin kristal kusurlarından dolayı tuzaklanma ve tuzaklanmalardan kurtulma durumları dikkate alınmadı. Bu nedenle yığılma düzeltmeleri, detektör kristali ve hemen sonrasındaki elektronik aygıtlar ile ilgili bu çalışmalar yapılarak önerilen modeller daha da geliştirilebilir.

Bunlara ek olarak diğer detektör ve bileşenleri ile ilgili benzeri çalışmalar yapılarak değişik sayma sistemlerinin performansları irdelenebilir.

Son olarak gelişen teknoloji ile birlikte sayma sistemi bileşenleri de değişmektedir. Belirli zaman aralıklarında değişen bu sayma sistemleri üzerinde bu çalışmanın benzerleri tekrarlanabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Debertin, K. ve Helmer, R.G., Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, Elsevier, Amsterdam, 1988.
2. Gilmore, G. ve Hemingway, J. D., Practical Gamma-Ray Spectrometry, John Wiley and Sons Inc., Chichester, 2003.
3. Knoll, G. F., Radiation Detection and Measurement, Third Edition, Jhon Wiley and Sons Inc., New York, 2000.
4. Davisson, C.M., Interaction of γ -Radiation with Matter, in: Beta- and Gamma Ray Spectroscopy, Interscience, New York, 1955.
5. Caferov, T., Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1998.
6. Rutherford, E. and Geiger, H., An Electrical Method of Counting the Number of α -Particles from Radio-Active Substances, Proc. R. Soc. Lond., A 81 (1908) 141-161.
7. Pell, E.M., Effect of Li-B Ion Pairing on Li^+ Ion Drift in Si, J. Appl. Phys., 31, (1960)1675-1680.
8. Mayer, J.W., Semiconductor Detectors for Nuclear Spectrometry II, Nucl. Instr. Meth., 43 (1966) 55-64.
9. Sakai, E., Present Status of Room Temperature Semiconductor Detectors, Nucl. Instr. Meth., 196 (1982) 121-130.
10. Tomakin M., Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ İnce Filmlerinin Bazı Yapısal, Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2003.
11. Gunnink, R., Meyer, R.A., Niday, J.B. and Anderson, R.P., Precise determinations of high-energy gamma rays and errors in the pair-peak method, Nucl. Inst. Meth., 65 (1968) 26-30.
12. Heath, R.L., Gamma-Ray Spectrometry and Automated Data Systems for Activation Analysis, in: Proc. Int. conf. on Modern Trends in Activation Analysis, 1968, Gaithersburg, NBS Special Publication 312, II, 959-965.
13. Sakai, E., Charge Collection in Coaxial Ge(Li) Detectors, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-15 (1968) 310-320.

14. Wilkinson, D.H., A Stable Ninety-Nine Channel Pulse Amplitude Analyser for Slow Counting, Proc. Cambridge Philos. Soc., 46 (1950) 508-518.
15. Robinson, L.B., Gin, F. and Goulding F.S., A High-Speed 4096-Channel Analogue-Digital Converter for Pulse Height Analysis, Nucl. Instr. Meth., 62 (1968) 237-246.
16. Gobbur, S.G., Landis, D.A. and Goulding, F.S., Fast Successive Approximation Analog-to-Digital Converter, Nucl. Instr. Meth., 140 (1977) 405-406.
17. Goulding, F.S., Landis, D.A. and Madden, N.W., Design Philosophy for High-Resolution Rate and Throughput Spectroscopy Systems, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (1983) 301-310.
18. Heat, R.L., Gamma-Ray Spectrum Catalogue, 3rd Edition, Report ANCR-1000-2, 1974.
19. Adams, F. and Dams, R., Applied Gamma-Ray Spectrometry, 2nd Ed. Int. Ser. of Monographs in Analytical Chemistry, Pergamon Press-Oxford, Vol.41, 1970.
20. Gardner, R.P., Yacout, A.M., Zhang, J. and Verghese K., An Investigation of The Possible Interaction Mechanisms for Si(Li) and Ge Detector Response Functions by Monte Carlo Simulation, Nucl. Instr. Meth., A 242 (1986) 399-405.
21. Jin, Y., Gardner, R.P. and Verghese, K., A Semi-Empirical Model for The Gamma-Ray Response Function of Germanium Detectors Based on Fundamental Interaction Mechanisms, Nucl. Instr. Meth., A 242 (1986) 416-426.
22. Kokta, L., Determination of Peak Area, Nucl. Instr. Meth., 112 (1973) 245-251.
23. Hertogen, J., De Donder, J. and Gijbels, R., Experimental Data on Photopeak Integration Methods in Activation Analysis, Nucl. Instr. Meth., 115 (1974) 197-212.
24. Quittner, P., Peak Area Determination for Ge(Li) Detector Data, Nucl. Instr. Meth., 76 (1969) 115-124.
25. Laitano, R.E., Orsitto, F. and Rotondi E., Uncertainties in Peak Area Determination of A ^{152}Eu Gamma Source, Nucl. Instr. Meth., 165 (1979) 577-582.
26. Prussin, S.G., Prospects for Near State-of-the Art Analysis of Complex Semiconductor Spectra in The Small Laboratory, Nucl. Instr. Meth., 193 (1982) 121-128.
27. Gardner, R.P. and Liu, L., On Extending The Accurate and Useful Counting Rate Range of GM Counter Detector Systems, Appl. Radiat. Isot., 48 (1997) 1605-1615.

28. Koskelo, M.J., A Solution to The Pulse Pileup and Peak Shape Distortion Problem, J. Radioanal. Nucl. Chem., 70 (1982) 473-481.
29. Blaauw, M., Fleming R.F. and Keyser R., Digital Signal Processing and Zero Dead Time Counting, J. Radioanal. Nucl. Chem., 248, 2 (2001) 309-313.
30. Blaauw, M. and Fleming R.F., Statistical Properties of Gamma-Ray Spectra Obtained with Loss-Free or Zero-Dead-Time Counting, and ORTEC'S "Variance Spectrum", Nucl. Instr. Meth., A 505 (2003) 306-310.
31. Jenkins, R., Gould, R.W. and Gedcke, D., Quantitative X-Ray Spectrometry, Marcel Dekker, New York, 1981.
32. Tennelec Instruction Manual TC 244 Amplifier, 1986.
33. Gerardi, G., Abbene, L., Manna, A.L., Fauci, F. ve Raso, G., Digital Filtering and Analysis for A Semiconductor X-Ray Detector Data Acquisition, Nucl. Instr. Meth., A 571 (2006) 378-380.
34. Statham, P.J., Pile-up Rejection: Limitations and Corrections for Residual Errors in Energy-Dispersive Spectrometers, X-Ray Spectrometry, 6 (1977) 94-103.
35. Statham, P.J., Pile-Up Correction for Improved Accuracy and Speed of X-Ray Analysis, Microchimica Acta, 155 (2006) 289-294.
36. Maxwell, J.A. ve Campbell, J.L., A New Approach to Pile-Up Modelling in PIXE, X-Ray Spectrometry, 34 (2005) 320-322.
37. Spieler, H., Introduction to Radiation Detectors and Electronics. http://www-physics.lbl.gov/~spieler/physics_198_notes_1999/index.html 9 Şubat 2009.
38. Canberra Germanium Detectors, User's Manual, 1998.
39. Pommé, S., Experimental Test of The "Zero Dead Time" Count-Loss Correction Method on A Digital Gamma-Ray Spectrometer, Nucl. Instr. Meth., A 474 (2001) 245-252.
40. Deighton, M. O., Statistical Errors Arising from Use of A Gated Pulse Train for Total Live Time Measurement During Pulse Amplitude Analysis, Nucl. Instr. Meth., 14 (1961) 48-52.
41. Szentmiklosi, L., Belgya, T., Molnar, G. L. and Revay Zs., Time Resolved Gamma-Ray Spectrometry, J. Radioanal. Nucl. Chem., 271 (2007) 439-445.
42. Pommé, S., Time Distortion of a Poisson Process and Its Effect on Experimental Uncertainty, Appl. Radiat. Isot., 49 (1998) 1213-1218.
43. A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, NCRP Report No. 58, 1985.

44. Kawada, Y., A New Method of Measuring Resolving Times of Counting System and Its Application, In Proc. of the 13th Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, Tokyo, 1976.
45. Kawada, Y., Kobayashi, S., Watanabe, K., Kawamura, T. and Hino, Y., Automatic Compensation of Dead Time Effects, Appl. Radiat. Isot., 49 (1998) 1123-1126.
46. Schönfeld, F., Alpha—A Computer Program for The Determination of Radioisotopes by Least-Squares Resolution of The Gamma-Ray Spectra, Nucl. Instr. Meth., 42 (1966) 213-218.
47. Görner, W. and Höhnel, G., An Automatic Life Time Correction in Multichannel Counting of Short-Lived Nuclides, Nucl. Instr. Meth., 88 (1970) 193-195.
48. Wiernik M., Comparison of Several Methods Proposed for Correction of Dead-Time Losses in The Gamma-Ray Spectrometry of Very Short-Lived Nuclides, Nucl. Instr. Meth., 95 (1971) 13-18.
49. Galushka, A.N., The Method of Poisson's Fluxes of Accidental Events Registration, Communication through J. W. Müller, 1993.
50. Harms, J., Automatic Dead-Time Correction for Multichannel Pulse-Height Analyzers at Variable Counting Rates, Nucl. Instr. Meth., 53 (1967) 192-196.
51. Westphal, G. P., On the Performance of Loss-Free Counting — A Method for Real-Time Compensation of Dead-Time and Pile-Up Losses in Nuclear Pulse Spectroscopy, Nucl. Instr. Meth., 163 (1979) 189-196.
52. Müller, J. W., Some Remarks on the Galushka Method, Rapport BIPM 93/2, 1993.
53. Genie 2000 customize manual.
54. Scofield, J. H., Theoretical Photoionization Cross Sections from 1 to 1500 keV, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Report UCRL-51326, 1973.
55. Evans, R. D., The Atomic Nucleus, McGraw-Hill, Bombay, 1955.
56. King, S. H. and Lim, C. B., Pulse Pile-up, Dead Time, Derandomization, and Count Rate Capability in Scintillation Gamma Cameras, IEEE Trans. Nucl. Sci., 32 (1985) 807-810.
57. Choi, H. D., Counting Statistics Distorted by Two Dead Times in Series Which End with an Extended Type Dead Time, Nucl. Instr. Meth., A 599 (2009) 251-259.

58. Hashimoto, K. and Yamada S., Counting Losses Due to Saturation Effects of Scintillation Counters at High Count Rates, Nucl. Instr. Meth., A 438 (1999) 502-510.
59. Rutherford, E., Geiger, H. and Bateman, H., The Probability Variations in The Distribution of α Particle, Phil. Mag., 20 (1910) 698-707
60. Ruark, A. E. and Devol, L., Theory of Radioactive Fluctuations, Phys. Rev., 48 (1935) 772-772.
61. Ruark, A. E. and Devol, L., The General Theory of Fluctuations in Radioactive Disintegration, Phys. Rev., 49 (1935) 355-367.
62. Kurbatov, J. D. and Mann H. B., Correction of G-M Counter Data, Phys. Rev., 68 (1945) 40-43.
63. Schiff, L. I., Statistical Analysis of Counter Data, Phys. Rev., 50 (1935) 88-96.
64. Mukoyama, T., Dead Time Effect in Multi-Channel Pulse Height Analyzer, Bull. Inst. Chem. Res., 62 (1984) 287-297.
65. Redaka, V., 1961. The Determination of Random Event – Rate Based on Counter Live Time Measurement, Proceeding Conference Series, Belgrad, Nuclear Electronics, II, 361-367.
66. Skinner, S. M., The Efficiency of The Tube Counter, Phys. Rev., 48 (1935) 438-447.
67. Gavron, A., Automation of the Analysis of Gamma Ray Spectra of Radionuclide Mixtures, with Special Reference to Computer Spectrum Shifting and Dead Time Correction, Nucl. Instr. Meth., 67 (1969) 245-250.
68. Yuming, D., Guoming, F., Feng, H. and Xianming, Y., Analysis of Pulse Performance Based on Cd(Zn)Te Detector Spectrometry, The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI, 2007.
69. Lindstrom, R. M. and Fleming, R. F., Dead Time, Pileup, and Accurate Gamma-Ray Spectrometry, Radioact. and Radiochem., 6 (1995) 20-27.
70. Gui-Nian, D. and Turner K. E., A Method of Correction Dead Time and Pulse Pile-up Errors in Energy-Dispersive X-Ray Analysis, X-Ray Spectrom., 18 (1989) 57-62.
71. Statham P. J., Limitations to Accuracy in Extracting Characteristic Line Intensities from X-Ray Spectra, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 107 (2002) 531-546.

72. Barradas, N.P. and Reis, M. A., Accurate Calculation of Pileup Effects in PIXE Spectra from First Principles, X-Ray Spectrom., 35 (2006) 232-237.
73. Danon, Y., Sones, B. and Block R., Dead Time and Pileup in Pulsed Parametric X-ray Spectroscopy, Nucl. Instr. Meth., A 524 (2004) 278-294.
74. Pommé, S., Cascades of Pile-up and Dead Time, Appl. Radiat. and Isotop., 66 (2008) 941-947.
75. Lilley, J. R., A Method for Analytically Removing Pulse Pile-up Effects, IEEE Trans. Nucl. Scien., 13 (1966) 281-286.
76. Strauss, M.G., Sifter, L. L., Lenkszus, F. R. and Bremer, R., Ultra Stable Reference Pulser for High Resolution Spectrometers, IEEE Trans. Nucl. Sci., 15 (1968) 518-530.
77. Anders, O. U., Experiences with the Ge(Li) Detector for High-Resolution Gamma Ray Spectrometry and a Practical Approach to the Pulse Pileup Problem, Nucl. Instr. Meth., 68 (1969) 205-208.
78. Bolotin, H. H., Strauss, M. G. and MacClure, D. A., Simple Technique for Precise Determinations of Counting Losses in Nuclear Pulse Processing Systems, Nucl. Instr. Meth., 83 (1970) 1-12.
79. Wiernik, M., Comparison of Several Methods Proposed for Correction of Dead-Time Losses in The Gamma-Ray Spectrometry of Very Short-Lived Nuclides, Nucl. Instr. Meth., 95 (1971) 13-18.
80. Wiernik, M., Normal and Random Pulse Generators for the Correction of Dead-Time Losses in Nuclear Spectrometry, Nucl. Instr. Meth., 96 (1971) 325-329.
81. Azuelos, J. E., Crawford, J. E. and Kitching, J. E., Precision Half-Life Measurements Using Ge(Li) Detectors, Nucl. Instr. Meth., 117 (1974) 233-238.
82. Debertain, K. and Schötzing, U., Limitations of the Pulser Method for Pile-up Corrections in Ge(Li)-Spectrometry, Nucl. Instr. Meth., 140 (1977) 337-340.
83. Fedotov, S. N. and Volkov N. G., Analysis of the Puls-height Spectra Distortion Caused by the Pile-up Effect, Nucl. Instr. Meth., 122 (1974) 463-465.
84. Blatt, S.L., Characteristics of Random-sum Peaks in Nuclear Radiation Spectra, Nucl. Instr. Meth., 128 (1975) 277-281.
85. Bradley, A. R. and Furr, A. K., Time Dependent Dead Time and Pile-up Corrections for Gamma Ray Spectroscopy, Nucl. Instr. Meth., 140 (1977) 401-404.

86. Mowlavi, A. A. and Koochi-Fayegh, R., Tally Modifying of MCNP and Post Processing of the Pile-up Simulation with Time Convolution Method in PGNA, Nucl. Instr. Meth., A 552 (2005) 559-565.
87. Wielopolski, L. and Gardner, R. P., Prediction of the Pulse-height Spectral Distortion Caused by the Peak Pile-up Effect, Nucl. Instr. Meth., 133 (1976) 303-309.
88. Gardner, R. P. and Wielopolski, A., Generalized Method for Correction Puls-height Spectra for the Peak Pile-up Effect Due to Double Sum Pulses, Nucl. Instr. Meth., 140 (1977) 289-296.
89. Wielopolski, A. and Gardner, R. P., Generalized Method for Correction Puls-height Spectra for the Peak Pile-up Effect Due to Double Sum Pulses, Nucl. Instr. Meth., 140 (1977) 297-303.
90. Wyttenbach, A., Coincidence Losses in Activation Analysis, J. Radioanal. Chem., 8 (1971) 335-343.
91. Lindstrom, R. M. and Fleming, R. F., Accuracy in Activation Analysis: Count Rate Effects, Proc. 4th Int. Conf. Nucl. Methods in Envir. and Energy Res., U. S. Department of Energy, (1980) 25-35.
92. Greenberg, R. R., Fleming, R. F. and Zeisler, R., High Sensitivity Neutron Activation Analysis of Environmental and Biological Standard Reference Materials, Environ. Internat., 10 (1984) 129-136.
93. King, S. E. and Lim, C. B., Pulse Pile-up, Dead Time, Derandomization, and Count Rate Capability in Scintillation Gamma Cameras, IEEE Trans. Nucl. Sci., 32 (1985) 807-810.
94. Wicks, R. and Blau, M., The Effect of Window Fraction on Dead Time of Anger Cameras, J. Nucl. Med., 18 (1977) 732-735.
95. M.J. Berger, J.H. Hubbell, 1987 XCOM: Photon cross-sections on a personnel computer (version 1.2), NBSIR85-3597, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, USA, for version 3.1, 1999.

7. EKLER

Ek 1. Doktora Tez Çalışmasından Yayınlanan SCI İndeksli Makale



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research Ajournal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

A new method to compensate for counting losses due to system dead time

S.M. Karabıdak^{a,*}, U. evik^{a,b}, S. Kaya^a^a Karadeniz Technical University, Department of Physics, 61080 Trabzon, Turkey^b University of Antwerp, Department of Chemistry, B-2610 Antwerpen, Belgium

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 October 2008

Received in revised form

9 January 2009

Accepted 6 February 2009

Available online 13 February 2009

Keywords:

Real time

ADC conversion time

Minimum resolving time

Dead time losses

ABSTRACT

Determination of count losses and pile-up pulse effects in quantitative and qualitative analysis became a vital step in various analyses. Therefore, compensating for counting losses is of importance. These counting losses are due to the pulse pile-up, *paralyzable* and *non-paralyzable* system dead time or a combination of these mechanisms. In this work, a new method is suggested for the correction of dead time losses resulting from the above mechanisms. For this purpose, a source code was developed. It was found that the peaking time was an important parameter over system dead time. The method suggested seems to be more effective even at high count rate.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The major constraint on the throughput of modern gamma-ray spectrometers is the time required to collect the charge produced by ionizing radiation in the active detector volume and subsequently the pulse processing by the electronics [1]. In all detector systems, there will be a minimum amount of time called dead time of the counting system, which must separate two events in order that they are recorded as two separate pulses. During this dead time, the system cannot respond to other incoming photons and these events cannot be counted and thus can be lost. One of the major problems confronting the user of multichannel pulse analyzers is to correct the results for counts lost due to the analyzer dead time. This problem can be solved automatically by carrying out all counting runs for a known or measured total instrument *live time* rather than for *real time* [2].

Two models of the dead time behavior of counting systems have come into common usage: *paralyzable* and *non-paralyzable* response. These two models predict the same first-order losses and differ only when true event rates are high [3]. In high count rate events, both of the two modes are not applicable. The correction for the dead time losses becomes an important task of the data evaluation [4].

In nuclear spectrometry measurements, the pulse loss is traditionally related to the *non-paralyzable* dead time per incoming pulse caused by an ADC during pulse processing. *Non-paralyzable* means that the dead time period is not prolonged by

a new pulse arriving during that time. For the so-called *paralyzable* systems, the dead time is extended by starting from the last arrival time. Pulse pile-up can also be interpreted as a kind of pulse loss of the *paralyzable* type [5]. Consecutive pulses falling within a time interval peaking time, T_p , are treated as pile-up and excluded from the spectrum, as a pile-up rejector (PUR).

When count rate is kept nearly constant, counting losses due to dead time can be corrected by a simple formulae for both types of non-extendable and extendable dead times [6]. However, when the count rate changes or fluctuates significantly, the correction based upon mathematical means becomes difficult and complex. In order to overcome this problem, a method was demonstrated by Kawada [7], which allows compensating the dead time effects automatically at every moment during the counting experiment. In this method, pulses whose number is equivalent to the dead time losses were generated as random coincidence pulses using a gating technique in a first-order approximation and added to the output pulse train after delay [8].

The problem of varying dead time is a well-known source of error in nuclear spectrometry measurement. In this case, dead time corrections can only be accurate if the varying dead time is dominantly caused by a radiation source. Solutions have been offered in several forms: dead time stabilization [9–11] solves the problem at the cost of a fixed, perhaps unnecessary, dead time and resulting loss of counting efficiency [12]. But results have not been forthcoming for counting losses due to system dead time.

Galushka [13] suggested a correction technique for dead time effects by inserting additional pulses into the actual series of registered events, and Müller [13] analyzed the validity of this method. Loss-free counting was introduced before the advent of digital spectrometer by Westphal [14], improving on Harms'

* Corresponding author. Tel.: +90 462 3773819; fax: +90 462 3253195.
E-mail address: salihm@ktu.edu.tr (S.M. Karabıdak).

differential dead time correction method [15]. The count losses arise from the dead time due to the pile-up rejector and ADC conversion time. A few methods are suggested to compensate for the count losses. One of these methods is *zero dead time* using a DSPEC^{PLUS}™ digital spectrometer. The method was tested by Pommé [1].

One question is, how is it possible to compensate for counting losses occurring only during the dead time. Our aim is not to reconstruct the original process; all we need is a reliable estimation of the original count rate or of the number of original events for the interval of time considered. To do this, we need either an accurate value for the average loss per dead time period or a method that allows us to arrive at individual corrections.

In this study, an analytic correction method was developed instead of using a pulser or a radioactive source. For this correction, a program was coded, which was taking account of all of the mentioned pulse loss mechanisms.

2. Experimental arrangement

The *K* X-ray intensities were measured for the pure Se and Zn elements by using 59.54 keV photons emitted by a 50 mCi ²⁴¹Am annular radioactive source. A Canberra Ultra Low Energy Ge detector (GUL 0035 model) with a resolution of 150 eV at 5.9 keV, Genie 2000 spectroscopy software, preamplifier (Model 2008) of Canberra instruments, Tennelec TC 244 spectroscopy amplifier and multiport II ADC and MCA of Canberra instruments were used to count *K_α* photons emitted from samples.

3. Background

In Galushka's study [13], a method is described for restoring dead time losses in real time so that at the output of a counter, constructed according to this new scheme, one obtains directly the number of events expected in the absence of dead time. This is accomplished by inserting additional pulses into the actual series of registered events. In such a situation, let the observed sequences of events (see Fig. 1) be characterized by the arrival times T_0, T_1, T_2, \dots [16]. Consecutive arrivals are separated at least by the peaking time, T_p , applied. If we put $T_0 = 0$, then pulse number, k , occurs at the instant:

$$T_k = T_1 + T_2 + \dots + T_k$$

$$= (\tau + \delta_1) + (\tau + \delta_2) + \dots + (\tau + \delta_k)$$

$$= k\tau + \sum_{j=1}^k \delta_j \quad \text{for } k \geq 1 \quad (1)$$

where δ_j is the width of each pulse, which is separated from each other by steady dead time arising from peaking time of the amplifier. But peaking time is important for calculations of counting losses due to the dead time of the system. Therefore,

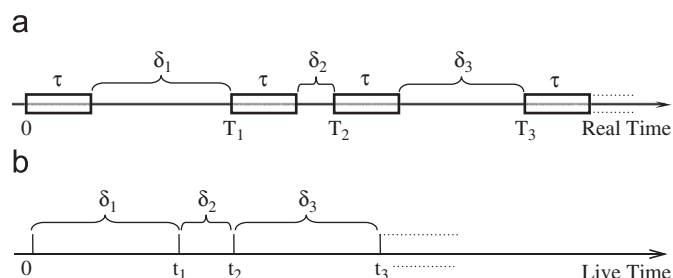


Fig. 1. Schematic representation of the relation between (a) the observed arrival T_j and (b) the corresponding Poisson process t_j [15].

the dead time of the system is determined by adding the peaking time to the ADC converting time. To determine the dead time of the system, minimum resolving time should firstly be ascertained.

The relationship among minimum resolving time, peaking time and overall pulse width is given in the following equation [17]:

$$T_R \geq \frac{T_W}{T_P} - 1 \quad (2)$$

Such a study relevant to the determination of minimum resolving time was carried out by Karabidak et al. [18]. In this study, minimum resolving times in response to 0.5, 0.75, 2, 3, 8 and 12 μ s peaking times of the amplifier were calculated from Eq. (2). Then, a graph for minimum resolving time versus peaking time was drawn and fit equation given in relation to minimum resolving time and peaking time was determined from this graphic as follows:

$$T_R = B_2 T_P^2 + B_1 T_P + A \quad (3)$$

where A, B_1 and B_2 are 3.73746, -0.03894 and 0.00507 , respectively. The effective system dead time, T_D , will fall into one of the following categories [17]:

$$T_R > 1.5 \mu\text{s} + T_C \quad (4)$$

or

$$T_R < 1.5 \mu\text{s} + T_C \quad (5)$$

where T_C is the conversion time of the ADC and T_R is the minimum resolving time of the amplifier, respectively. If the minimum resolving time of the pile-up rejector is greater than $1.5 \mu\text{s} + T_C$, then the dead time of the system simply becomes [17]

$$T_D = T_p + T_R \quad (6)$$

where T_p is the peaking time of the amplifier. Otherwise, the dead time of the system is [17]

$$T_D = T_p + 1.5 \mu\text{s} + T_C \quad (7)$$

where $1.5 \mu\text{s}$ is an additional time added to the amplifier by the amplifier's manufacturer to clearly resolve two consecutive pulses at pile-up rejection position. Therefore, this additional time may be taken into consideration as a time to pass from ADC to MCA and as recording time (about $0.5\text{--}2 \mu\text{s}$) [19]. This additional time, thus, can be used in almost all counting systems. T_C can be defined as in the following [20]:

$$T_C = \frac{E}{\Delta E} T_{\text{Clock}} \quad (8)$$

where E is the energy value of a channel and ΔE is energy value per channel and T_{Clock} is the frequency of a Wilkinson-type ADC.

For counting losses due to systems dead time, both approaches are possible. Traditional correction formulae were used for the first method: they are based on the observed count rate and are applied at the end of a measurement period. On the contrary, methods of a second type work in a different way by instantly correcting or compensating for losses, apparently without requiring knowledge of the measurement or calculate count rate. In the second method, it is possible to estimate the probability of losing a specific number k of counts in a dead time of length T_D . Since we deal with a Poisson process, this probability is given by [8,16]

$$P_k = \frac{(nT_D)^k}{k!} e^{-nT_D} \quad (9)$$

where n is the count rate in each channel. The expected counting losses, L , due to each dead time are given as follows:

$$L = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k = e^{-nT_D} \sum_k \frac{(nT_D)^k}{(k-1)!} = nT_D \quad (10)$$

4. Method

Fig. 2 was used to determine dead time of the counting system. There is a minimum resolving time, which is the response to the peaking time of systems. The minimum resolving time, T_R , with respect to the peaking time of system is a discriminating time between two pulses. This minimum resolving time was given in Eqs. (4) and (6). It is important to determine whether the minimum resolving time is more than the conversion time of ADC. Therefore, the minimum resolving time is calculated by Eq. (10). Later, the minimum resolving time is compared to Eqs. (2) and (3) and the dead time is calculated by Eq. (6) or (7). Thus the dead time in response to each count in each channel is easily determined. Then the total dead time (TDT) in each channel is given by

$$TDT = \text{Count } T_D \quad (11)$$

Therefore total dead time of counting system (STDT) overall channel is calculated by

$$STDT = \sum_{i=\text{channel number}} (TDT)_i \quad (12)$$

Count rate in each channel is given by

$$n = \frac{\text{Count}}{T_L} \quad (13)$$

and where T_L is live time of the system. When we take into account Eq. (9), total counting losses (L) due to the dead time of system is obtained by

$$L = nSTDT \quad (14)$$

Thus correction counting (CC) is given by

$$CC = \text{Count} + L \quad (15)$$

5. Results and discussions

Corrected count rate graphic obtained from dead time correction in the counting system with a new method suggested in this study is shown in Fig. 3. A new model (analytic model) suggested in this study is effective both for low count rates and for high count rates.

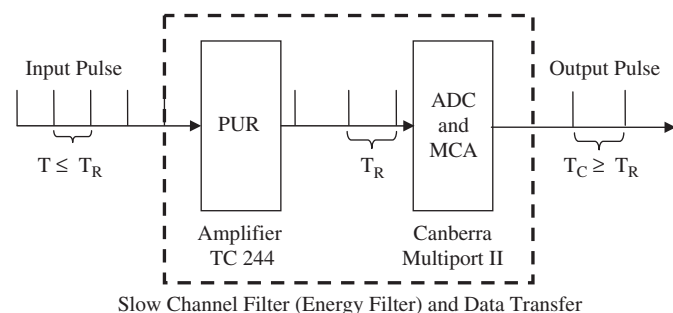


Fig. 2. Stages of the signal processing that have been taken into account in the dead time correction method.

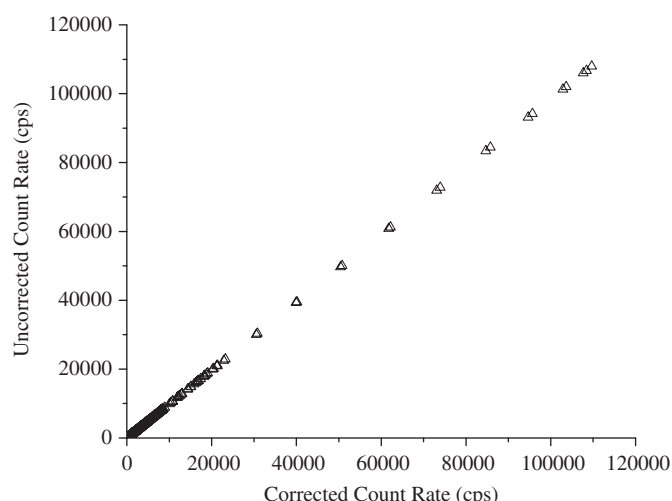


Fig. 3. Variation of the observed rate m as a function of the true rate n for three models of dead time losses.

Table 1

Total dead time obtained using the analytic method and Genie 2000 software.

| Peaking time (μs) | Counting time (s) | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | $t = 2000$ | | $t = 5000$ | | | |
| | Model | Genie 2000 | Model | Genie 2000 | Model | Genie 2000 |
| | TDT ^a | TADCT ^b | TDT ^a | TADCT ^b | TDT ^a | TADCT ^b |
| 3 | 31.21 | 15.05 | 20.51 | 77.95 | 37.59 | 51.22 |
| 8 | 49.10 | 15.49 | 56.84 | 122.52 | 38.62 | 141.88 |
| 12 | 59.01 | 14.58 | 79.96 | 147.26 | 36.41 | 199.61 |

^a TDT: total dead time.

^b TADCT: total analog-digital conversion time.

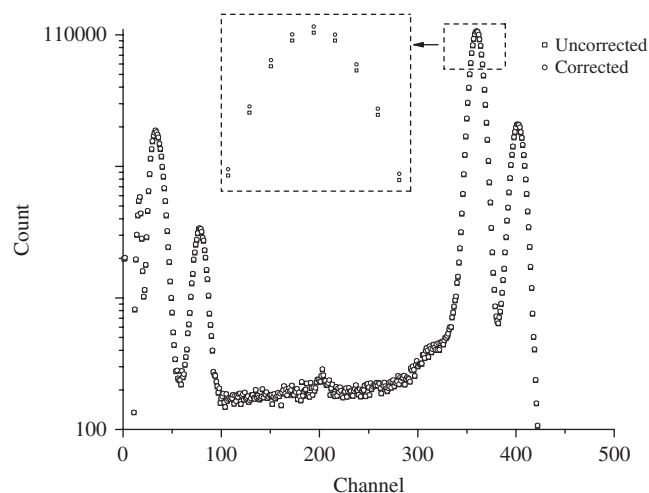


Fig. 4. Comparing uncorrected and corrected spectrum for pure Se element.

In Table 1, system dead times obtained using Genie 2000 software for the radiation measurements and a new method proposed in this study were given. The systems dead time were tested according to three possible peaking times of the amplifier. As seen in Table 1, Genie 2000 software only gives total dead time of the system. It is possible to observe the dead time contributions due to ADC conversion time and peaking time at a new model. Thus, counting losses correction arising from system dead time

Table 2
An application example: K_{α} and K_{β} cross-sections of pure Se element.

| Cross-section | Peaking time (μs) | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| | 3 | | 8 | | 12 | | Theoretical ^a |
| | Uncorrected | Corrected | Uncorrected | Corrected | Uncorrected | Corrected | |
| Se $\sigma_{K_{\alpha}}$ (b/atom) | 124.1 \pm 9.9 | 126.1 \pm 6.3 | 124.0 \pm 9.9 | 127.3 \pm 6.4 | 114.2 \pm 9.1 | 117.7 \pm 5.9 | |
| Se $\sigma_{K_{\beta}}$ (b/atom) | 18.1 \pm 1.4 | 18.4 \pm 0.9 | 18.3 \pm 1.5 | 18.8 \pm 1.0 | 16.8 \pm 1.3 | 17.4 \pm 0.9 | 20.9 |

^a Scofield [21].

can be made for demanded situation (*non-paralyzable* or *paralyzable* or both). Dead time increases by increasing the peaking time at both Genie 2000 software and this new model. This is an expected result (see Eqs. (3) and (6)). Total dead time due to ADC conversion is almost the same for three peaking times of amplifier at the model. Also, increasing in dead time according to peaking time of the amplifier is sharper in Genie 2000 software than in the analytic model. That is, dead time in Genie 2000 software for zero peaking time is almost zero. With respect to two points, this is problematic: (1) there is a characteristic minimum resolving time of each amplifier [18]. That is, even if peaking time of the amplifier is zero, the amplifier will use to this characteristic minimum resolving time for incoming pulse. Consequently, pile-up pulses increase. (2) Digitalized by ADC of incoming pulses need a dead time. Therefore, obtaining to about zero dead time is not possible.

Fulfilled measurement by Genie 2000 software and performed correction by the proposed analytic model is shown in Fig. 4. While this correction is not effective at low counts, it is effective at high counts. Also, the peak shape is same at each state. Hence both measurement count and correction count obey the same statistic.

In this model, both the extending dead time and the non-extending dead time can separately be determined. But the total system dead time can be only designated in Genie 2000 software. The dead times obtained with Genie 2000 software and proposed analytic method in this work are shown in Table 1.

An application of the proposed analytic method in this work is given in Table 2. Application was performed to calculate the cross-sections of pure Se element according to three peaking times of the amplifier. These cross-sections were also compared to the theoretical ones.

6. Conclusions

A new method was suggested to compensate for counting losses due to a combination of these mechanisms that were the pulse pile-up, paralyzable and non-paralyzable system dead time.

The dead time of the counting system was determined with an analytic formula. Counting losses occurring during this dead time were compensated for by considering uncorrected spectra obeying the Poisson behavior. This new method adequately corrects counting loss at steady counting rate. The system dead time and K_{α} and K_{β} cross-sections of pure Se element were tested according to three possible peaking times of the amplifier. The new method gave more correct results both in estimating the dead time of the counting system and in calculating K_{α} and K_{β} cross-sections of pure Se element.

References

- [1] S. Pommé, Nucl. Instr. and Meth. A 474 (2001) 245.
- [2] M.O. Deighton, Nucl. Instr. and Meth. 14 (1961) 48.
- [3] G.F. Knoll, third ed., Radiation Detection and Measurement, Wiley, New York, 2000.
- [4] L. Szentmiklosi, T. Belgya, G.L. Molnar, Z.S. Revay, J. Radioanal. Nucl. Chem. 271 (2007) 439.
- [5] S. Pommé, Appl. Radiat. Isot. 49 (1998) 1213.
- [6] NCRP, A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, NCRP Report No. 58, 1985.
- [7] Y. Kawada, in: Proceedings of the 13th Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, Tokyo, 1976.
- [8] Y. Kawada, S. Kobayashi, K. Watanabe, T. Kawamura, Y. Hino, Appl. Radiat. Isot. 49 (1998) 1123.
- [9] F. Schönfeld, Nucl. Instr. and Meth. 42 (1966) 213.
- [10] W. Görner, G. Höhnel, Nucl. Instr. and Meth. 88 (1970) 193.
- [11] M. Wiernik, Nucl. Instr. and Meth. 95 (1971) 13.
- [12] M. Blaauw, R.F. Fleming, R. Keyser, J. Radioanal. Nucl. Chem. 248 (2001) 309.
- [13] A.N. Galushka, The method of Poisson's fluxes of accidental events registration. Communication through J.W. Müller, 1993.
- [14] G.P. Westphal, Nucl. Instr. and Meth. 163 (1979) 189.
- [15] J. Harms, Nucl. Instr. and Meth. 53 (1967) 192.
- [16] J.W. Müller, Some Remarks on the Galushka Method, Rapport BIPM 93/2, 1993.
- [17] Tennelec Instruction Manual TC 244 Amplifier, 1986.
- [18] S.M. Karabıdık, U. Çevik, S. Kaya, in: Turkish Physical Society 25th International Physical Congress, Bodrum, 2008
- [19] G. Gilmore, J.D. Hemingway, Practical Gamma-Ray Spectrometry, Wiley, New York, 2003.
- [20] H. Spieler, Introduction to Radiation Detectors and Electronics, 1999.
- [21] J.H. Scofield, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Report UCRL-51326, 1973.

ÖZGEÇMİŞ

03.10.1975 tarihinde Çorum ili İskilip ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Çorum ili Oğuzlar ilçesinde ve orta öğrenimini Kastamonu'da tamamladı. 1995 yılında Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne yerleşti. Şubat-2000'de aynı bölümden mezun oldu. Eylül-2000'de Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Temmuz-2004'te yüksek lisans eğitimini tamamlayıp Eylül-2004'te doktora eğitimine başladı. 17.11.2005 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Evli ve bir çocuk sahibi olan Salih Mustafa KARABIDAK iyi derecede İngilizce bilmektedir.