

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI ÇEKİRDEKLERDE FOTONÜKLEER REAKSİYON TESİR  
KESİTLERİNİN TEORİK İNCELENMESİ**

**Nurdan KARPUZ**

**Danışman  
Prof. Dr. İskender AKKURT**

**II. Danışman  
Doç. Dr. Betül MAVİ**

**DOKTORA TEZİ  
NÜKLEER FİZİK ANABİLİM DALI  
ISPARTA – 2014**

© 2014 [Nurdan KARPUZ]



## TEZ ONAYI

Nurđan KARPUZ tarafından hazırlanan "**Bazı ekirdeklerde Fotonükleer Reaksiyon Tesir Kesitlerinin Teorik İncelenmesi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri yeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nükleer Fizik Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

|                     |                                                                    |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Danışman</b>     | <b>Prof. Dr. İşkender AKKURT</b><br>Süleyman Demirel niversitesi  |
| <b>II. Danışman</b> | <b>Doç. Dr. Betül MAVİ</b><br>Amasya niversitesi                  |
| <b>Jüri yesi</b>   | <b>Prof. Dr. Fatih UCUN</b><br>Süleyman Demirel niversitesi       |
| <b>Jüri yesi</b>   | <b>Prof. Dr. Mustafa YILDIZ</b><br>Süleyman Demirel niversitesi   |
| <b>Jüri yesi</b>   | <b>Doç. Dr. Gültekin YEGİN</b><br>Celal Bayar niversitesi         |
| <b>Jüri yesi</b>   | <b>Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN</b><br>Afyon Kocatepe niversitesi |
| <b>Jüri yesi</b>   | <b>Yrd. Doç. Dr. Nilgün DEMİR</b><br>Uludağ Üniversitesi           |



**Enstitü Müdürü**      **Prof. Dr. Ahmet řAHİNER**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Nurdan KARPUZ**

## İÇİNDEKİLER

|                                                               | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------|-------|
| İÇİNDEKİLER .....                                             | i     |
| ÖZET.....                                                     | iii   |
| ABSTRACT.....                                                 | iv    |
| TEŞEKKÜR.....                                                 | v     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                          | vi    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                        | viii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                           | ix    |
| 1. GİRİŞ.....                                                 | 1     |
| 1.1 Gama Işınları ve Özellikleri.....                         | 4     |
| 1.2 Gama Işınlının Elde Edilme Yöntemleri .....               | 6     |
| 1.2.1 Bremsstrahlung (frenleme) yöntemi .....                 | 6     |
| 1.3 Gama Işınlının Madde İle Etkileşimi .....                 | 8     |
| 1.3.1 Fotoelektrik olay .....                                 | 9     |
| 1.3.2 Compton saçılması .....                                 | 11    |
| 1.3.3 Çift oluşumu.....                                       | 14    |
| 1.3.4 Thomson ve Rayleigh saçılması .....                     | 16    |
| 1.3.5 Fotoçözülme (Fotodisintegrasyon) olayı .....            | 17    |
| 1.4 Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitleri.....                    | 19    |
| 1.4.1 Tesir kesiti .....                                      | 20    |
| 1.4.2 Saçılma .....                                           | 21    |
| 1.4.3 Diferansiyel tesir kesiti .....                         | 23    |
| 1.4.4 Çift diferansiyel tesir kesiti .....                    | 26    |
| 1.5 Fotonükleer Fizik .....                                   | 26    |
| 1.6 Hızlandırıcı Teknolojisi .....                            | 27    |
| 1.7 Türk Hızlandırıcı Merkezi ve Bremsstrahlung Merkezi ..... | 30    |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....                                      | 33    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                    | 48    |
| 3.1 TALYS 1.2 Nükleer Reaksiyon Kod Programı .....            | 48    |
| 3.2 Optik Model.....                                          | 49    |
| 3.3 Bileşik Reaksiyonlar .....                                | 49    |
| 3.4 Denge öncesi Süreç (Pre-equilibrium).....                 | 49    |
| 3.5 Fotoabsorbsiyon Modeli .....                              | 49    |
| 3.6 Gama Işını Kuvvet Fonksiyonları.....                      | 51    |
| 3.7 Kalbach Sistematiği ve DDX Hesaplaması .....              | 52    |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....                                                               | 54  |
| 4.1 Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları.....                          | 54  |
| 4.1.1 $^{12}\text{C}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları.....        | 54  |
| 4.1.2 $^{16}\text{O}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları .....       | 58  |
| 4.1.3 $^{90}\text{Zr}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları .....      | 61  |
| 4.2 Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti<br>Hesaplamaları .....           | 64  |
| 4.2.1 $^{12}\text{C}$ Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti Hesapları .... | 64  |
| 4.2.2 $^{16}\text{O}$ Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti Hesapları.     | 105 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....                                                              | 118 |
| KAYNAKLAR.....                                                                            | 122 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                             | 131 |

## ÖZET

Doktora Tezi

### BAZI ÇEKİRDEKLERDE FOTONÜKLEER REAKSİYON TESİR KESİTLERİNİN TEORİK İNCELENMESİ

Nurdan KARPUZ

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Nükleer Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İskender AKKURT

II. Danışman: Doç. Dr. Betül MAVİ

Fotonükleer reaksiyon verileri, temel araştırmalar için olduğu kadar uygulamalı araştırmalar için de önemlidir. Hızlandırıcı teknolojileri günümüzde en önemli teknolojilerin başında sayılabilir. Bu anlamda Türkiye’de ilk defa kurulması planlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi projesiyle hayata geçirilecek olan ilk tesis TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara) Türkiye’nin ilk radyasyon ışınım kaynağı olması bakımından önemlidir. Bu tesiste çeşitli nükleer fizik araştırmaları için bremsstrahlung fotonlarının üretildiği ve fotonükleer reaksiyonlarının gerçekleşeceği bremsstrahlung deney istasyonu kurulacaktır.

Bu çalışma, bremsstrahlung deney istasyonunda gerçekleştirilebilecek olan fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinin teorik hesaplamalarını içermektedir. Hesaplamalarda TALYS 1.2 nükleer kod programı kullanılmıştır. Gelen foton enerjisine bağlı olarak farklı kütle numaralı çekirdekler ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$ ) için  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, np)$  fotonükleer reaksiyon tesir kesitleri ve foton enerjisinin fonksiyonu olarak farklı enerji ve farklı açı değerlerinde  $(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$  fotonükleer reaksiyon çift diferansiyel tesir kesitleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tesir kesiti verileri ile literatürdeki deneysel ve değerlendirilmiş tesir kesiti verileri karşılaştırılmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda tesir kesiti ve çift diferansiyel tesir kesiti değerlerinin çekirdeklerin kütle numarasına bağlı olduğu ve protonun hafif çekirdeklerdeki katkısının aksine ağır çekirdeklerdeki katkısının nötrona göre çok çok az olduğu görülmüştür. Ayrıca tek çıkışlı reaksiyon tesir kesitlerinin (fotonötron veya fotoproton) çok çıkışlı reaksiyon tesir kesitlerine (fotonötron-proton) göre sayısal olarak daha büyük sonuçlar verdiği ve aynı açı değerlerinde uyarılma enerjisi arttıkça çift diferansiyel tesir kesiti maksimum değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca aynı uyarılma enerjisinde açı değeri arttıkça deneysel veriler ile olan uyumun da arttığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotonükleer reaksiyon tesir kesiti, TALYS 1.2, TARLA  
2014, 132 sayfa

## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

### **THEORETICAL INVESTIGATION OF SOME NUCLEI PHOTONUCLEAR REACTION CROSS SECTIONS**

**Nurdan KARPUZ**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Nuclear Physics**

**Supervisor: Prof. Dr. İskender AKKURT**

**Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Betül MAVİ**

Photonuclear reaction data, as well as for basic research applied research is also important to. At the beginning of today's most important technologies include accelerator technologies. In this sense, TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara), which is the first facility to be implemented in the Project of Turkish Accelerator Center, is very important in terms of being the first radiation source of Turkey. In this facility, there will be established bremsstrahlung facility produced photons for various nuclear physics research and photonuclear reactions research.

This study, contains the theoretical calculations of the photonuclear reaction cross sections which take place in the bremsstrahlung experiment facility. Nuclear code TALYS 1.2 program was used in the calculations. Depending on the incoming photon energy, for different mass number nuclei ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  and  $^{90}\text{Zr}$ ) ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, np$ ) photonuclear cross sections and as a function of incoming photon energy for different angles and energies ( $\gamma, n$ ) and ( $\gamma, p$ ) photonuclear reaction double differential cross sections were calculated. The calculated cross sections data were compared with both the experimental data of cross sections and the evaluated cross sections in literature.

As a result of the calculations, cross section and differential cross section values were found to be depend on the mass number of nuclei and in contrast to the proton contribution in light nuclei, contribution of protons in heavy nuclei was found to be far too little according to neutrons. In addition, it was found to be that reaction cross section from single output (photoneutron or photoproton) is larger than reaction cross section from multi output (photoneutron-proton) and it was seen that at the same angle, as the excitation energy increases, the maximum value of double differential cross section increases. However, at the same excitation energy, as the angle increases, increased compliance with the experimental data was observed.

**Keywords:** Photonuclear reaction cross section, TALYS 1.2, TARLA  
**2014, 132 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma için beni yönlendiren ve YUUP projesine katılmamı sağlayan, hiçbir desteğini esirgemeyen değerli Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. İskender AKKURT'a teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında her türlü yardımının yanında maddi ve manevi desteğiyle yanımda olan, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli İkinci Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Betül MAVİ'ye teşekkür ederim.

Doktora tez izleme komitesinde jüri olmayı kabul eden hocalarım Sayın Prof. Dr. Fatih UCUN ve Sayın Prof. Dr. Mustafa YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda doktora tez savunmamda jüri olmayı kabul ederek beni onurlandıran değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Fatih UCUN, Sayın Prof. Dr. Mustafa YILDIZ, Sayın Doç. Dr. Gültekin YEGİN, Sayın Doç. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN, Sayın Yrd. Doç. Dr. Nilgün DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan bilgisayar programı ile ilgili desteğinden dolayı Şevki KİREMİTÇİOĞLU'na teşekkür ederim.

3195-D2-12 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmamız YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslar arası Proje) tarafından desteklenmiş olup; tezimin gerçekleşmesinde DPT2006 K-120470 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ TARLA-BREMSSTRAHLUNG ekibine teşekkür ederim.

Bursiyer olarak katkı verdiğim 112M373 Nolu proje ile TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, bu süreçte de sürekli destekçim olan yüreğime can kalemime derman olan annem Nursel, babam Mustafa, kardeşlerim Nusret ve Samet'e çok teşekkür ederim.

Nurdan KARPUZ  
ISPARTA, 2014

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                    | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. TARLA tesisinin şematik gösterimi .....                                                                 | 1     |
| Şekil 1.2. Bremsstrahlung rasyasyonunun oluşumu .....                                                              | 7     |
| Şekil 1.3. Gama enerjisine göre üç etkileşmenin baskın olduğu aralıklar .....                                      | 8     |
| Şekil 1.4. Fotoelektrik olayın enerji aktarımı .....                                                               | 10    |
| Şekil 1.5. Gama spektrumunda fotoelektrik olaydan kaynaklanan fotopik .....                                        | 11    |
| Şekil 1.6. Compton saçılmasının geometrik ifadesi .....                                                            | 13    |
| Şekil 1.7. Çift oluşumu ve annihilasyon (yok olma) .....                                                           | 15    |
| Şekil 1.8. Saçılma olayı sonucu dalga boyunun gösterimi .....                                                      | 16    |
| Şekil 1.9. Fotoçözülme (fotodisintegrasyon) olayı .....                                                            | 17    |
| Şekil 1.10. Parçacıkların madde içindeki giriciliklerinin kıyaslanması .....                                       | 18    |
| Şekil 1.11. Gelen radyasyon şiddetinin x kalınlığındaki engelle azaltılması .....                                  | 18    |
| Şekil 1.12. Saçılma odasının şematik gösterimi .....                                                               | 22    |
| Şekil 1.13. Bir potansiyel alanın saçılma olayına etkisi .....                                                     | 23    |
| Şekil 1.14. $d\Omega$ katı açısı içinde saçılan demeti gösteren reaksiyon geometrisi .....                         | 24    |
| Şekil 1.15. Nükleon başına toplam fotoabsorbsiyon tesir kesiti .....                                               | 27    |
| Şekil 1.16. TARLA donanım yerleşim planı .....                                                                     | 31    |
| Şekil 4.1. $^{12}\text{C}$ çekirdeği için $(\gamma, n)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                              | 55    |
| Şekil 4.2. $^{12}\text{C}$ çekirdeği için $(\gamma, p)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                              | 56    |
| Şekil 4.3. $^{12}\text{C}$ çekirdeği için $(\gamma, np)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                             | 57    |
| Şekil 4.4. $^{16}\text{O}$ çekirdeği için $(\gamma, n)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                              | 58    |
| Şekil 4.5. $^{16}\text{O}$ çekirdeği için $(\gamma, p)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                              | 60    |
| Şekil 4.6. $^{16}\text{O}$ çekirdeği için $(\gamma, np)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                             | 61    |
| Şekil 4.7. $^{90}\text{Zr}$ çekirdeği için $(\gamma, n)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                             | 62    |
| Şekil 4.8. $^{90}\text{Zr}$ çekirdeği için $(\gamma, np)$ reaksiyonu tesir kesiti .....                            | 63    |
| Şekil 4.9. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 64    |
| Şekil 4.10. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 65    |
| Şekil 4.11. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 66    |
| Şekil 4.12. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 67    |
| Şekil 4.13. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....   | 68    |
| Şekil 4.14. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 69    |
| Şekil 4.15. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 70    |
| Şekil 4.16. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 71    |
| Şekil 4.17. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....   | 72    |
| Şekil 4.18. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 73    |
| Şekil 4.19. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 74    |
| Şekil 4.20. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 75    |
| Şekil 4.21. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 87-96 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....   | 76    |
| Şekil 4.22. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 87-96 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 77    |
| Şekil 4.23. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 87-96 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 78    |
| Şekil 4.24. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 87-96 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 79    |
| Şekil 4.25. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 96-108 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 80    |
| Şekil 4.26. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 96-108 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....    | 81    |
| Şekil 4.27. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 96-108 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti ..... | 82    |
| Şekil 4.28. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 96-108 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....   | 83    |



|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.29. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 108-123 MeV $40,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti ..... | 84  |
| Şekil 4.30. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 108-123 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....   | 85  |
| Şekil 4.31. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 108-123 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir .....       | 86  |
| Şekil 4.32. $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ reaksiyonu 108-123 MeV $142^\circ$ de çift diferansiyel tesir .....         | 87  |
| Şekil 4.33. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $30^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 88  |
| Şekil 4.34. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $45^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 89  |
| Şekil 4.35. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $60^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 90  |
| Şekil 4.36. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $75^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 91  |
| Şekil 4.37. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 92  |
| Şekil 4.38. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $105^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 93  |
| Şekil 4.39. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $120^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 94  |
| Şekil 4.40. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 60 MeV $135^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 95  |
| Şekil 4.41. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $30^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 96  |
| Şekil 4.42. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $45^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 97  |
| Şekil 4.43. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $60^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 98  |
| Şekil 4.44. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $75^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 99  |
| Şekil 4.45. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....        | 100 |
| Şekil 4.46. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 80 MeV $120^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 101 |
| Şekil 4.47. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 200 MeV $60^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 102 |
| Şekil 4.48. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 200 MeV $80^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....       | 103 |
| Şekil 4.49. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 200 MeV $100^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....      | 104 |
| Şekil 4.50. $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ reaksiyonu 200 MeV $120^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....      | 105 |
| Şekil 4.51. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $40^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 106 |
| Şekil 4.52. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 107 |
| Şekil 4.53. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 108 |
| Şekil 4.54. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 63-71 MeV $142,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 109 |
| Şekil 4.55. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $40^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 110 |
| Şekil 4.56. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 111 |
| Şekil 4.57. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 112 |
| Şekil 4.58. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 71-79 MeV $142,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 113 |
| Şekil 4.59. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $40^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 114 |
| Şekil 4.60. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $90^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....     | 115 |
| Şekil 4.61. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $113,5^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 116 |
| Şekil 4.62. $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ reaksiyonu 79-87 MeV $142,2^\circ$ de çift diferansiyel tesir kesiti .....  | 116 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                          | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 1.1. İyonlaştırıcı radyasyonların etkileşme özellikleri .....    | 4            |
| Çizelge 1.2. Elektromanyetik spektrum bölgelerinde gama ışınlarının..... | 5            |

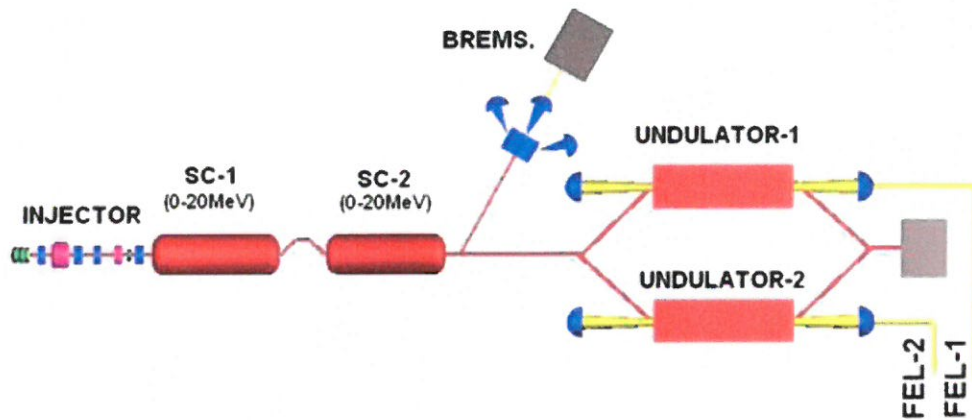
## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|            |                                                                                                                                                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C          | Karbon                                                                                                                                                              |
| CDFE       | Centr Dannykh Fotoyadernykh Eksperimentov, Russia<br>(Fotonükleer Deneyler Veri Merkezi, Rusya)                                                                     |
| CEA        | Atomic Energy and Alternative Energies Commission (Atom<br>Enerjisi ve Alternatif Enerjiler Komisyonu)                                                              |
| CERN       | Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (Avrupa Nükleer<br>Araştırma Merkezi)                                                                                  |
| CINDA      | IAEA's Computer Index of Nuclear Data (Uluslar arası Atom<br>Enerjisi Kurumu'nun Nükleer Veri Bilgisayar İndeksi)                                                   |
| DPT        | Devlet Planlama Teşkilatı                                                                                                                                           |
| DWBA       | Distorted Wave Born Approximation (Bozunmuş Dalga Born<br>Yaklaşımı)                                                                                                |
| ENDF       | Evaluated Nuclear Data File (Uluslar arası Atom Enerjisi Kurumu<br>Hesaplanmış Nükleer Veri Dosyası)                                                                |
| $E_0$      | Elektron demetinin enerjisi                                                                                                                                         |
| $E_\gamma$ | Fotonun enerjisi                                                                                                                                                    |
| eV         | Elektron volt                                                                                                                                                       |
| EXFOR      | Library of Experimental Nuclear Cross Section Data in the<br>Exchange FORmat (Uluslar arası Atom Enerjisi Kurumu Deneysel<br>Nükleer Tesir Kesiti Veri Kütüphanesi) |
| GDR        | Giant Dipole Resonance (Yüksek Dipol Rezonans)                                                                                                                      |
| GR         | Giant Resonance (Yüksek Rezonans)                                                                                                                                   |
| IAEA       | International Atomic Energy Agency (Uluslar arası Atom Enerjisi<br>Kurumu)                                                                                          |
| IR-FEL     | Free Electron Laser (Serbest Elektron Lazeri)                                                                                                                       |
| JAERI      | Japan Atomic Energy Research Institute (Japonya Atom Enerjisi<br>Araştırma Enstitüsü)                                                                               |
| JEFF       | OECD-NEA's Nuclear Data Library (Ekonomik İşbirliği ve<br>Kalkınma Örgütü Nükleer Enerji Kurumu Nükleer Veri<br>Kütüphanesi)                                        |
| JENDL      | Japanese Evaluated Nuclear Data Library (Japon Hesaplanmış                                                                                                          |

|                      |                                                                                                                    |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      | Nükleer Veri Kütüphanesi)                                                                                          |
| KAERI                | Korea Atomic Energy Research Institute (Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü)                                    |
| LLNL                 | Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA<br>(Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı, Livermore, ABD) |
| mb                   | Milibarn                                                                                                           |
| MeV                  | Mega elektron Volt                                                                                                 |
| O                    | Oksijen                                                                                                            |
| SEL                  | Serbest Elektron Lazeri                                                                                            |
| TAC                  | Turkish Accelerator Center (Türk Hızlandırıcı Merkezi)                                                             |
| TAEK                 | Türkiye Atom Enerjisi Kurumu                                                                                       |
| TARLA                | Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara<br>(Ankara'da Türk Hızlandırıcı ve Radyasyon Laboratuvarı)  |
| TENDL                | TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library (TALYS programı ile Hesaplanmış Nükleer Veri Kütüphanesi)               |
| THM                  | Türk Hızlandırıcı Merkezi                                                                                          |
| YUUP                 | Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslar arası Proje                                                                    |
| Zr                   | Zirkonyum                                                                                                          |
| QED                  | Kuantum Elektrodinamiği                                                                                            |
| QD                   | Quasi Deuteron (Döterona Benzer)                                                                                   |
| XUNDL                | Experimental Unevaluated Nuclear Data List (DeneySEL Olarak Hesaplanmamış Nükleer Veri Listesi)                    |
| $(\gamma, n)$        | Fotonötron oluşum reaksiyonu                                                                                       |
| $(\gamma, 2n)$       | İki fotonötron oluşum reaksiyonu                                                                                   |
| $(\gamma, np)$       | Fotonötron-proton oluşum reaksiyonu                                                                                |
| $(\gamma, p)$        | Fotoproton oluşum reaksiyonu                                                                                       |
| $\sigma$             | Sigma, Tesir kesiti                                                                                                |
| $\sigma(\gamma, xn)$ | Üretilen fotonötron tesir kesiti                                                                                   |
| $\sigma(\gamma, sn)$ | Toplam fotonötron tesir kesiti                                                                                     |
| $\sigma(\gamma, n)$  | Tek fotonötron tesir kesiti                                                                                        |
| $\sigma(\gamma, p)$  | Tek fotoproton tesir kesiti                                                                                        |
| $\sigma(\gamma, np)$ | Fotonötron-proton tesir kesiti                                                                                     |
| $\Omega$             | Omega, Katı açısı                                                                                                  |

## 1. GİRİŞ

Becquerel'in 1896 yılında radyoaktifliği keşfetmesi ve ardından Rutherford'un 1911'de çekirdeğin varlığını ileri süren ilk deneyi ile başlayan atom çekirdeğindeki olayları inceleyen nükleer fizik, teknolojik yeniliklerin ortaya çıkması ya da çıkarılması anlamında geniş uygulama alanına sahip olan önemli bir bilim alanıdır. Bu alanlardan biri olan nükleer tıpta radyoaktif elementler (radyoizotoplar) hem teşhis amaçlı, hem de tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Nükleer fizik temelinde yapılan hızlandırıcılarla, vücuttaki dokular, kemikler ve organlar test edilmektedir. Bu tür teknolojiler birçok ülkelerde yıllardan beri kullanılmaktadır. Türkiye'de ise Ar-Ge amaçlı ilk tesisin kurulma çalışmaları TAC (Turkish Accelerator Center) projesi ile başlamış olup bu proje toplam 12 üniversitenin (Süleyman Demirel, Ankara, Gazi, Boğaziçi, Doğuş, Dumlupınar, Niğde, Uludağ, İstanbul, Erciyes, Osmangazi Üniversiteleri ve Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü) işbirliği ile yürütölmektedir. DPT (Devlet Planlama Teşkilatı) tarafından YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslar arası Proje) projesi ile desteklenmekte olan bu proje çerçevesinde TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara) ilk kurulacak ışı nım kaynağıdır. TARLA'da IR-FEL ışı nım kaynağı ile bremsstrahlung deney hattı yer alacaktır. TARLA'daki bremsstrahlung deney hattının da içinde olduğu deney alanlarının bölgesinin şematik gösterimi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. TARLA tesisinin şematik gösterimi (Türk Hızlandırıcı Merkezi)

Nükleer fizikteki teorik ve deneysel çalışmalar 20. yüzyıl fiziğinin gelişmesinde oldukça büyük pay sahibidir. Temel çekirdek fiziğini anlayabilmek için deneysel sonuçlardan elde edilen veriler önemlidir. Buna rağmen deneysel veri az ise veya yoksa ve deneysel zorluk sebebiyle veri üretilmesi mümkün değilse, uyarılma tepkimesine bağlı tesir kesitlerinin, diferansiyel tesir kesitlerinin, çift diferansiyel tesir kesitlerini elde etmek için teorik hesaplamalara gereksinim duyulur. Son zamanlardaki deneysel çalışmaların yanı sıra teorik çalışmaların da deneysel çalışmalara katkısı ile bilimde hızla ilerleyiş görülmektedir. Hesaplanan teorik çalışmaların deneysel çalışmalarla gösterdiği uyumlu sonuçlar, çalışmaların önemli derecede gelişimini sağlamaktadır. Teorik çalışmalar temelinde nükleer reaksiyonların pek çok enerji değeri için tesir kesitlerinin incelenmesi gerekir. Tesir kesitlerinin incelenmesinde Monte Carlo teknikleri ve bu tekniklere dayalı programlar kullanılmaktadır.

Monte Carlo yöntemi, analitik çözümü mümkün ya da pratik olmayan fiziksel ve matematiksel problemler için tekrarlanan rastgele örneklemeler yardımıyla sayısal çözümler oluşturmaya dayanan bir hesaplama tekniğidir. 1940 yılında Stanislaw Ulam tarafından Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda nükleer silah projeleri üzerine çalışırken geliştirilmiştir. Yönteme ismini Monte Carlo şehrindeki kumarhanelere ithafen Nicholas Constantine Metropolis vermiştir (Bozkurt, 2013).

Gelişen teknoloji beraberinde Monte Carlo tekniklerinin nükleer ve parçacık fiziğine, medikal fiziğe, dedektör tasarımlarına, maliyetin yüksek olduğu deneylerin tasarlanmasına ve çözümlenmesine dair uygulamalarını da getirmiştir. Bu uygulamalarla birlikte araştırılan parçacığın belirli enerjilerde reaksiyon oluşum olasılığının belirlenmesinde ve belirli bir enerji değerinde hangi açılarda saçılabileceğinin veya belirli bir açıda hangi çıkış enerjilerinde reaksiyon vereceğinin belirlenmesinde de Monte Carlo tekniklerinin yeri büyüktür.

Nükleer reaksiyonlar, reaksiyonu gerçekleştiren ve kullanılan parçacık türüne göre değişik isimler alır. Kullanılan parçacık foton ise **fotonükleer reaksiyonlar** olarak adlandırılır. Fotonükleer reaksiyonlarda, hedef çekirdek

fotonlar ile doğrudan uyarılır. Bu reaksiyonlar, çekirdek yapısının araştırılmasında kullanılan önemli reaksiyon türlerinin başında gelmektedir. Çünkü bu etkileşimde fotonun çekirdekle etkileşim mekanizmalarını izikte iyi bilinen Kuantum Elektrodinamik Teorisi (QED) açıklamaktadır (Akkurt, 2003). Bununla birlikte radyoaktif kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının incelenmesiyle de uyarılmış nükleer durumların yapısı hakkında bilgi edinilebilir (Şenyiğit, 2011).

Fotonükleer tesir kesiti verisi günümüzde pek çok uygulamalarda önem teşkil etmektedir. Bu uygulamalardan bazıları; radyoterapi süresince insan vücudunda absorbe edilmiş dozun hesaplamaları, fisyon reaktörleri teknoloji ve fiziği, füzyon reaktörleri teknoloji ve fiziği, aktivasyon analizleri, nükleer kayıp dönüşümü ve astrofiziksel nükleosentezdir.

Yaklaşık 50 MeV üzeri enerjilerde fotonükleer veri bazı yeni medikal hızlandırıcı teknolojileri için kullanışlıdır. Fotonükleer veri için en önemli materyaller (43 element) yapısal, koruma ve bremsstrahlung hedef materyaller, biyolojiksel ve ayrılabilir materyaller kategorisi altında değerlendirilmiştir (IAEA-TECDOC, 2000).

- Yapısal, koruma ve bremsstrahlung hedef materyaller (Be, Al, Si, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Sn, Ta, W, Pb)
- Biyolojiksel materyaller (C, N, O, Na, S, P, Cl, Ca)
- Bölünebilir malzemeler (Th, U, Np, Pu)
- Diğer malzemeler (H, K, Ge, Sr, Nb, Pd, Ag, Cd, Sb, Te, I, Cs, Sm, Tb)

Kurulumu halen devam etmekte olan TAC projesi kapsamında TARLA-Bremsstrahlung bölgesinde deneylere başlamadan önce yapılan fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinin teorik hesaplamaları yapılmıştır. Bu tez ile kurulumu devam eden Türk Hızlandırıcı Merkezi-TARLA-Bremsstrahlung tesisinde yapılacak olan çalışmalara, fotonükleer reaksiyon tesir kesiti için gerekli veri tabanının güçlendirilmesine, üretim teknolojisinin geliştirilmesine ve yapılacak olan deneysel çalışmalara katkı sağlanacaktır.



## 1.1 Gama Işınları ve Özellikleri

Işığın temel birimi ve elektromanyetik alanın kuantumu olan gama ışını, aynı zamanda elektromanyetik kuvvetin kuvvet taşıyıcısıdır. Herhangi bir durağan kütleye sahip olmadığı için bu kuvvetin etkileri hem mikroskobik hem de makroskobik ölçülerde gözlemlenebilir. Gama ışını kuantum mekaniği ile tanımlamak ve açıklamak mümkün olduğu için dalga ve parçacık özelliği gösterir. Kütlesiz ve yüksüz olmaları nedeniyle alfa, beta, proton ve diğer yüklü iyon radyasyonlarına kıyasla farklı özelliklere sahip oldukları Çizelge 1.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. İyonlaştırıcı radyasyonların etkileşme özellikleri

|                    | $\alpha$                | $\beta^+$ ve $\beta^-$ | n                 | X-ışınları          | $\gamma$           |
|--------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| Yük                | +2                      | $\pm 1$                | 0                 | 0                   | 0                  |
| İyonizasyon        | Doğrudan                | Doğrudan               | Dolaylı           | Dolaylı             | Dolaylı            |
| Kütle (akb)        | 4,00277                 | 0,000548               | 1,008665          | -                   | -                  |
| Hız (m/s)          | $694 \times 10^4$       | $282 \times 10^6$      | $138 \times 10^5$ | $299 \times 10^6$   | $299 \times 10^6$  |
| Enerji (MeV)       | 3-10                    | 0-3                    | 0-10              | $10^{-4} - 10^{-1}$ | $10^{-5} - 10$     |
| Havada menzil (cm) | 0-10                    | $0-10^3$               | $0-10^5$          | $10^2-10^3$         | $1-10^4$           |
| Suda menzil (cm)   | $20-125 \times 10^{-8}$ | <1                     | 0-100             | $10^{-3}-1$         | $10^{-3}$ -onlarca |

Elektromanyetik spektrumda yer alan bölgelere ait gama ışınlarının dalgaboyu, frekans ve enerji kıyaslamaları da Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.



Çizelge 1.2. Elektromanyetik spektrum bölgelerinde gama ışınlarının kıyaslamaları

| Gama ışın bölgesi | Dalgaboyu   | Frekans (Hz)       | Enerjisi     |
|-------------------|-------------|--------------------|--------------|
| Radyo dalgası     | 1 km.       | $3 \times 10^5$    | 1 neV        |
| Mikrodalga        | 1 cm.       | $3 \times 10^{10}$ | 120 $\mu$ eV |
| Kızılötesi        | 10 $\mu$ m. | $3 \times 10^{13}$ | 120 MeV      |
| Görünür           | 550 nm.     | $5 \times 10^{14}$ | 2 eV         |
| Ultraviyole       | 100 nm.     | $3 \times 10^{15}$ | 12 eV        |
| X-ışını           | 0.05 nm.    | $6 \times 10^{18}$ | 25 keV       |
| Gama ışını        | 0.00005 nm. | $6 \times 10^{21}$ | 25 MeV       |

1900 yılında Paul Villard, alfa ve beta parçacıklarından farklı olarak manyetik alandan etkilenmeyen, yüksüz oldukları için elektrik ve manyetik alanda sapma göstermeyen, madde içinde daha yüksek nüfuz etme özelliğine sahip, madde içerisinden geçerken üstel bir fonksiyon şeklinde şiddet azalması gösteren bir radyoaktif ışının varlığını keşfederek bu ışınlara gama ışını adını vermiştir. Gama ışınları, X-ışınları veya görünür ışık gibi elektromanyetik radyasyon fotonlarıdır fakat görünür ışık enerjisine kıyasla çok yüksek enerjiye sahiptir. Herhangi bir elektriksel yüke sahip olmayan gama ışınları yüklü parçacıklarda görülen Coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Ancak, elektromanyetik kuvvet taşıyıcıları oldukları için madde ile iyonlaşma şeklinde ve ortama enerji depolama şeklinde etkileşirler.

Gama ışınlarının ve X ışınlarının madde ile etkileşimleri aynıdır. Gama ve X ışınlarının zayıflatılmaları temelde foton ile maddenin etkileşimleriyle gerçekleşir. Foton maddesel bir çekirdek değil; bir enerji paketçidir. Gama ışınları, kararsız olan atom çekirdeğinden yayınlanır. X-ışınları ise, hızlandırılmış elektronların yüksek atom numaralı hedef atomlarının çekirdeklerine yaklaştıklarında çekirdeğe çarpması sonucu oluşur. Her iki ışının da elektrik yükleri yoktur fakat atomla etkileştiklerinde iyonlaşma meydana gelir. Elektrik yükleri olmaması nedeniyle etkileştikleri madde tarafından itilip-çekilmezler buna rağmen yolları üzerinde bulunan parçacıklarla çarpışmalar yaparlar.

Gama ışınları; nükleer reaksiyonlar sonucunda uyarılmış durumda olan çekirdeklerin taban durumlarına geçmesi sırasında, radyoaktif bozunmaya uğrayan çekirdeklerde, çift oluşum sonrasında meydana gelen pozitronun bir elektronla birleşip yok olması sonucunda, yüklü parçacıkların ani hızlandırılması veya durdurulması sonucunda (bremsstrahlung) oluşabilmektedir.

## **1.2 Gama Işınlarnının Elde Edilme Yöntemleri**

Fotonükleer reaksiyonlarda hedef çekirdeğe gönderilen gama ışınlarının elde edilme yöntemleri olan frenleme radyasyonu, uçuşta pozitron yok etme ve pozitron etiketleme, kaynaktan elde etme ve lazer geri saçılma yöntemi başlıkları altında foton kaynakları mevcuttur. Bu foton kaynaklarından, çalışmanın temelini oluşturması amacıyla sadece frenleme yöntemi üzerinde durulmuştur.

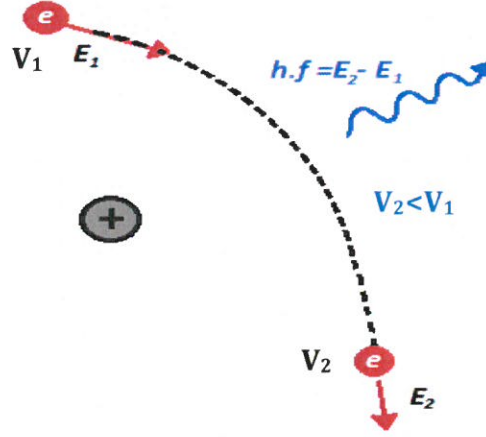
### **1.2.1 Bremsstrahlung (frenleme) yöntemi**

Fotonükleer tesir kesitleri ilk olarak bu kaynak türünde ölçülmüştür. Frenleme radyasyonu, hızlandırıcılardan (ilk olarak betatronlar, sinkrotronlar kullanılırken daha sonra doğrusal hızlandırıcılar kullanılır) gelen elektron demeti bir radyatör hedefe çarptırılarak oluşturulur (IAEA, 2000). Ayrıca, yüksek enerji fiziğinde, foton demetlerini oluşturmak için bremsstrahlung kullanılmıştır.

Parçacıklar madde içinden geçtiklerinde, çarpışmayla saçılırlar ve enerji kaybederler. Çarpışma esnasında parçacıklar ivmelenir ve elektromagnetik ışıma yaparlar. Atomik çarpışma esnasında yayılan bu ışıma, bremsstrahlung (frenleme ışıması) olarak adlandırılır. İlk kez yüksek enerjili elektronlar kalın bir metal hedefte durdurulduğunda gözlenmiştir.

Bremsstrahlung veya frenleme radyasyonu ile ifade edilen x-ışını spektrumu, hızlı bir elektronun hedef çekirdeğinin yanından geçerken, çekirdeğin Coulomb alanı tarafından frenlenerek yavaşlatılan ve kaybedilen enerjiyi ifade etmektedir. Bu radyasyon elektronun ivmeli hareketinin sonucu ortaya çıkar ve

bununla birlikte çekirdeğin elektriksel çekimi nedeniyle izlediği düz yolda sapma oluşur. İfadenin şekilsel gösterimi Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. Bremsstrahlung rasyasyonunun oluşumu

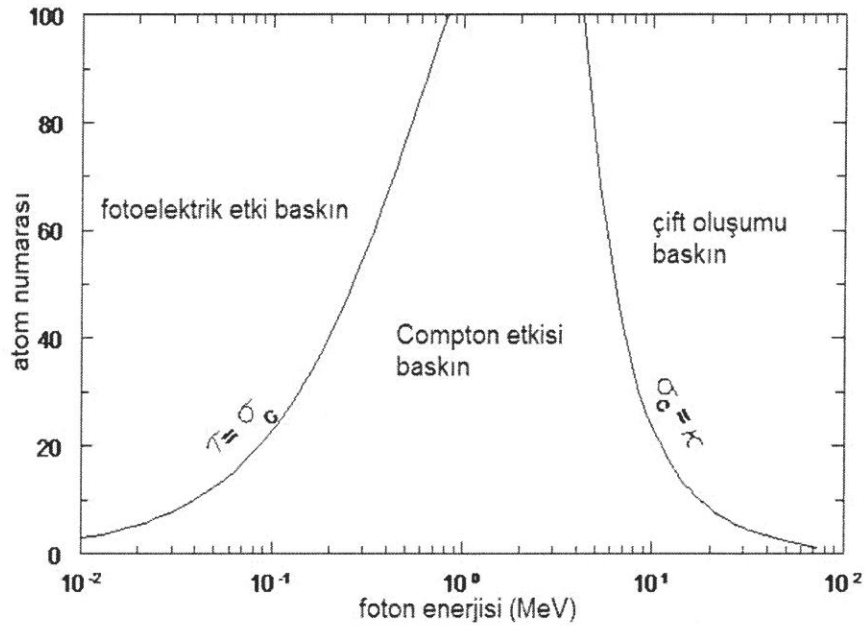
Hızlandırılan bir parçacığın yaydığı enerji, kütlenin karesiyle ters orantılı olduğundan; bremsstrahlung, hafif parçacıklar için büyük önem taşır.

Maddenin sürekli elektron demetine maruz bırakılması sonucu oluşan bremsstrahlung fotonları da aynı şekilde sürekli bir spektruma sahip olur. Ve bremsstrahlung fotonları konik şeklinde açısal bir dağılıma sahiptir. Bremsstrahlung konisi olarak adlandırılan dağılım, gelen elektron demetinin enerjisiyle bağlantılı olarak değişir. Bunun yanında oluşan bremsstrahlung fotonlarının enerjisinden bağımsızdır. Elektron çekirdeğe ne kadar yakınlıkta geçerse kaybettiği enerji de bununla birlikte artar. Enerji kaybı arttıkça da bremsstrahlung ile dışarı verilen fotonların enerjisi artar. Oluşan bremsstrahlung fotonlarının enerjisi sıfır ile gelen elektronun kinetik enerjisi arasında bir değerde olabilir. Maksimum foton enerjisi, gelen elektron demetinin enerjisinin %80'i kadardır.

Dünya genelinde bazı laboratuvarlar (genellikle Rusya, Kanada ve Avustralya'da bulunanlar) verilerin büyük bir kümesini elde etmek için bu tekniği kullanmaktadırlar.

### 1.3 Gama Işınlarnının Madde İle Etkileşimi

Herhangi bir maddeden geçerken gama ışınlarının bir kısmı soğrulur. Bu soğrulma; gama ışını dalga boyunun uzunluğuna, maddenin kalınlığına, yoğunluğuna, atom numarasının büyüklüğüne bağlıdır. Gama ışını hareket ettiğı ortamdaki maddeyle farklı şekillerde etkileşir. Gama ışınları atomun orbital elektronlarıyla ya da çekirdeğı ile etkileşebilir. Gama ışınının madde ile etkileşiminde önemli olan faktör moleküler yapının aksine atomik yapıdır. Gama ışınının enerjisine göre maddeyle etkileşiminde fotoelektrik etkileşme, Compton etkileşmesi ve çift oluşumu en temel etkileşimler olmak üzere bunun yanında Rayleigh saçılması ve fotoçözünme etkileşimleriyle birlikte beş farklı etkileşim vardır.



Şekil 1.3. Gama enerjisine göre üç etkileşmenin baskın olduğu aralıklar (Krane, 2006)

Fotoelektrik etkileşme ve çift oluşumu gama ışınlarının soğrulmasına, Compton etkileşmesi ise gama ışınlarının saçılmasına dayalı fiziksel olaylardır. İfade edilen etkileşimler her gama enerjisinde aynı oranda etki göstermezler. Etkileşimlerin baskın oldukları enerji aralıkları sabit değerlerde değildir. Söz konusu etkileşimler; gama ışınının enerjisine, gama ışınlarıyla etkileşime giren malzemenin atom numarasına bağıllık gösterirler. Atom numarası 0-100 ve

gama enerjisi  $10^{-2}$  MeV -  $10^2$  MeV aralığında olmak üzere bu değişim Şekil 1.3'de gösterilmektedir.

Şekil 1.3'den düşük gama enerjilerinde fotoelektrik olayın, orta dereceli enerjilerde compton, yüksek enerjilerde ise çift oluşum sürecinin baskın olduğu görülmektedir. Ayrıca, düşük atom numaralı (karbon gibi) materyallerde compton etkisinin alanı geniştir ( $\sim 20$  keV -  $\sim 30$  MeV'e kadar). Bu alan atom numarası arttıkça daralmaktadır.

### 1.3.1 Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olay, kuantum fiziği açısından tarihsel önem arz etmektedir. Einstein, 1905 yılında klasik fizikle açıklanamayan bu fenomeni Planck'ın enerji kuantumları fikrini ışığa uyarlamasıyla kuantum fiziğinin temellerini oluşturmuştur. Elektromanyetik dalga fotonu (gama ışını), atomun dış kabuğundaki veya çekirdeğin çevresindeki elektronlardan biri ile etkileşir. Etkileşim neticesinde tüm enerjisini bu elektrona verir ve böylelikle elektronu yörüngesinden fırlatır. Elektronunu kaybeden atom iyonlaşır. Atomdan sökülen bu elektrona fotoelektron denir.

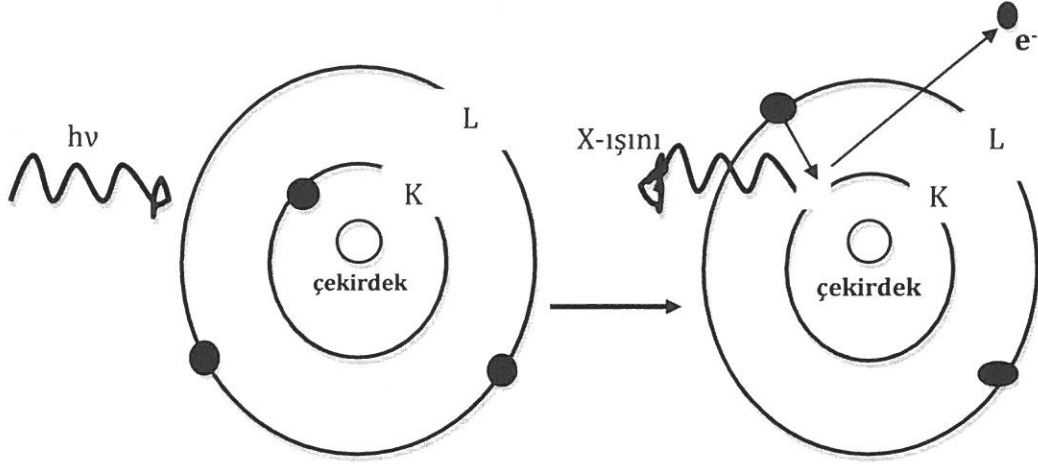
Elektronların bağlanma enerjileri ile atomun atom numarası doğru orantılıdır. Böylelikle atom numarası yüksek olan atomların elektron bağlanma enerjileri daha yüksektir. Düşük atom sayılı hedef maddelerin K düzeyi elektronlarının bağlanma enerjileri düşüktür. Bu yüzden oluşan fotoelektron ile fotonun enerjisi yaklaşık olarak aynıdır.

Fotonun enerjisi  $h\nu$  ve elektronun bağlanma enerjisi  $E_b$  olarak alındığında atomik yörüngesinden ayrıldıktan sonraki elektronun kinetik enerjisi,

$$E_e = h\nu - E_b \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. Diğer bir ifadeyle geriye kalan bu enerji, yörüngeden fırlayan elektronu hızlandıran enerjidir. Fotoelektrik olay, 0,5 MeV'den düşük enerjili fotonlarda gözlemlenir. Bununla birlikte  $h\nu < E_b$  olduğunda fotoelektrik etkileşme gerçekleşmez.

Fotoelektrik olayın sonucunda K yörüngesinde boş kalan elektronun yerine diğer yörüngelerden bir elektron geçer. Bu elektron transferi gerçekleşirken elektronun enerjisi X-ışını olarak açığa çıkar. Bu durum Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Açığa çıkan enerji her element için karakteristik olduğundan bu ışıma karakteristik ışıma olarak adlandırılır.



Şekil 1.4. Fotoelektrik olayın enerji aktarımı

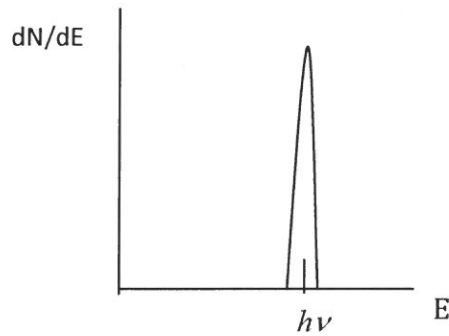
Fotoelektrik olaylar gözlemlendiğinde; atom ve foton etkileşimlerinin atomun en içteki K kabuğundan kaynaklandığı söylenebilir. Shultis ve Faw (2002) hafif çekirdeklerde (alüminyum vb.) etkileşmelerin neredeyse tamamının, ağır çekirdeklerde (kurşun ve ötesi) ise etkileşmelerin %80'inin K kabuğunda gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Akyıldırım, 2011).

Fotoelektrik olayın tam bir soğurma şekli olduğu söylenebilir. Soğurma olasılığı, gama ışını (foton) enerjisine, elektronun bağlanma enerjisine ve atom numarasına bağlıdır. Fotoelektrik olayda fotonlar sadece K kabuğunda soğrulmaz. Aynı zamanda L ve M kabukları da fotonların soğrulduğu kabuklardır. Fakat L ve M kabuklarında elektron bağlanma enerjileri K kabuğundakilere kıyasla küçük olduğundan toplam tesir kesitine etkileri ihmal edilir. L ve M kabuklarının etkileşime katılması ağır elementlerde gözlemlenebilir.

Fotoelektrik olay, tanısal radyolojide büyük öneme sahiptir. Fotoelektrik olayda fotonun enerjisinin tamamı maddenin atomu tarafından soğrulduğu için saçılma ışınımı açığa çıkmaz.

Fotonun enerjisinin tümü soğrulduğu için hiçbir yoluna devam edemez, böylece röntgen filminde fotoelektrik soğrulmaya maruz kalan madde parçasının altında düzenli bir beyaz gölge görülür. Fotoelektrik soğrulma, bir röntgen filminde kemiklerin niçin beyaz olduğunun sebebidir. Kurşun blokların kullanılma sebebi de budur. Kemik, kurşun ve baryum yüksek atom numaralı elementlerden oluşmuştur. Genellikle teşhise yönelik radyolojide, sadece yüksek atom numaralı elementlerden oluşan dokular fotoelektrik soğurulmaya maruz kalır (Ulu, 2008).

Tanısal radyolojinin yanı sıra fotoelektrik olay, gama ışın ölçümü için de önemlidir. Gelen gama ışını sahip olduğu tüm enerjisini dedektöre bırakır ve spektrumda fotopik olarak isimlendirilen tam bir enerji piki verir. Bu pik Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Gama spektrumunda fotoelektrik olaydan kaynaklanan fotopik

### 1.3.2 Compton saçılması

Gama ışınları ile atomdaki elektronların gerçekleştirdiği en önemli etkileşmedir. Compton saçılması ilk kez Arthur Compton tarafından 1923 yılında, karbon bir hedeften saçılan elektronların dalga boyunun, gelen ışığın dalga boyundan daha uzun olduğunun gözlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemle ve ışığın sadece dalga özelliği ile açıklanamayacağını ifade eden çalışmasıyla 1927 Nobel Fizik Ödülünü kazanmıştır.



Compton saçılmasında,  $h\nu$  enerjisiyle gelen gama ışını hedefe yani atomun orbitallerindeki durgun kütle enerjisine sahip bir elektronla çarpışır. Elektronla etkileşen gama ışını, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve elektronu yörüngesinden koparır. Enerjisinin bir kısmını çarptığı elektrona aktaran gama ışını yön değiştirerek saçılmış radyasyon olarak yeni yönde ilerler. Elektron ise kazandığı bu enerji ile saçılan gama ışını yönünden farklı bir yönde ilerler.

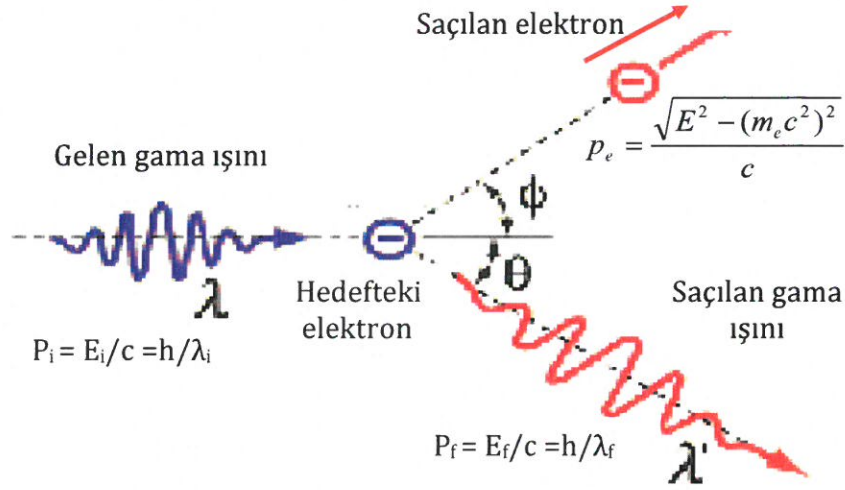
Compton saçılmasında, elektronu yörüngesinden koparan gama ışını, atomu iyonize haline getirir. Sonuçta pozitif yüklü atom ile negatif yüklü elektron olmak üzere iki iyon çifti oluşur. Enerjisinin bir kısmını elektrona aktardıktan sonra gama ışınında kalan enerjinin miktarı, gama ışınının ilk enerjisine ve elektrona çarpma-yer değiştirme açısına bağlıdır.

Serbest bir elektron ve gama ışını çarpışmasında eğer enerji ve momentum korunuyorsa gama ışınının tüm enerjisini elektrona aktarması imkansız bir olaydır. Aksi düşünülürse yani, gama ışınının enerjisinin tamamını elektrona aktardığı varsayılırsa, enerji korunumuna göre elektronun enerjisi  $E=mc^2$ , momentumu ise  $p=E/c=mV$  olur.  $P=E/c$  ifadesinde  $mc^2$  yerine yazılırsa  $c=V$  olur. Bu eşitlik imkansız bir durumdur. Böylelikle gama ışını, enerjisinin tamamını elektrona aktaramadığından dolayı saçılmaktadır. Saçılan gama ışını ilk andaki enerjisinden daha az enerjiye ve daha küçük dalga boyuna sahip olacaktır. Gelen ve saçılan gama ışını arasındaki enerji farkı, elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. İfade edilen dalga boyunu ve enerjiyi formülle değerlendirebiliriz. Bununla birlikte Compton saçılmasının geometrik ifadesini Şekil 1.6'da görebiliriz. Saçılan gama ışınının dalga boyundaki değişim,

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (1.2)$$

ile ifade edilir. Denklemdaki  $\lambda$  gelen gama ışınının (fotonun) dalga boyu,  $\lambda'$  saçılan gama ışınının (fotonun) dalga boyu,  $h$  Planck sabiti,  $m_e$  elektronun kütlesi,  $c$  ışık hızı ve  $\theta$  saçılan gama ışınının saçılma açısıdır.





Şekil 1.6. Compton saçılmasının geometrik ifadesi

Saçılan fotonun enerjisinin saçılma açısına bağlılığı ise,

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma} / m_e c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (1.3)$$

ile ifade edilir. Denklemdaki  $m_e c^2$  elektronun durgun kütle enerjisi,  $\theta$  saçılma açısı,  $E_{\gamma}$  gelen gama (foton) enerjisidir. Bu denklemde açiya bağlı olarak iki özel durum sözkonusudur:

İlk durum,  $\theta \cong 0$  olduğu durumdur. Bu ifadeye dayanarak, küçük saçılma açılarında  $\lambda \cong \lambda'$  veya  $h\nu \cong h\nu'$  olur. Bu durumda çarpışmadan sonra geri tepen Compton elektronu çok küçük bir enerjiye sahip olur ve saçılan gama ışınının enerjisi yaklaşık olarak gelen gama ışınının enerjisine eşittir. Büyük gama ışını enerjilerinde ise, saçılan gama ışınlarının enerjileri artan açı değeriyle azalır.

İkinci durum ise,  $\theta = \pi$  olduğu durumdur. Gelen gama ışını, geldiği yönün tam tersi yönünde saçılır. Bununla birlikte elektron ileri yönde hareket eder. Böylece Compton saçılmasında elektrona maksimum enerji aktarılabilir.

Saçılma açısının fonksiyonu olarak saçılan elektronun enerjisi,

$$E_e = \frac{E_\gamma (1 - \cos \theta)}{m_e c^2 + E_\gamma (1 - \cos \theta)} \quad (1.4)$$

ifadesiyle belirtilir. İfadedeki  $m_e c^2$  elektronun durgun kütle enerjisi,  $\theta$  saçılma açısı ve  $E_\gamma$  gelen gama ışını enerjisidir. İkinci durumda da bahsedildiği gibi saçılan elektronun enerjisi,  $E_e$ ,  $\theta = 180^\circ$  olduğunda en büyük değerini alır. Bu durumda foton geliş yönünün tersine yönelir.  $\theta = 90^\circ$  de ise, gama ışını elektrona hiç enerji aktarmaz ve gama ışını yön değiştirmeden hareketine devam eder.

Foton ile serbest bir elektron etkileşimi olarak ifade edilen compton etkileşimi, fotoelektrik etkiye zıttır. Çünkü fotonun enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden oldukça büyük olması gerekmektedir. Ayrıca serbest bir elektron ile gerçekleştiği için elementin atom numarasından bağımsız olması söz konusudur.

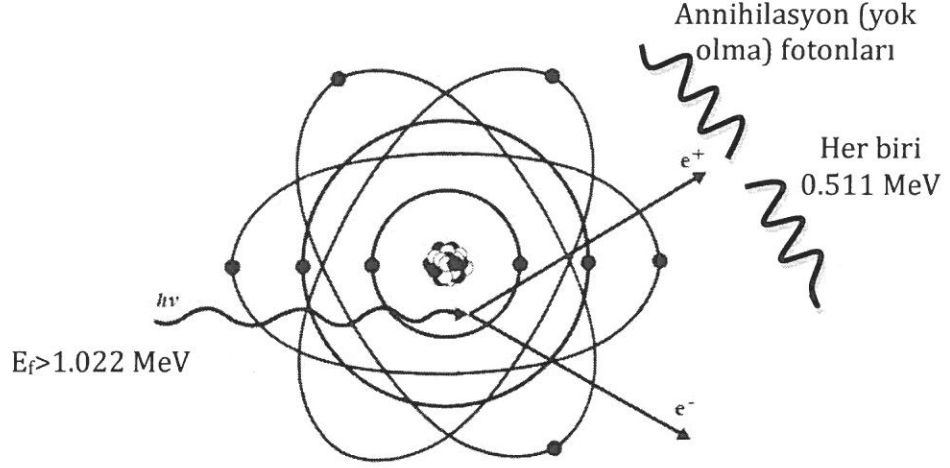
Compton saçılması tanısal radyolojide önemlidir. Tanısal radyolojide saçılan radyasyonun neredeyse tamamı compton etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Saçılan ışın filmde sislenmeye neden olur.

Compton etkileşimi enerjisi 0,5 MeV'den büyük olan gama ışınları ile gerçekleştirilir. Gama ışınının enerjisi arttıkça, compton etkileşim sayısı da artış gösterir. Bunun yanında elektronların sayısına, yoğunluğuna ve gama ışınının enerjisine bağlıdır. Soğurucu ortamın serbest bir elektronu ile gerçekleştiği için compton saçılması atom numarası Z'den bağımsızdır. Tanısal radyolojinin yanı sıra, saçılan elektronun gelen fotondan aldığı enerjiyi soğurucu ortama aktaracağı için compton saçılmasının radyasyon dozimetrisinde önemli bir yeri vardır.

### 1.3.3 Çift oluşumu

Çift oluşumu,  $E = mc^2$  Einstein eşitliğini örnekleyen bir enerji-kütle dönüşümüdür ve her foton enerjisinde meydana gelmez. Bununla birlikte, sadece bir coulomb kuvvet alanı içinde meydana gelir.  $h\nu \geq 1,022$  MeV (elektronun durgun kütle enerjisinin iki katı) enerjisine sahip gama ışını, genellikle

çekirdeğin coulomb alanında ve çok düşük bir ihtimalle de elektronun coulomb alanında  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$  denklemi temelinde birbirinin karşıt parçacığı olan, daha önce çekirdekte var olmayan elektron-pozitron çifti oluşturur. Gelen gama ışını tamamıyla kaybolur. Şekilsel olarak çift oluşumu Şekil 1.7'de ifade edilmiştir.



Şekil 1.7. Çift oluşumu ve annihilasyon (yok olma)

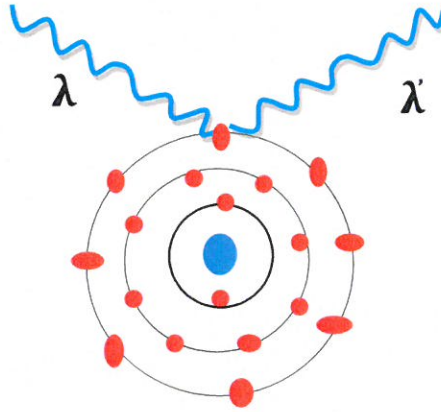
Çift oluşumu sonucunda oluşan pozitron, elektron ile aynı etkileşimleri yaparak, iyonizasyon, uyarma ve bremsstrahlungtan herhangi biri, enerjisini madde içinden geçerken kaybeder. Bu etkileşimler sonucunda pozitronun enerjisi gittikçe yavaşlar ve yeteri kadar enerjisini kaybettikten sonra yakınında bulunan serbest bir elektronu kendisine bağlar. Böylelikle pozitronyum adı verilen kararsız ve karşıt hidrojen atomunu oluştururlar. Oluşan bu atom yaklaşık 0,1 ns sonra  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$  denklemi gereğince bozunarak birbirine karşı zıt yönlerde 0,511 MeV'lik enerjiye sahip iki gama ışınına dönüşür. Gerçekleşen bu olay annihilasyon (yok olma) olarak ifade edilir. Tanısal radyolojide bu değere sahip yüksek enerji kullanılmadığı için; çift oluşumu tanısal radyoloji için önemsizdir.

Fotoelektrik olayda da olduğu gibi, çift oluşumunun gerçekleşmesi için, başka bir ifadeyle momentumun korunumunun sağlanması için, oluşumun atom içerisinde gerçekleşmesi gerekir. Çift oluşumu çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşiminden doğduğu için, gerçekleşme olasılığı atom numarasının artması ile artar. Buna istinaden gelen fotonun çift oluşum tesir kesiti  $Z^2$  ile orantılıdır.

### 1.3.4 Thomson ve Rayleigh saçılması

Yüksek enerjili gama ışınları karşılaştıkları maddeyi genellikle geçebilmelerine rağmen; düşük enerjili gama ışınları maddeye çarptıklarında saçılma olayı oluşur. Madde ile gama ışını arasında iyonizasyona ve atomun uyarılmasına neden olmayan tek etkileşim saçılma olayıdır. Çünkü gama ışını atoma enerji transfer etmez. Saçılma olayına sebep olan gama ışınlarının enerjileri 10 keV'den daha azdır. Bu düşük enerjili gama ışınlarının dalga boyu ile etkileştikleri atomdan saçılan gama ışınının dalga boyu aynıdır (Şekil 1.8). Thomson ve Rayleigh olmak üzere iki saçılmadan bahsedilebilir.

Thomson saçılması, gama ışınının serbest haldeki bir elektronla elastik (esnek) saçılma yapması sonucu oluşur. Gama ışınının enerjisi elektronun durgun enerjisinden  $h\nu \ll m_e c^2$  küçük olduğu durumda Thomson saçılması gözlenir. Düşük enerjilerde Thomson saçılmasının tesir kesiti, ortamın atom numarası ile lineer olarak değişim gösterir.



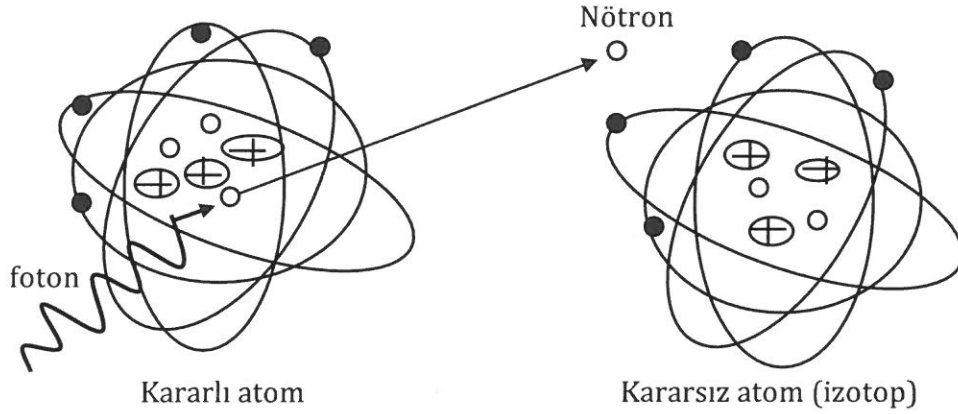
Şekil 1.8. Saçılma olayı sonucu dalga boyunun gösterimi

Rayleigh saçılması, Thomson saçılmasıyla aynıdır. Küçük momentum transferlerinde, atom içindeki bütün elektronlardan saçılan X-ışınlarının genlikleri koherent şekilde toplanır. Bu saçılma Rayleigh saçılması olarak tanımlanır. Koherent saçılma olarak anılmasının sebebi, gama ışınının atomla beraber şekilde hareket etmesidir. Rayleigh saçılmasının tesir kesiti  $Z^2$  ile orantılıdır ve enerjisi yaklaşık olarak 50 keV'den daha az olan gama ışınları için

fotoelektrik soğurmadan sonra baskın olan ikinci mekanizmadır. Rayleigh saçılmasının meydana gelmesi, yüksek atom numarasına sahip materyallerde ve düşük gama ışını enerjilerinde muhtemeldir.

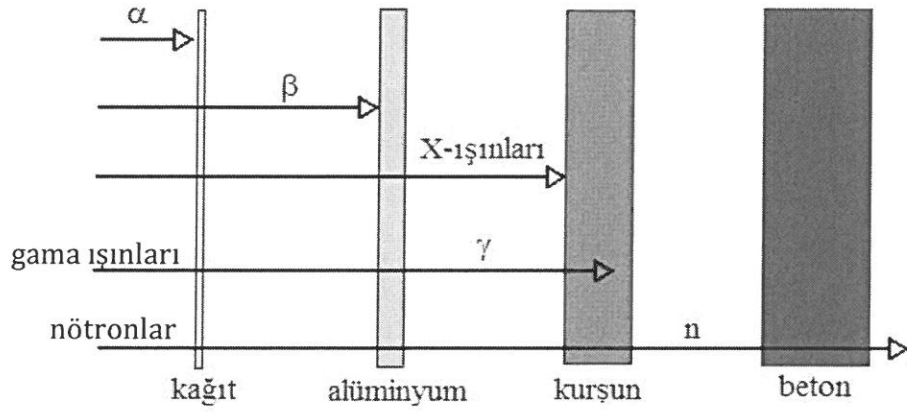
### 1.3.5 Fotoçözülme (Fotodisintegrasyon) olayı

Enerjileri birkaç MeV'i aşan ve genellikle 10 MeV'den büyük olan gama ışınları, hedef atomun çekirdeği ile etkileşime girerek, enerjileri çekirdek tarafından soğrulur. Soğrulma sonucu çekirdekten nötron, proton,  $\alpha$  parçacığı veya parçacık kümesinden herhangi biri olabilecek nükleer bir parçacık ortama salınır.



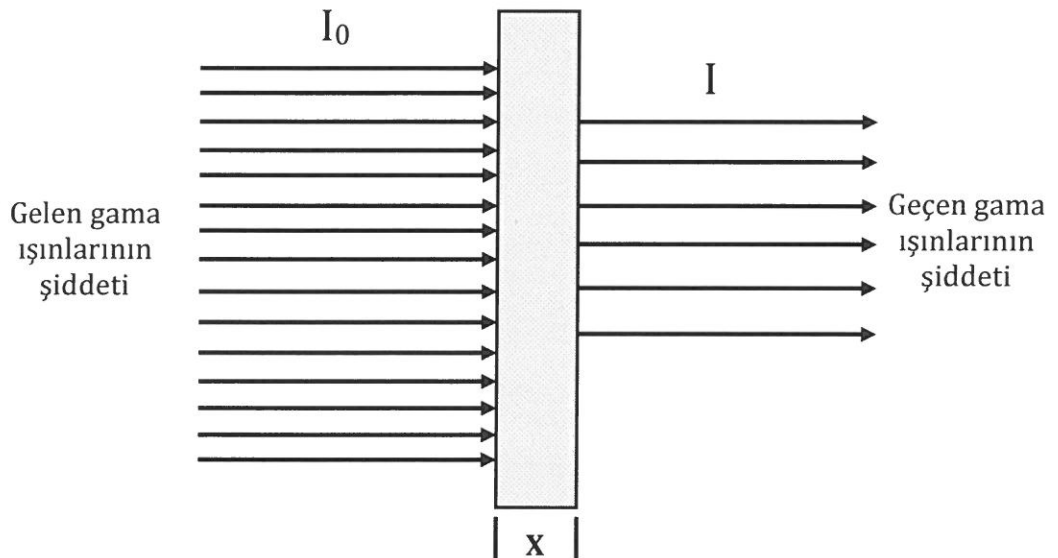
Şekil 1.9. Fotoçözülme (fotodisintegrasyon) olayı

Fotoçözülme olayı tanısal radyolojide pek öneme sahip değilken; foton radyoterapide büyük önemi vardır. Çünkü açığa çıkan parçacıkların (nötron, foton, proton, elektron veya  $\alpha$  parçacığı) kanserli hücre dışındaki sağlıklı hücrelere zarar verebileceği düşüncesiyle mutlaka ölçülmesi gerekir. Özellikle de madde içerisine giricilik kabiliyetleri kıyaslandığında (Şekil 1.10) en tehlikeli radyasyon türlerinden olan nötronların ve gama ışınlarının ölçümü önemlidir.



Şekil 1.10. Parçacıkların madde içindeki giriciliklerinin kıyaslanması

Radyoloji fiziğinde gama ışınlarının madde ile etkileşiminde yukarıda ifade edilen beş olay dikkate alınır. Ancak bu etkileşimlerden ilk üçü (fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu) elektronlara enerji aktarması ile sonuçlandığından oldukça önemli etkileşimlerdir. Bu etkileşimler gama ışınlarının iki önemli özelliğini vurgular. Birinci özellik, gama ışınlarının madde içerisinde yüklü parçacıklarla karşılaştırıldığında daha uzun mesafelere (penetrasyonu) nüfuz etmesidir. İkincisi ise belli bir kalınlıktaki malzemeyi geçince gama ışınlarının enerjilerinde beklenen azalmanın aksine, sadece şiddetinde bir azalmanın gerçekleşmesidir.



Şekil 1.11. Gelen radyasyon şiddetinin x kalınlığındaki engelle azaltılması



1909 yılında, Soddy ve Russell gama ışınının şiddetinin madde içerisinde geçerken kalınlığın fonksiyonu olarak eksponansiyel şekilde azaldığını (Şekil 1.11) keşfetmişlerdir. Literatürde bu yasa Beer-Lambert Yasası olarak adlandırılır. Bu denklem ile ifade edilirse;

$$\begin{aligned} dI &\propto -I dx \\ I &= I_0 e^{-\mu x} \end{aligned} \quad (1.5)$$

olur. Buradaki eksi işaret, şiddetin ışın demetinin madde içerisinde aldığı yol boyunca azaldığını gösterir. Denklemdaki  $I_0$  gelen fotonların şiddeti,  $x$  soğurucunun kalınlığı ve  $\mu$  lineer soğurma katsayısını temsil eder. Birimi  $\text{cm}^{-1}$  dir, başka bir ifadeyle toplam doğrusal zayıflatma veya soğurma katsayısı olarak adlandırılır ve maddenin atomlarıyla birim uzunluk başına etkileşme ihtimali olarak tanımlanır (Akkurt, vd., 2005; Akyıldırım, 2011). Yani etkileşmenin toplam tesir kesitini ifade eder. Makroskobik tesir kesiti olarak tanımlanan  $\Sigma = n\sigma$  ifadesi gama ışınları için yerini lineer zayıflama katsayısı

$$\mu = n\sigma \quad (1.6)$$

ifadesine bırakır.

Bir ortama giren gama radyasyonunun madde ile etkileşmesi, gama ışınlarının giriciliği ve yayınlanma özelliklerinin anlaşılması bakımından lineer zayıflama katsayısı önemli bir niceliktir.

#### 1.4 Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitleri

Nükleer çekirdeğin keşfinden yaklaşık 100 yıl geçmesine rağmen çekirdekle ilgili bilgiler hala net değildir (Akkurt, vd., 2014). Nükleer yapı hakkındaki bilgilerin önem teşkil eden kısmı; elektron, proton gibi parçacıkların hedeften saçılmasına dayalı saçılma ve tesir kesiti deneyleriyle incelenir. Saçılma teorisinin ve tesir kesitinin nükleer reaksiyon fiziğinde önemli yeri vardır.

#### 1.4.1 Tesir kesiti

Atom çekirdeği ile ilgili etkileşimler, kuantum mekaniksel yasaları ile ifade edilmektedir. Hedef çekirdeğe gelen parçacık, bileşik çekirdeğin kuantum enerji durumunda, izin verilen enerji durumlarında, yakalanabilir. Söz konusu yakalamayla, çekirdeğin ve gelen parçacığın enerjisi, açısal momentumu ve paritesi korunur. Nükleer reaksiyon modeline göre birbirlerine doğru hareket eden iki küre yalnız birbirlerine değerse bir reaksiyon gerçekleşir. Ancak, nükleer bir reaksiyonun enerjisi coulomb engeli (engelin altındaki enerjilerde reaksiyon olasılığı düşüktür) ile  $Q$  değerini aşmak için gereken enerjiden düşük ise nükleer reaksiyon oluşmaz. Bununla bağlantılı olarak nükleer reaksiyon için ihtiyaç duyulan enerji hedef malzemenin atom numarası arttıkça artar. Reaksiyon olasılığı da her iki kürenin yüzey alanları ile orantılıdır. Temel durum, nükleer reaksiyonlar hakkında reaksiyonun tesir kesitinin belirlenmesidir. Çünkü tesir kesiti, nükleer reaksiyon oluşumunun bağlı olasılığının bir ölçüsüdür ve genellikle uyarılma fonksiyonu olarak da adlandırılır.

$A(a,b)B$  şeklinde sembolize edilen bir reaksiyonda,  $N$  tane çekirdek sayısına sahip  $A$  hedef çekirdeği üzerine birim zamanda gelen parçacıkların akısı  $I_a$  olan bombardıman parçacıkları gönderildiğinde, reaksiyon sonucu oluşan parçacıkların birim zamandaki sayısı  $R_b$ ,  $I_a$  ve  $N$  ile orantılı olacaktır. Alan boyutunda olan bu orantı nükleer reaksiyon tesir kesiti olarak tanımlanır ve

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N} \quad (1.7)$$

şeklinde yazılır. Denklemdaki  $R_b$  çıkan parçacıkların sayısını,  $I_a$  birim zamanda gelen parçacıkların akısını ve  $N$  birim alandaki hedef çekirdek sayısını temsil eder. Sigma ( $\sigma$ ) ile ifade edilen tesir kesitinin birimi barn (b), daha küçük birimi de milibarndır (mb). Bu yolla tanımlanan  $\sigma$ , çekirdek başına alan boyutuna sahiptir. ( $1b=10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

Birim hacimdeki parçacık sayısı  $n$  ile  $\sigma$ 'nın çarpımı da makroskopik tesir kesiti ile adlandırılır ve  $\Sigma$  ile gösterilen bu ifade



$$\Sigma = n\sigma \quad (1.8)$$

dir. Şayet sadece soğurma ile ilgileniyorsak bu durumda  $\Sigma$  'nın yerine soğurma katsayısı terimini ( $\mu$ ) kullanabiliriz

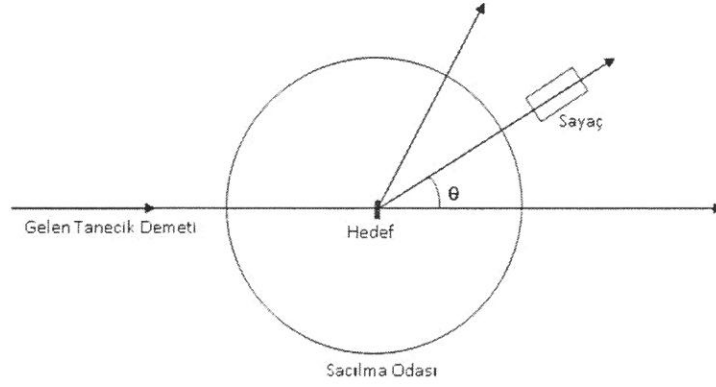
$$\mu = n\sigma \quad (1.9)$$

#### 1.4.2 Saçılma

Bugüne kadar ve bugün de atom, molekül veya temel parçacıkların yapısını öğrenmek için genellikle deneysel yöntemlere başvurulmuştur. Saçılma olarak bilinen bu yöntemle, atomik ve atom altı nesneler olarak değerlendirilen sabit bir hedef parçacık üzerine belirli bir enerjiye sahip proton, nötron, elektron gibi mermi parçacıklar gönderilir. Böylelikle saçılan parçacıkların yönü ve enerjileri gözlemlenir. Saçılma tesir kesiti, bir parçacığın başka bir parçacığın kuvvet alanı ile yaptığı çarpışmayı saçılma açısıyla ilişkilendirir. Gelen mermi parçacık ile hedef arasındaki etkileşme potansiyeli, saçılan parçacıkların açısal dağılımını ve enerjilerini etkileyen başlıca faktördür.

Saçılma için kullanılan yöntemler gelen parçacığın enerjisinin önceden verilmesi esasına dayanır. Sonsuzdan gelen durgun parçacık küçük bir bölgede hedefle etkileşmesinin ardından tekrar sonsuza gider. Veya parçacığı gözlemek için bir bölgeye yerleştirilen dedektöre gider. Başka bir ifadeyle parçacık potansiyel içinde bağlı durumda değildir ( $E>0$ ). Buradaki asıl amaç, etkileşme potansiyelinin saçılma sonucu parçacıkların açısal dağılımını nasıl etkilediğidir. Genellikle saçılma konusu yaklaşık yöntemler gerektirir (Karaoğlu, 1994).

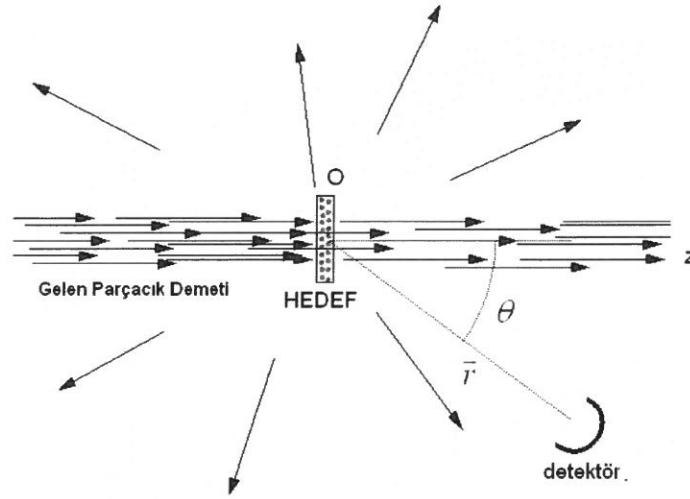
Saçılma deneyleri genellikle saçılma odası (Şekil 1.12) olarak adlandırılan dairesel kesitli bir kutu içine yerleştirilmiş hedefe gönderilen hızlandırılmış tanecik demetleri ile gerçekleşir. Reaksiyon sonucu oluşan parçacıklar farklı açılarda ve enerjilerde saçılırlar.



Şekil 1.12. Saçılma odasının şematik gösterimi (Kiremitçioğlu, 2011)

Bir kaynaktan çıkan  $m$  kütleli ve  $\vec{v}$  hızına sahip parçacıklardan oluşan bir parçacık demetinin  $+z$  yönünde ilerlemiş olduğunu ve kullanılan dedektörün kutupsal koordinatlarının  $\vec{r} (r, \theta, \varphi)$  olan bir noktaya yerleştirilmiş olduğunu varsayalım. Hiçbir kuvvet etkisinde bulunmayan parçacıklar serbest parçacıklardır ve bunlar bir düzlem dalga şeklinde temsil edilirler (Tanyel, 1994).

Demet üzerine hiçbir kuvvet etki etmezse, demet hiçbir sapmaya uğramadan yoluna devam eder düşüncesi hakimdir. Ancak gelen demet üzerine bir kuvvet etki ettiğinde; parçacıklar hedeften saçılıp dedektörlerle sayılır ve bu sayımın sonucu reaksiyonun meydana gelme olasılığını verir. Gelen parçacıkların saçılan parçacıkların sayımını etkilememesi için dedektörler oldukça uzağa yerleştirilir. Dedektörle ölçüm yapıldığı zaman sapan parçacıkların gözlenme olasılığı vardır. Bu ifade Şekil 1.13'de gösterilmiştir. Şekil 1.13'den, parçacık demetinin genişlemesiyle  $d\theta$  olasılığının küçüldüğü görülebilir.



Şekil 1.13. Bir potansiyel alanın saçılma olayına etkisi (Kansu, 2007)

#### 1.4.3 Diferansiyel tesir kesiti

Hedef çekirdek ile mermi parçacıklar etkileştiklerinde her zaman tek çeşit nükleer reaksiyon meydana getirmeleri gerekmez. Birden fazla nükleer reaksiyon oluşmuşsa eğer, her biri için tesir kesiti farklı olur. Bu özel tesir kesitlerine kısmi-tesir kesitleri denir. Toplam tesir kesitini bunları toplayarak bulabiliriz. Nükleer reaksiyon ya da saçılma meydana geldikten sonra dışarı gönderilen parçacıklar farklı açılarda farklı enerjilere sahip olurlar. Çoğu zaman da anizotropik bir dağılım gösterirler. Geliş doğrultusu ile  $\theta$  açısı yaparak saniyede  $d\Omega$  katı açısı içinde giden parçacıkların sayısının bilinmesi önemlidir. Bir hedef çekirdeğe  $(\theta, \phi)$  doğrultusunda yalnızca  $d\Omega$  katı açısına sahip bir dedektör yerleştirilirse, dedektör reaksiyondan yayınlanan tüm saçılan parçacıkları algılayamaz. Dedektör tarafından gözlenen, saçılan parçacıkların sadece küçük bir kesri mümkün olacaktır. Dolayısıyla dedektör tarafından ölçülen, tesir kesitinin küçük bir kesri  $d\sigma$  olacaktır.

Geliş doğrultusu ile  $\theta$  açısı yapan ve  $d\Omega$  katı açısına saniyede saçılan parçacıkların sayısı  $\theta$ 'nın fonksiyonu olarak nasıl değiştiği incelenmek ve hesaplanmak istenirse, açığa bağlı bir tesir kesiti tanımlamak gerekir. Birim katı açı başına tesir kesiti olarak tanımlanan bu  $d\sigma/d\Omega = \sigma(\theta)$  ifadesine diferansiyel tesir kesiti denir.

Diferansiyel tesir kesiti, her bir hedef parçacığın etkileşim sayısı olarak tanımlıdır. Nükleer reaksiyonların ürünlerinin açısal dağılımları hakkında bilgiye gereksinim duyulursa, diferansiyel tesir kesiti hesabı yapılır.

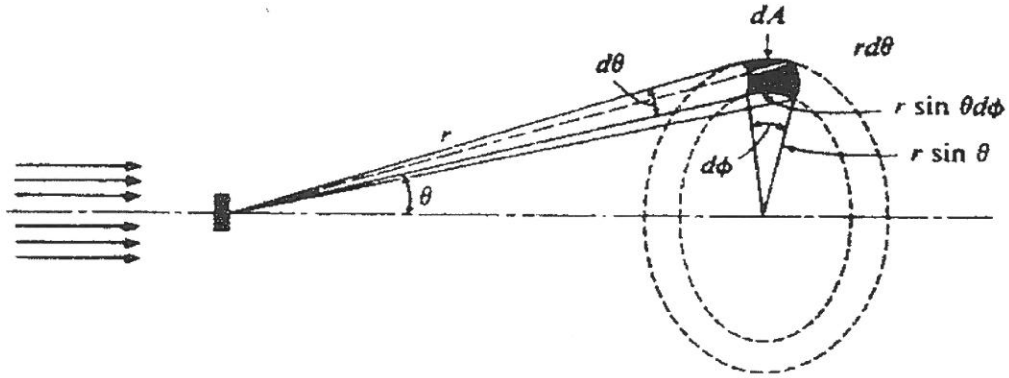
Genellikle her dedektör etkin bir kesit alanına sahiptir. Bu etki alanı  $dA$  ile ifade edilip;  $d\Omega$  katı açısının değeri Şekil 1.14'ün yardımıyla hesaplanabilir.  $d\Omega$  katı açısı

$$d\Omega = \frac{\text{alan}}{(\text{mesafe})^2} = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r \sin \theta d\phi)}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.10)$$

ifadesiyle verilir. Toplam katı açı

$$\Omega = \int_{\Omega} d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi \quad (1.11)$$

olur (Arya, 1999).



Şekil 1.14.  $d\Omega$  katı açısı içinde saçılan demeti gösteren reaksiyon geometrisi (Krane, 2006)

Katı açı kesri

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{A}{r^2} \frac{1}{4\pi} = \frac{A}{4\pi r^2} \quad (1.12)$$

ile ifade edilir.

Birim zamanda birim kesitten geçen parçacık sayısı akı olarak tanımlanır ve  $J$  ile gösterilir. Bu akıya karşılık olarak dedektörün kapsadığı  $d\Omega$  katı açısı içine birim zamanda saçılan parçacıkların sayısı  $dN$  ile ifade edildiğinde, diferansiyel tesir kesiti

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN}{J} \left( \frac{\text{barn}}{\text{steradyan}} \right) \quad (1.13)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Bu büyüklük genellikle  $(\theta, \phi)$  açılarının bir fonksiyonu olur. Diferansiyel tesir kesitinin tüm açılar üzerinden integrali alınarak toplam tesir kesiti

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.14)$$

ile elde edilebilir (Karaoğlu, 1994).

Ancak diferansiyel tesir kesiti  $\phi$ 'ye bağımlı değil ise,

$$\sigma_T = 2\pi \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta \quad (1.15)$$

elde edilir.

Diferansiyel tesir kesiti ölçümünün, enerjiye bağımlı kısmi tesir kesitinin bulunmasında faydası vardır. Bununla birlikte tesir kesitinin yöne bağımlılığının nükleer reaksiyonun cinsine göre olduğu gerçeğinin bulunmasında da faydası vardır. Bir nükleer kuvvet tipi kabullenilerek, farklı nükleer reaksiyonların açısal dağılımını ifade etmek mümkündür. Teori ile deney arasında uygunluk görülürse, kabullenilen nükleer model şeklinin doğruluk derecesi ispatlanmış olur.

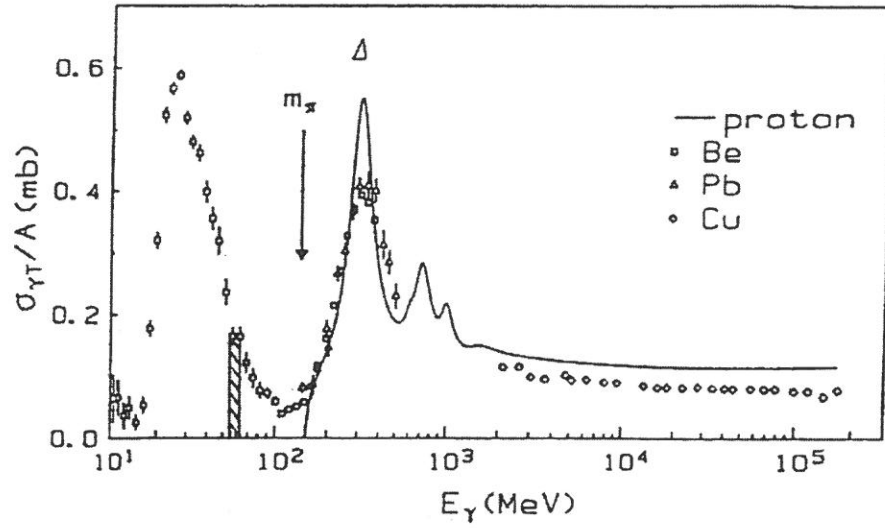
#### 1.4.4 Çift diferansiyel tesir kesiti

Nükleer fizik uygulamalarının pek çoğunda, çıkan parçacığın yalnızca belirli açıda yayınlanma olasılığı ile ilgilenilmez. Nükleer reaksiyon sonucu elde edilen ürün çekirdeğin belirli enerjisine karşılık Şekil 1.14'de de görüldüğü gibi belirli açılarda yayınlanma olasılığı ile de ilgilenilir. Şekil 1.14'de konumlandırılan dedektör,  $\Omega(\theta, \phi)$  etrafında  $d\Omega$  katı açısı içindeki tüm parçacıkları sayar. Diferansiyel tesir kesiti kavramındaki katı açı ile ilişkilendirilen tesir kesiti ölçümleri, enerji analizinin de eklenmesiyle birlikte yerini birim katı açı ve birim enerji aralığı başına sayım oranı ve başlangıç akısının normalizesi olan katlı diferansiyel tesir kesiti (double differential cross section-DDX) sonuçlarına bırakır.

Sonuçta çıkan parçacık  $d\Omega$  katı açısında ve  $dE$  enerji aralığında gözlenme olasılığına sahiptir. Bu olasılık bize katlı diferansiyel tesir kesiti (DDX) denilen  $d^2\sigma / dEd\Omega$  niceliğini verir.

#### 1.5 Fotonükleer Fizik

Tarihte, ilk fotonükleer reaksiyon çalışmaları Chadwick ve Goldhaber'in toryum kaynağından yayılan  $\gamma$  ışınları ile döteronun fotoçözünme üzerindeki deneyi ile yerini alır (Akkurt, 1998). Fotonükleer reaksiyonların elektromanyetik özellikleri iyi bilindiğinden; nükleer çalışmalar temelinde diğer reaksiyonlara kıyasla avantajlıdır. Çekirdek ile foton etkileşimi, fotonların dalga boyunun değişimi sebebiyle enerjiye bağlıdır. Bu durum çeşitli çekirdekler için Şekil 1.15'de gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Nükleon başına toplam fotoabsorbsiyon tesir kesiti (Ahrens, 1985; Akkurt, 1998)

10-40 MeV arasındaki enerji bölgesinde, toplam foton absorbsiyon tesir kesiti geniş bir pik gösterir. Bu bölgede (GDR), fotonun dalga boyu çekirdeğin boyutlarına benzer. Bu yüzden foton, tek nükleonlardan daha geniş bir etkileşimle, çekirdekle etkileşir. Bu foton enerji aralığında, fotondan hedef çekirdeğe momentum transferi nispeten küçük olduğu için; fotouyarılma bir elektrik dipol karakteri (E1) baskısı altındadır (Akkurt, 1998).

40-140 MeV bölgesi orta enerji bölgesi (QD) olarak adlandırılır. Foton enerjisi daha yüksek olduğu için, foton dalga-genişliği giant rezonans bölgesinden daha küçüktür. Bu bölgede, toplam absorbsiyon tesir kesitinin geniş bir kısmı, uyumlu nötron-proton çifti ile fotonun absorbsiyonu yoluyla,  $(\gamma, pn)$  reaksiyonu sonucunda oluşur. Bu sebeple bu bölge bazen sanki-döteron olarak adlandırılır. Foton tek bir nükleonla veya nükleonlar arasındaki değiştirilmiş sanal bir mezon ile etkileşebilir (Akkurt, 1998).

Foton enerji aralığının 140 MeV'den büyük olduğu bölge ise nükleon rezonans bölgesi olarak adlandırılır (Akkurt, 1998).

## 1.6 Hızlandırıcı Teknolojisi

Maddenin yapısını anlamak fiziğin en önemli amaçlarından olduğu için maddenin en küçük parçalarına bölünmesi veya maddenin derinliklerine

inilmesi gereklidir. Bu ise bir cismin başka bir cisimle çarpışmasıyla mümkündür. Çarpışma işlemi için parçacık hızlandırıcıları kullanılmaktadır. Hızlandırıcılar tarafından ivmelendirilen yüksek enerjili parçacık, laboratuvar sisteminde durmakta olan hedef parçacığa çarptırılır ve saçılan parçacıklar dedektörler yardımıyla gözlenerek hedef parçacık hakkında bilgi sahibi olunabilir. Parçacıkların hızlandırılması ve çarpıştırılması ile maddenin yapısı ve temel yapıtaşları, evrenin yapısıyla birlikte dört temel kuvvet, bu kuvvetler arasındaki etkileşimler hakkında bilgi edinilir. 21. yüzyılda gelişen teknolojilerin üretilmesine ve yeni keşiflerin, araştırmaların yapılmasına katkı sağlayan hızlandırıcılar, ilk kez Rutherford'un 20. yüzyıl başlarında alfa parçacıklarının altın çekirdeklerine doğru yönlendirilmesi deneyinde olduğu gibi, hedefin veya çekirdeğin içyapısıyla ilgili ipuçları verirler. Bu hızlandırıcılar, elektron, pozitron, proton, anti-proton gibi yüklü parçacık demetlerinin belirli amaç dahilinde belirlenen bir enerjiye ulaşmaya kadar hızlandırılmasını sağlayan aygıtlardır (TAEK, 2014). Yüklü parçacıkları yüksek enerjiye (MeV mertebesinde daha yüksek enerji) çıkarmak için ve gerek duyulan hızlandırılmış parçacığı doğal yollardan veya laboratuvarlarda elde etmenin mümkün olmadığı zamanlarda hızlandırıcılara gereksinim duyulur. Hızlandırma işlemi, parçacıkların elektrik alan etkisinde kalarak boyuna ivmelendirilmeleri ile mümkündür. Yörüngede kalma durumları ise manyetik alan ile sağlanır. Temel parçacık fiziği başta olmak üzere nükleer fizik ve deneysel yüksek enerji fiziğinde araştırmalar yapmak için kullanılan parçacık hızlandırıcılarında, parçacıkların çarpıştırılmadan önceki hızları ışık hızına kadar çıkarılır.

Hızlandırıcı teknolojisindeki gelişmeler Rutherford'un 1920'de verdiği bir konferansta, parçacık hızlandırıcılarının geliştirilmesi gerektiğini önermesiyle başlamıştır. Bu öneriyi sunmasındaki sebep, nükleer fizik araştırmalarında ve atom çekirdeğinin anlaşılmasında daha ileri gelişmeler için çok daha yüksek enerjili parçacıklara ihtiyaç duyulmasıdır. Bunu takiben Wideroe 1928'de lineer bir hızlandırıcı yapmıştır. Cockcroft ve Walton 1932'de 300 keV'lik proton hızlandırıcısı geliştirmişlerdir. 1952'de Livingston ve Snyder tarafından kuvvetli odaklama prensibinin kabul edilmesiyle yüksek hızlandırıcı enerjisine doğru geçiş başlamıştır. 1960'lı yılların ilk zamanlarında ilk elektron depolama



halkaları çalıştırılmıştır. CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) ve Brookhaven laboratuvarlarında 28 ve 33 GeV'lik iki büyük proton sinkrotronu kurulmuştur. Bu laboratuvarlarda yapılan başarılı deneylerle, CERN ve Brookhaven yüksek enerji parçacık fiziğinde yeni parçacıkların keşfinde ve anlaşılmasında büyük gelişmelerin gerçekleştiği kuruluşlar haline gelmiştir.

Hızlandırıcı teknolojisindeki tarihsel gelişime paralel olarak hızlandırıcı teknolojisinde de önemli gelişmeler gerçekleşmiştir. Maksimum enerji kapasitesinin artması, demet akımının artırılması ve hızlandırılan atomik parçacıkların çeşidinin artması hızlandırıcılardaki gelişmeler kapsamındadır.

Her geçen gün kullanım alanına bir yenisini ekleyen parçacık hızlandırıcılarının başta temel parçacık fiziği ve nükleer fizik deneyleri olmak üzere, nötron kaynağı, sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri, radyoterapi, nükleer tıp, malzeme bilimi, yarı iletkenler, gıda mühendisliği, kimya, biyoloji, jeoloji, arkeoloji, savunma sanayi, maden sanayi, enerji üretimi ve daha yaklaşık 300 alt alanda kullanımı mevcuttur (Yavaş, 2011).

Nükleer fizik ve parçacık fiziği araştırmalarında kullanılmak amacıyla hızlandırıcılar; parçacıkların hızlandırılma metotlarına ve yörüngelerine göre doğrusal (lineer) ve dairesel olmak üzere iki grupta incelenir. Dairesel hızlandırıcıların hızlandırma işlemi için kullanılan alan türlerine ve şekillerine bağlı olarak betatron, mikrotron, siklotron ve sinkrotron çeşitleri mevcuttur.

Doğrusal (lineer) hızlandırıcılarda, parçacıklar hızlandırıcı yapıyı bir kez geçerler. Doğrusal (lineer) hızlandırıcıların çalışma prensibi, salınımlı alanlara ve sürüklenme tüplerine dayanır. Dairesel hızlandırıcılarda parçacıklar hızlandırıcı yapıyı periyodik olarak dolanır ve her defasında enerji alarak kapalı yörüngeler izlerler (Arıkan, 2010).

Dairesel hızlandırıcılarda ise yüklü parçacıklar radyo frekans (RF) kovukları yardımıyla hızlandırılırken; manyetik alanlar aracılığıyla da dairesel yörüngelerde tutulurlar. Parçacıkların yolları üzerinde atom veya moleküllere rastlayıp çarparak hız kaybetmemeleri için, hızlandırma işlemi, ek bir manyetik

alan uygulamak suretiyle dairesel yörüngeler üzerinde döndürülerek gerçekleştirilir.

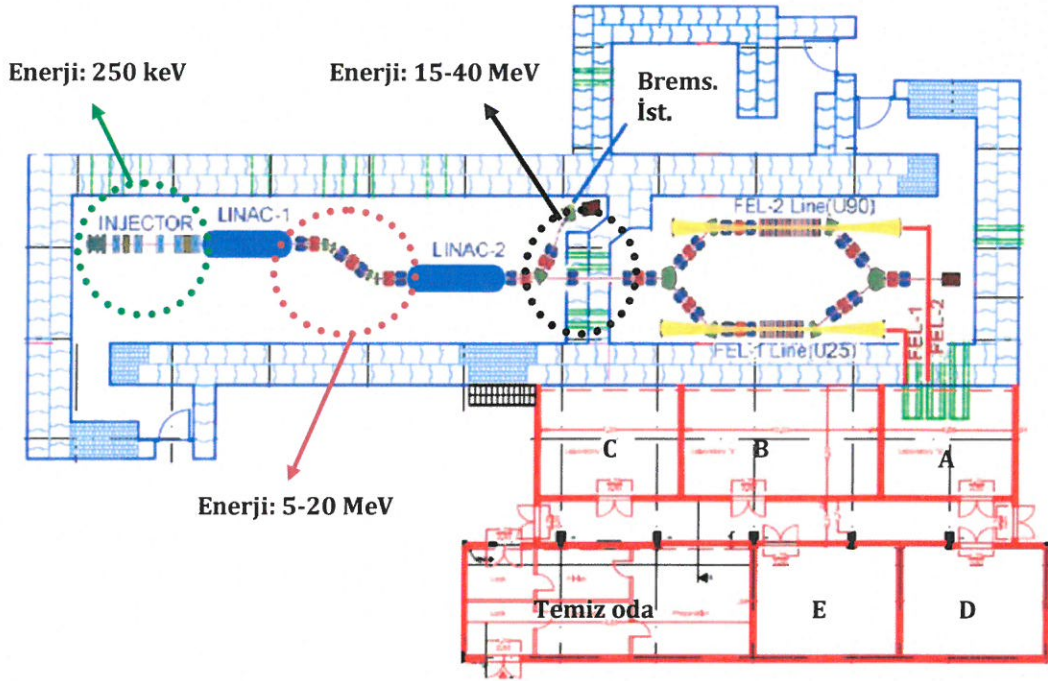
Fizikçiler çok yüksek enerjilere ulaşmak için dairesel hızlandırıcıları tercih etmektedirler. Çünkü doğrusal hızlandırıcılarda çok yüksek enerjilere çıkabilmek için çok uzun hızlandırma bölgesine ihtiyaç duyulur. Ancak doğrusal hızlandırıcılar, dairesel hızlandırıcılara göre daha kolay mühendislik gerektirir ve daha düşük maliyetlidir.

### **1.7 Türk Hızlandırıcı Merkezi ve Bremsstrahlung Merkezi**

Medikal linac ve küçük ölçekli siklotronlar, teşhis ve tedavi amaçlı kullanılmak üzere ülkemizde mevcuttur. Ancak parçacık hızlandırıcılarının Ar-Ge (Araştırma ve Geliştirme) amacıyla kullanıldığı tesis ülkemizde mevcut değildir. Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde yürütülen DPT (Devlet Planlama Teşkilatı)-YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Projeler) projesi ile Türk Hızlandırıcı Merkezi adıyla ülkemizde hızlandırıcıya dayalı Ar-Ge amaçlı ilk tesisin kurulumu planlanmıştır. İlk olarak 1997 yılında fizibilite çalışmaları amaçlanmıştır. 2006 yılında ise YUUP projesi 10 üniversiteden yaklaşık 100 bilim insanı ile başlamıştır. Şuan itibari ile proje ortağı üniversite sayısı 12 (Ankara, Gazi, Boğaziçi, Doğu, İstanbul, Dumlupınar, Uludağ, Erciyes, Niğde, Süleyman Demirel, Osmangazi Üniversiteleri ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü) olmuştur. Türk Hızlandırıcı Merkezinin amaçları arasında elektron hızlandırıcısına dayalı IR SEL ve frenleme ışınımı (Bremsstrahlung) Ar-Ge amaçlı kullanılacak ilk tesisi hayata geçirmek, dünyanın önde gelen hızlandırıcı merkezleri ile işbirliği geliştirmek ve uluslar arası danışma komiteleri ile çalışmak yer almaktadır. Bununla birlikte bu proje, ülkemizde deneysel parçacık fiziği, sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri, deneysel nükleer fizik çalışmalarını mümkün kılacaktır. Bu projenin başka bir fayda sağlayan yanı da hızlandırıcı ve dedektör teknolojileri alanında uzman yetiştirmek için ülkemizde ilk Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü'nün kurulumu olmuştur.

Ülkemizi temel ve uygulamalı bilimlerde hızlandırıcıya dayalı araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılabileceği Türk Hızlandırıcı Merkezi projesine ait ilk parçacık hızlandırıcı tesisi TARLA (Turkish Accelerator and Radiation

Laboratory at Ankara) bina şeması Şekil 1.16'da gösterilmektedir. Bu proje ile amaçlanan Ülkemizin hızlandırıcı teknolojileri ile tanışmasını sağlamak ve böylelikle hızlandırıcılara dayalı Ar-Ge faaliyetlerinin yürütülebilir hale getirmektir. Ayrıca bu proje ile 4 hedefi olan bir ulusal hızlandırıcı merkezi önerilmiştir. Bu 4 ana hedef; elektron ve pozitron demetlerinin çarpıştırılması ile parçacık fabrikasında parçacık fiziği araştırmaları yapmak, pozitron sinkrotronuna dayalı sinkrotron ışınımı üretmek ve kullanmak, elektron lineer hızlandırıcılarına dayalı serbest elektron lazeri üretmek ve kullanmak, proton hızlandırıcısına dayalı araştırmalar yapmaktır.



Şekil 1.16. TARLA donanım yerleşim planı (Yavaş, 2013)

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında belirlenmiş teknik komiteden biri olan bremsstrahlung teknik komitesi, Türk Hızlandırıcı Merkezi test laboratuvarları Ankara'nın Gölbaşı ilçesinde Ankara Üniversitesi'ne ait olan arazi üzerindeki yapım aşamasındadır.

Bremsstrahlung deney bölgesinin bina içi yerleşimi, Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin bina içi planlamasında, SEL üretim alanına paralel olarak

planlanmıştır. Bunun sebebi, bremsstrahlung deney hattında yapılacak olan çalışmalar için gerekli elektron demetlerinin linac'tan döndürülerek bremsstrahlung deney alanına yönlendirilecek olmasıdır. Bu durum şekil 1.16'da gösterilmektedir.

Linac'lardan 20+20 MeV enerjili elektron demeti ayrılması ve bremsstrahlung deney bölgesine gönderilmesi önemlidir. Elektronların yn değişimleri magnetler tarafından sağlanır. Dipol magnetler ile elektron demetinin yönü bremsstrahlung deney bölgesine yönlendirilir. Ve kuadropol magnetler ile elektron demet radyatöre odaklanır. Bu şekilde radyatör üzerine gönderilen elektron demeti ile bremsstrahlung fotonları elde edilir (Akkurt vd, 2010).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nükleer reaksiyonlar ve reaksiyon tesir kesitlerinin çalışılmasının önemi, çekirdek hakkında büyüklük, yük dağılımı, nükleer kuvvetlerin varlığı gibi birçok bilginin elde edilmesinden ileri gelmektedir.

Tel (2000), yaptığı doktora çalışmasında denge ve denge öncesi modellerini kullanarak uyarılma fonksiyonlarını ve diferansiyel tesir kesitlerini incelemiştir. Çalışmasında direk ve bileşik nükleer reaksiyonları sınıflandırmış; reaksiyon tesir kesitlerini de denge ve denge öncesi modeller ile hesaplamıştır. Denge hesaplamaları için Weisskopf-Ewing ve Hauser-Feshbach teorilerini kullanmıştır. Denge öncesi hesaplamalar, eksiton model, Kalbach sistematığı ve geometri bağımlı hibrid model ile yapılmıştır. Denge ve denge öncesi reaksiyon modellerinden hesaplanan uyarılma fonksiyonları ve parçacık yayınlanma spektrumları deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın temelini oluşturan fotonükleer reaksiyonların dışında, TALYS bilgisayar kodunu kullanarak yapılan farklı nükleer reaksiyon çalışmalarından son zamanlara ait olanları aşağıda belirtilmiştir.

Aydın vd. (2013),  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54,56}\text{Fe}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  hedef çekirdeklerine 62 MeV enerjiyle gelen protonlarda çift diferansiyel döteron emisyon tesir kesitlerinin hesaplamalarını TALYS 1.2 kodunu kullanarak yapmışlardır.

Sarpün vd. (2014), bazı ağır çekirdekler için ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ) seviye yoğunluk modelleri ve fisyon bariyer modellerinin her ikisini de içeren alfa gönderimli fisyon reaksiyonlarını TALYS 1.2 kodunu kullanarak hesaplamışlardır.

Aydın vd. (2014),  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54,56}\text{Fe}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  hedef çekirdeklerine 62 MeV enerjiyle gelen protonlarda çift diferansiyel triton emisyon tesir kesitlerinin hesaplamalarını TALYS 1.2 kodunu kullanarak yapmışlardır.

Genelde nükleer reaksiyonlarda veriler değerlendirilirken bibliyografik derleme ve deneysel veri derleme aşamaları dikkate alınmaktadır. Bu aşamalar, teorik

nükleer modelleme tabanında değerlendirilmeli ve birlikte takip edilmelidir. Fotonükleer verinin derleme ve değerlendirme durumu şöyle incelenebilir.

Deneysel olarak, fotonükleer reaksiyonların en yoğun olarak çalışıldığı ve verilerinin derlendiği iki en önemli laboratuvar LLNL Livermore (USA), CEA Saclay (Fransa) 'dır. Önemli olarak sayılan bu laboratuvarlardan başka MSU Moscow (Rusya), KAERI (Kore), JAERI (Japonya) laboratuvar ve araştırma merkezleri nükleer veri derleme ve değerlendirme bakımından önemli kuruluşlardır. Literatürde EXFOR haricinde ENDF, CINDA, JENDL, OECD, JEFF vb. pek çok bilgisayar tabanlı kütüphane bulunmaktadır. Bu kütüphanelerden EXFOR, CINDA, OECD gibi kütüphaneler de hem deneysel veri hem de kendi bünyelerinde teorik hesaplanmış verileri depolayan kütüphanelerin linkleri mevcuttur. JENDL, ENDF, TENDL gibi kütüphaneler sadece teorik olarak hesaplanmış sonuçları sergilerler. Bu kütüphaneler arasında TENDL kütüphanesi, TALYS, nükleer kod programının teorik hesaplamalarının depolandığı lokal bir kütüphanedir. Nükleer reaksiyon verilerinin güncelliği açısından, deneysel veriler temelinde en sık kullanılan ve sürekli güncelleme yapılan EXFOR ve teorik hesaplama verileri olarak da ENDF sürümleri öne çıkmaktadır. Yapılan hesaplamaların verilerinin depolandığı bu kütüphaneler dışında deneysel olarak değerlendirilmemiş nükleer verileri bünyesinde barındıran ve genellikle nükleer yapı ve bozunma verilerini içeren XUNDL kütüphanesi de bulunmaktadır.

EXFOR (McLane, 1997), dünya çapındaki Nükleer Reaksiyon Veri Merkezleri tarafından sürdürülen deneysel nükleer reaksiyon verisinin bilgisayarla işlenmiş bir kütüphanesidir. Nükleer Reaksiyon Veri Merkezlerinden kullanıcılara kadar, ağ üyeleri arasında genel olarak okunabilir bilgisayar formatında aktarımı olanaklı kılar. Kaynakça olarak bilgi ve açıklamalar dahilinde, nükleer reaksiyon veri tablolarında sayısal büyük bir çeşitlilik için tasarlanmıştır.  $^2\text{H}$ 'den  $^{237}\text{Np}$ 'ye kütle numarası bölgesindeki çekirdeklerde bazı fotonükleer reaksiyon tesir kesitleri için 1500'e yakın veri dizisi mevcuttur (IAEA, 2000). Bunun yanında, fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinin grafikleri ve GDR atlasından değişkenlerin bilgileri CDFE (Moskova) tarafından işletilen web sitesinde bulunabilir.



Tam bir nükleer veri için geçmişteki çalışmaların bir kısmı GDR ölçümleri esasına dayanmaktadır. Varlamov vd. (1999), tarafından hazırlanan “Atlas of Giant Dipole Resonance” adlı çalışma GDR atlası olarak son dönemlerde hazırlanmış bir çalışmadır.

Lepretre vd. (1971),  $A=90$  kütle bölgesinde (Rb, Sr,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  ve  $^{93}\text{Nb}$  çekirdekleri için) büyük dipol durumlarını monokromatik bir foton demeti kullanarak  $(\gamma, n) + (\gamma, np)$  ve  $(\gamma, 2n)$  reaksiyonlarıyla incelemişlerdir.

Beil vd. (1971), tarafından  $N=82$  çekirdeklerinde GDR (Giant Dipole Resonance) incelemesi yapılmıştır. Bir monokromatik foton demeti kullanarak,  $^{56}\text{Ba}$ ,  $^{139}_{57}\text{La}$ ,  $^{58}\text{Ce}$ ,  $^{141}_{59}\text{Pr}$ ,  $^{60}\text{Nd}$  elementleri için toplam fotonötron tesir kesitleri  $(\gamma, n) + (\gamma, pn)$  ve  $(\gamma, 2n)$  kısmi fotonötron tesir kesitlerinin eşzamanlıca ve doğrudan ölçümleriyle elde edilmiştir. Burada verilen sonuçlar, Saclay’da 60 MeV lineer elektron hızlandırıcısında foton-monokromatör ile elde edilmiştir.

Carlos vd. (1976),  $64 \leq A \leq 86$  kütle bölgesindeki çekirdeklerin büyük dipol rezonansına (GDR) fotonötron katkısını baz alan bir çalışma yapmışlardır.  $^{64}\text{Zn}$ , Ga,  $^{70,72,74,76}\text{Ge}$ ,  $^{75}\text{As}$  ve  $^{76,78,80,82}\text{Se}$  çekirdekleri için  $8 \leq E \leq 30$  MeV foton enerji aralığında yüksek etkili nötron dedekte sistemi ve monokromatik foton demeti ile  $(\gamma, n) + (\gamma, pn)$  ve  $(\gamma, 2n)$  kısmi fotonötron tesir kesitlerini ölçmüşlerdir.

Fotonükleer reaksiyonlar açısından bakıldığında IAEA bünyesinde hazırlanmış olan “Handbook on Photonuclear Data for Applications Cross Sections and Spectra” en belirgin ve kapsamlı bir derleme çalışmasıdır.

Cohen ve Stephens (1959), tarafından karbonun gama ışın aktivasyonu üzerine çalışma yapılmıştır. Yüksek etkili dedektör kullanarak 20.2-21 MeV foton enerji aralığında  $\text{C}^{12}(\gamma, n)\text{C}^{11}$  reaksiyonu ile karbonun direkt (doğrudan) fotoaktivasyonu ölçülmüştür.

Emma vd. (1960),  $^{12}\text{C}$  de 30 MeV bir bremsstrahlung demeti ile fotonötronların açısal dağılımını ve enerji spektrasını  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  ve  $150^\circ$  lik  $\theta$  açılarında ölçmüşlerdir. Spektra 21.4, 22.2, 22.9, 23.6, 24.3, 24.8, 25.6 MeV seviyelerinde iyi bir yapı sergiler. Seviyeler ile bu uyumun pek çoğu  $\text{C}^{12}(\gamma, p)$  ve  $\text{C}^{12}(\gamma, 3\alpha)$

reaksiyonlarında bulunmuştur. Açısal dağılım,  $3 < E_n < 7$  MeV enerjili bütün nötronlar için  $1 + 1,5 \sin^2 \theta$  biçiminde gözlenmiştir. Bu dağılımın Wilkinson'un bağımsız parçacık modeline göre uyumlu olduğu sanılır.

Roalsvig vd. (1961),  $C^{12}$  ve  $O^{16}$  da fotonötron reaksiyonları üzerine bir çalışma yapmışlardır.  $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$  ve  $O^{16}(\gamma, n)O^{15}$  reaksiyonlarının mutlak alanları Saskatchewan Üniversitesinin 24 MeV betatronu kullanılarak 22 MeV maksimum bremsstrahlung enerjisinde belirlenmiştir.

Shoda (1961), betatronda ince alüminyum bir hedeften polarize olmuş 20,5 MeV bremsstrahlung ile  $^{16}O(\gamma, p)$  reaksiyonunu incelemiştir. Proton enerji spektrumu 1,1 MeV lik proton enerjisindeki pik haricinde, önceki sonuçlar ile uyumlu bir yapı gösterir.

Del Bianco ve Stephens (1962), tarafından 20,1 – 21,2 MeV aralığında  $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$  ve  $F^{19}(\gamma, n)F^{18}$  reaksiyonları,  $T^3(p, \gamma)He^4$  reaksiyonundan monokromatik gama ışınları kullanılarak ölçülmüştür. Gama ışınları 3.in yarıçapında, 4.in uzunluğunda sodyum iyodin kristali tarafından gözlenmiştir.

Dushkov vd. (1965), Zr dan fotoprotonları incelemişlerdir. 22, 25 ve 34 MeV lik maksimum enerjilerde bremsstrahlung tarafından üretilmiş fotoprotonların enerji, açısal dağılımları ve  $(\gamma, p)$  tesir kesiti ölçümleri betatronda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylı kabuk-model hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır.

Wyckoff vd. (1965), tarafından atom sayıları düşük olan elementler için toplam fotonükleer tesir kesitlerinin incelemesi gerçekleştirilmiştir. Toplam fotonükleer tesir kesitleri, 90 MeV lik maksimum enerjiyle sabitlenmiş bir x-ray spektrumu ve bir ışıltama çift spektrometresi kullanılarak bir zayıflatma deneyinde ölçülmüştür. Berilyum, karbon, oksijen, sodyum, magnezyum, alüminyum, silikon, sülfür, kalsiyum, nikel, kobalt, bakır ve gümüş için X-ray foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak tesir kesitleri, 15-30 MeV lik X-ray enerjilerinde detaylı yapıda gösterilmiştir.



Verbinski ve Courtney (1965),  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  için tesir kesitlerini ve fotonötron spektrasını incelemişlerdir. İki yarı-konjuge çekirdek  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  için zaman-tamamlanmış (time-integrated) mutlak foton akısının belirlenmesiyle bağlantılı salınan nötronların spektral yoğunluğunun ölçümüyle kısmi ( $\gamma, n$ ) tesir kesitleri ölçülmüştür. Ölçümler lineer hızlandırıcıda bremsstrahlung hedef kaynağı ve time-of-flight (TOF) metoduyla yapılmıştır.

Lochstet ve Stephens (1966),  $21 < E_\gamma < 26,7$  MeV aralığında  $T(p, \gamma)\text{He}$ 'dan monokromatik gama ışınlarının yöntemiyle  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  fotonükleer tesir kesitini geliştirilmiş düzen ile büyük rezonans bölgesinde ölçmüşlerdir. Reaksiyon, pozitronlardan gama ışın yok etmenin uyumlarını kullanarak  $^{11}\text{C}$  in pozitron radyoaktivitesinin yöntemiyle dedekte edilmiştir. Sonuçta tesir kesiti % 10 luk hassasiyetle belirlenmiştir. Nötron time-of-flight sonuçları ile verilerin karşılaştırması bazı uyarılmış durum geçişlerini önermiştir.

Fultz vd. (1966),  $\text{C}^{12}$  ve  $\text{Al}^{27}$  için fotonötron tesir kesitlerini, 37 MeV üzerinde ve uçuşta pozitronların yok etme metoduyla elde edilen monokromatik fotonları kullanarak ölçmüşlerdir. Yeni seviyeler, fotonötron tesir kesitinin ölçümü boyunca gözlenirken; karbon için 22.0, 23.3, 25.5, 27.1, 28.3, 30.3, 30.5, 35.2 MeV değerinde rezonanslar gözlenmiştir. Gözlenmiş bütün seviyelerin ilgili dipol kuvvetleri ölçülmüştür ve teoriksel öngörüler ile karşılaştırılmıştır. Nötron enerjilerindeki ölçümler sonucunda  $\text{C}^{12}$  nin çoğunlukla taban-durum geçişlerinde nötronları saldıgı gözlenmiştir.

Bazhanov vd. (1966),  $\text{C}^{12}$  için fotonükleer çalışma yapmışlardır. Çalışma sinkrontronda boron trifluoride nötron dedektörü ile gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon,  $\text{O}^{16}(\gamma, p)\text{N}^{15}$  reaksiyonunun maksimum konumu ve  $\text{Bi}^{209}$ ,  $\text{Co}^{59}$ ,  $\text{C}^{12}$  çekirdekleri için ( $\gamma, n$ ) reaksiyonunun eşiği kullanılarak yapılmıştır. Alan eğrisi eşik değerinden 26,5 MeV ve 52,5 MeV e kadar enerji aralığında ölçülmüştür. Tesir kesitleri ters matrix metodu (Penfold-Leiss) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu deney sonucunda elde edilen veriler önceki yapılmış deneysel veriler ile ve teoriksel hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır ve birbirleriyle uygun oldukları görülmüştür.

Berman vd. (1967),  $Zr^{90}$ ,  $Zr^{91}$ ,  $Zr^{92}$ ,  $Zr^{94}$  ve  $Y^{89}$  için fotonötron tesir kesitlerini incelemişlerdir. Uçuşta pozitron yok etme metoduyla monoenerjik foton demeti ile 30 MeV üzeri foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak Livermore elektron lineer hızlandırıcısında ölçülmüştür. Foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak her zirkonyum izotopu için ortalama nötron enerjisi belirlenmiştir. Ortalama nötron enerjisi tesir kesiti verileriyle eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Ayrıca  $Y^{87}$  ve  $Zr^{88}$  in kütleleri,  $Y^{89}$  ve  $Zr^{90}$  nın  $(\gamma, 2n)$  eşiklerinden belirlenmiştir.

Bezic vd. (1969), büyük rezonans bölgesinde  $^{12}C$ ,  $^{14}N$ ,  $^{16}O$  ve  $^{19}F$  için toplam fotonükleer tesir kesitlerini deneysel olarak incelemişlerdir. 9-31 MeV enerji bölgesinde gama ışınlarının toplam absorpsiyonunu Compton spektrometresiyle ölçmüşlerdir.

Gabriel vd. (1969), yüksek enerjilerde ( $40 \leq E_\gamma \leq 350$  MeV)  $A \geq 12$  çekirdekleri için fotonükleer etkileşimleri hesaplamışlardır. Foton ile çekirdeğin ilk etkileşimlerinin sonuçları Levinger'in quasideuteron modelinden elde edilmiştir. Fotonükleon-üretim spektrası quasideuteron model kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar Monte Carlo metotları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar için  $^{12}C$ ,  $^{27}Al$ ,  $^{63}Cu$ ,  $^{118}Sn$ ,  $^{181}Ta$  ve  $^{207}Pb$  elementleri seçilmiştir. Hesaplamalar deneysel verilere normalize edilmiştir. Hesaplanan nötron enerji spektrasında istatistiksel hatalar yaklaşık olarak  $\pm \% 12$  olmakla birlikte deneysel veriler ile iyi uyum  $^{12}C$  ve  $^{27}Al$  için gözlenirken  $^{63}Cu$  için bunu söylemek mümkün değildir.

Antropov vd. (1969),  $^{90}Zr$  ve  $^{91}Zr$  in fotonötron tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. Ölçümler 30 MeV betatron kullanılarak boron trifluoride nötron dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.  $^{90}Zr$  için  $(\gamma, np)$  reaksiyonunun eşiği 19,8 MeV e eşit olarak bulunmuştur.

Ishkhanov vd. (1970), 16-25 MeV uyarma enerjilerinde  $^{16}O(\gamma, n)^{15}O$  reaksiyonu için tesir kesiti elde etmişlerdir. Tesir kesitinde 18 rezonans gözlenmiştir. Bu rezonansların yapısı, teori ile deney arasındaki uyumsuzlukların olası sonuçları olarak tartışılmıştır.

Van De Vyver vd. (1972),  $^{12}\text{C}$  ve  $^{19}\text{F}$  için toplam fotonötron tesir kesitlerini incelemişlerdir.  $^{12}\text{C}$  için toplam fotonötron tesir kesitleri eşikten 33 MeV'e ve  $^{19}\text{F}$  için toplam fotonötron tesir kesitleri eşikten 19 MeV'e nötronların doğrudan dedekte edilmesiyle ve linactan bremsstrahlung kullanımıyla ölçülmüştür.  $^{12}\text{C}$  verileri mevcut sonuçlar ile iyi uyumludur;  $^{19}\text{F}(\gamma, xn)$  tesir kesiti kayda değer iyi yapı gösterir fakat komşu tek-kütleli çekirdeklerde gözlenmez.

Askin vd. (1972),  $^{90}\text{Zr}$  da fotonötron tesir kesitini ve fotoproton enerji spektrum ölçümlerini betatronda gerçekleştirmişlerdir. Toplam fotonötron tesir kesitinde gözlenmiş yapı ve fotoproton spektrumunda dedekte edilmiş izotopik benzer durum arasındaki ilişkiler elde edilmiştir. Spektrumun önemli bir özelliği 19,0 MeV ve 19,35 MeV de pikler ile çift rezonanstır.

Schier ve Schoch (1974), 63 MeV ve 150 MeV arasındaki foton enerjilerinde  $\text{C}^{12}(\gamma, n)\text{C}^{11}$  ve  $\text{O}^{16}(\gamma, n)\text{O}^{15}$  reaksiyonlarının incelemesini  $40.2^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $113.5^\circ$ ,  $142.2^\circ$  açıları için time of flight metodunu kullanarak yapmışlardır. Monokromatik fotonlar için nötron spektra, farklılık metodu tarafından elde edilmiştir. Monokromatik fotonların etkisi, farklı elektron enerjileri ile farklı ölçümler tarafından elde edilmiştir. Bu spektradan çıkarılmış tesir kesitleri göze çarpan ileri bir asimetri gösterir ve foton enerjisinin artışıyla hızlıca azalır.

Veyssiere vd. (1974), GDR bölgesinde birkaç hafif çekirdek için  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, pn)$  ve  $(\gamma, 2n)$  kısmi fotonötron tesir kesitlerini uçuşta pozitron yok etme metodunu kullanarak yüksek etkili nötron dedekte sistemi ve sürekli değişen monokromatik foton demeti ile incelemişlerdir.

Kneissl vd. (1975), yaptıkları bir çalışmada, Giessen 65 MeV elektron lineer hızlandırıcıda quasimonoenerjik foton tesisini anlatmışlardır. Uçuşta pozitron yok etme metodu, değişken enerjinin quasimonoenerjik fotonları üretmek için kullanılır. Giessen hızlandırıcısında foton tesisi (8-40 MeV) tanımlanmıştır. Pozitron üretimi, demet geçişi ve monitör sistemi tanımlanmıştır. Mutlak kalibrasyonlar ve  $(\gamma, xn)$  reaksiyonlarında kullanılmış  $4\pi$  nötron dedektörü kullanılmıştır. Tesisin performansı,  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  için  $\sigma(\gamma, Tn)$  toplam fotonötron tesir kesitlerinin test ölçümleriyle ispat edilmiştir.

Ahrens vd. (1975), mutlak nükleer foton absorpsiyon tesir kesitlerini 10 MeV'den mezon üretim eşiği arkasındaki foton enerjilerine kadar Li, Be, C, O, Al, Si ve Ca gibi bazı hafif elementler için ölçmüşlerdir. Manyetik Compton spektrometreleri ve belirlenmiş end-point (son nokta) enerjisi ile bremsstrahlung spektrumu kullanılmıştır. Tesir kesitleri, büyük rezonansın bölgesinde yapı gösterir ve daha yüksek enerjilerde pürüzsüzce düşer.

Carchon vd. (1976), büyük dipol rezonans (GDR) bölgesinde (21 ve 29 MeV arasındaki enerji aralığında)  $^{12}\text{C}$  için fotoproton tesir kesitini ve açısal dağılımlarını 30 MeV bremsstrahlung kullanarak eş zamanlı yedi açı ( $37^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $71^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $109^\circ$ ,  $126^\circ$  ve  $143^\circ$ ) için ölçmüşlerdir. Foton kaynağı olarak Ghent State Üniversitesinin 40 MeV'lik lineer elektron hızlandırıcısında üretilen bremsstrahlung demet kullanmışlardır. Tesir kesitinde yapı ve mutlak büyüklük belirlenmiştir, 22,5 MeV de büyük dipol rezonans pik verirken  $13,1 \pm 0,8$  mb'lık bir tesir kesiti değeri oluşur. Bu sonuç  $(p,\gamma)$  ters reaksiyonundan veriler ile iyi uyumdadır.

Brajnik vd. (1976),  $^{90}\text{Zr}$  da fotonükleer reaksiyonları büyük dipol rezonansın (GDR) uyarma bölgesinde çalışmışlardır.  $(\gamma,n)$ ,  $(\gamma,2n)$ ,  $(\gamma,np)$ ,  $(\gamma,n+np)$  ve  $(\gamma,p)$  reaksiyonları için tesir kesitleri ve  $(\gamma,p)$  reaksiyonu için  $90^\circ$  de diferansiyel tesir kesiti incelemeleri grafiklerle birlikte gösterilmiştir.  $^{90}\text{Zr}(\gamma,p_0)^{89}\text{Y}_{g.s}$  taban durumuna ek olarak,  $^{89}\text{Y}$  uyarılmış durumun üç grubu için fotoproton tesir kesiti verileri verilmiştir.  $(\gamma,p_1)$ ,  $(\gamma,n_1)$ ,  $(\gamma,2n)$ ,  $(\gamma,np)$  ve  $(\gamma,n)$  reaksiyonları için tesir kesitleri aktivasyon alan ölçümlerine dayalı farklı tekniklerden elde edilmiştir. Fotonötron tesir kesiti birinci uyarılmış durumu içeren katkı tarafından baskınlaştırılmıştır. Deneysel veriler büyük dipol rezonansın (GDR) izospin yarılmasının terimlerinde yorumlanmıştır. Toplam fotoproton tesir kesitinde, 16 MeV de geniş rezonans hariç  $(\gamma,n)$  reaksiyonunun baskın yapısına benzerdir, 20,5 MeV de yaklaşık aynı büyüklükte ilave bir rezonans görülür. Deney sonucunda elde edilen veriler önceki sonuçlarla uyumludur.

Kirichenko vd. (1977), 40-50, 50-60, 60-80, 80-120 MeV lik fotonların aralığında protonların açısal dağılımlarını ve  $\text{C}^{12}(\gamma,p)\text{B}^{11}$  reaksiyon tesir

kesitlerini ölçmüşlerdir. Ölçümler lineer hızlandırıcıda bremsstrahlung ışın kaynağı ile gerçekleştirilmiştir.

Findlay ve Owens (1977),  $^{16}\text{O}(\gamma, p)$  reaksiyonunu lineer hızlandırıcıda 40-105 MeV arasındaki foton enerjilerinde magnetik spektrometre dedektörü ile incelemişlerdir.

Kirichenko vd. (1978),  $E_\gamma\text{-max}=120$  MeV e kadar enerji bölgesinde  $\text{C}^{12}(\gamma, p)\text{B}^{11}$  reaksiyonunu incelemişlerdir. Çalışma lineer hızlandırıcıda bremsstrahlung ışın kaynağı ve iz dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.

Khodyachikh vd. (1980), 120 MeV e kadar enerjiler için  $\text{C}^{12}(\gamma, np)\text{B}^{10}$  ve  $\text{O}^{16}(\gamma, p)\text{N}^{15}$  reaksiyonunu incelemişlerdir.  $\text{C}^{12}(\gamma, np)\text{B}^{10}$  ve  $\text{O}^{16}(\gamma, p)\text{N}^{15}$  reaksiyonu için toplam ve çift diferansiyel tesir kesitlerini manyetik bir alanda difüzyon çember kullanarak ölçmüşlerdir. Ölçüm lineer hızlandırıcıda, iz dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.

Ishkhanov vd. (1980), benzer bir çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada  $\text{C}^{12}(\gamma, p)\text{B}^{11}$  reaksiyonunun  $90^\circ$  aç ve farklı enerji değerleri için çift diferansiyel tesir kesiti incelemeleri yapılmıştır. İncelemelerde betatron hızlandırıcıda bremsstrahlung ışın kaynağı kullanılmıştır.

Terasawa vd. (1983), tarafından işaretli fotonlar kullanılarak ara enerji bölgesinde fotoproton ve fotonötron çalışmaları yapılmıştır. İşaretli fotonlar gelen mermi demetinin bir kaynağı olarak kullanılmıştır.  $\text{C}^{12}$  den fotonötron ve fotoproton spektrası 20-100 MeV uyarma enerji bölgesinde ölçülmüştür.  $\text{C}^{12}(\gamma, n)$  ve  $\text{C}^{12}(\gamma, p)$  için çift diferansiyel tesir kesitleri spektradan elde edilmiştir.

Belyaev vd. (1985), kurşun, bizmut, tantalum ve oksijen çekirdeklerinde fotonötron tesir kesitinin yapısını deneysel olarak küçük adımlarla değişen enerjilerde incelemişlerdir. Sonuçlar diğer deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

McGeorge vd. (1986),  $E_\gamma=60$  ve 80 MeV de  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonunu incelemişlerdir. Bu enerji aralığında  $\theta_p=30^\circ\text{-}135^\circ$  aç aralığında  $^{12}\text{C}$  fotoproton

çift diferansiyel tesir kesitini ölçmek için işaretli foton tekniği kullanılmıştır. Quasidöteron hesaplamalar ile sonuçların karşılaştırması gösterir ki; iki-nükleon çifti ile fotonun etkileşimi artık çekirdekte yüksek uyarma enerjileri için daha az baskındır.

Berman vd. (1987), tarafından büyük dipol rezonans pikine karşı  $^{nat}\text{Zr}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{197}\text{Au}$  ve  $^{nat}\text{Pb}$  elementleri için fotonötron tesir kesitleri, Lawrence Livermore National Laboratory Electron-Positron Linear Accelerator'dan hızlı pozitronların uçuşta yok etme metodundan monoenerjik fotonlar ile ölçülmüştür. Çalışma sonucu ölçülmüş pik toplam fotonötron tesir kesitleri, % 2-3 lük belirsizlikle,  $^{nat}\text{Zr}$  için 174 mb,  $^{127}\text{I}$  için 252 mb,  $^{141}\text{Pr}$  için 340 mb,  $^{197}\text{Au}$  için 502 mb ve  $^{nat}\text{Pb}$  için 602 mb olarak gözlenmiştir. Monoenerjik foton demeti kullanılarak gerçekleştirilen tesir kesitlerinin ölçümleri belirtilen çok az bir yüzdelik dilimi içinde veriler ile uyumludurlar.

Kanazawa vd. (1987),  $\Delta(1232)$  rezonans bölgesinde hafif çekirdekler olarak belirlenmiş  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  için  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, pn)$  ve  $(\gamma, pp)$  reaksiyonlarının tesir kesitlerini işaretli foton demetinin kullanımıyla ölçmüşlerdir.  $\Theta_p=30^\circ$  de salınan protonlar manyetik bir spektrometreyle ölçülmüştür. Diğer nötronlar ve protonlar parıldama sayıcı hodoskobun bir düzeneğiyle ölçülmüştür.

Dancer vd. (1988), 83-133 MeV foton enerji aralığında  $^{12}\text{C}(\gamma, pn)$  reaksiyonunun ölçümlerini yapmışlardır. Deney yaklaşık olarak 8 MeV'lik enerji çözünürlüğü ile gerçekleştirilmiştir ki bu durum daha önceden başarılmamış bir durumdur.

Beljaev vd. (1991), oksijen çekirdeği için fotonötron tesir kesitlerini istatistiksel düzenleme metodunun ortalamasıyla fotonötron alan eğrilerinden elde etmişlerdir.

Annand vd. (1993), yaklaşık 58 MeV gama enerjilerinde  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  reaksiyonunun yüksek çözünürlük ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte 54.5-61.5 MeV gama enerjisinde  $^{12}\text{C}(\gamma, N)$  reaksiyonu ( $N=n, p$ ) için diferansiyel tesir kesitlerini de ölçüp, daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırmışlardır.

Cross vd. (1995),  $^{12}\text{C}$  elementinden proton fotoüretimi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında TOF metodunu ve 200 MeV enerji değerine sahip foton demetini kullanarak  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $100^\circ$  ve  $120^\circ$  açılarda ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir.

Harty vd. (1995), 80-157 MeV enerji aralığında fotonlar kullanarak  $58^\circ$  den  $128^\circ$  ye uzanan proton açılarında  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$  diferansiyel tesir kesitini ölçmüşlerdir. Veriler hesaplamanın dört farklı tipi ile karşılaştırılmıştır.

Annand vd. (1997), fotoreaksiyon çalışmaları için özellikle  $(\gamma, n)$  reaksiyon ölçümleri için nötron time-of-flight spektrometresi geliştirmişlerdir. Spektrometreyi  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  ve  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  ölçümlerinde test etmişlerdir.

Akkurt (1998), yaptığı doktora çalışmasında ara enerji bölgesi olarak adlandırılan 50-70 MeV foton enerji aralığında işaretli fotonlar kullanarak  $^{16}\text{O}$  ve  $^6\text{Li}$  çekirdeklerinde  $(\gamma, n)$  reaksiyonlarını deneysel olarak incelemiştir. Deney, Glasgow-Lund time-of-light (TOF) spektrometre kullanarak gerçekleştirilmiştir.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonları için tesir kesitleri elde edilmiştir ve önceden gerçekleştirilmiş  $(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$  reaksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Diferansiyel tesir kesitleri,  $^{16}\text{O}$  için, 60 MeV lik ortalama foton enerjilerinde  $45^\circ$  ve  $105^\circ$  nötron dedekte açılarında ölçülürken;  $^6\text{Li}$  için, 58 MeV lik ortalama foton enerjilerinde  $45^\circ$  ve  $105^\circ$  nötron dedekte açılarında ölçülmüştür. Ölçümlerin önceki sonuçlar ile uyumu mükemmeldir. Karşılaştırmalar çeşitli teoriksel hesaplamalar ile yapılmıştır.  $^{16}\text{O}(\gamma, n_0)$  ve  $^{16}\text{O}(\gamma, n_3)$  tesir kesitleri HF-RPA hesaplamaları ile,  $^{16}\text{O}(\gamma, n_{12})$  tesir kesiti MEC hesaplaması ile karşılaştırılmıştır.  $^6\text{Li}(\gamma, n)$  ölçümleri için tesir kesitleri  $^6\text{Li}(\gamma, p)$  ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Şuanki verilere  $^6\text{Li}(\gamma, pn)$  reaksiyonlarının katkıları Monte Carlo kodu MORGAIN kullanılarak hesaplanmıştır.

Akkurt vd. (2001), sundukları bir çalışmada, çekirdek reaksiyonlarının gerçekleşmesi için gerekli olan hızlı parçacıkların elde edildikleri hızlandırıcılar ve özellikle elektron hızlandırıcısının çalışma prensibini anlatmışlardır. Ve ayrıca belli enerjili foton elde etme teknikleri üzerinde de durulmuştur.



Akkurt ve Annand (2002),  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonunun tesir kesitlerini 50-70 MeV lik işaretli fotonlar ile ölçmüşlerdir ve çeşitli teoriksel hesaplamalar ve eşdeğer  $(\gamma, p)$  reaksiyonu ile karşılaştırmışlardır.

Ishkhanov vd. (2002), 12-65 nükleon sayılı çekirdeklerde foton absorpsiyon tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. 40 MeV e kadar enerji aralığı için  $^{12}\text{C}$  den  $^{65}\text{Cu}$ 'e 31 çekirdek için toplam fotoabsorpsiyon tesir kesitleri değerlendirilmiştir.

Akkurt (2003),  $^2\text{H}(\gamma, n)$  reaksiyonu için diferansiyel tesir kesitini 10 ile 70 MeV aralığındaki enerjilerde işaretli foton kullanarak MAX-Lab'da ölçmüştür.

Akkurt vd. (2003), büyük dipol rezonans enerji aralığında tungsten için fotonötron alanlarını MAX-Lab fotonükleer enstitüsünde işaretli fotonlar kullanarak ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışma  $^{nat}\text{W}(\gamma, n)$  için nötron alanlarını temsil eder ve bu MCNP-GN Monte Carlo kodunun öngörülerini ile karşılaştırılır.

Varlamov vd. (2003), fotoabsorpsiyon reaksiyon tesir kesitlerinde yeni veriler elde etmişlerdir.  $^{12}\text{C}$ 'den  $^{208}\text{Pb}$ 'e 19 çekirdek için toplam fotoabsorpsiyon reaksiyon tesir kesiti verileri kısmi fotonükleer reaksiyon tesir kesiti kısaltmaları  $\sigma(\gamma, \text{abs}) = \sigma(\gamma, \text{sn}) + \sigma(\gamma, \text{p}) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, np) + \sigma(\gamma, 2n) + \dots + \sigma(\gamma, \text{p})$ ,  $\sigma(\gamma, \text{sn}) = \sigma(\gamma, \text{xn}) - \sigma(\gamma, 2n)$ ,  $\sigma(\gamma, n) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, np)$  kullanılarak değerlendirilmiştir. Kısmi reaksiyon tesir kesitlerinin lineer kombinasyonları kullanılarak 19 çekirdek için  $(\gamma, \text{abs})$  reaksiyon tesir kesitleri değerlendirilmiştir.

Reiter (2004), yaptığı doktora çalışmasında hafif elementler olan  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$  ve insan kemiği için gelen foton enerjisinin, salınan nötron enerjisinin ve nötron açısının fonksiyonu olarak fotonötron tesir kesitlerini MAX-lab bremsstrahlung işaretleme tesisinde üretilen monoenerjik fotonlar kullanarak ölçmüştür. Diferansiyel  $A(\gamma, \text{xn})$  tesir kesitleri büyük dipol rezonans (GDR) bölgesi içinde monoenerjik foton enerjileri için hesaplanmıştır. İşaretli fotonlar, MAX-lab da elektron bremsstrahlung tarafından  $E_\gamma=11-35$  MeV aralığında üretilmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler, varolan veriler ve değerlendirmeler ile karşılaştırılmıştır. Verilerin analizi için Geant3 simülasyon kodu geliştirilmiştir.  $90^\circ$  de  $^{12}\text{C}(\gamma, n_0)$  ve  $^{12}\text{C}(\gamma, \text{xn})$  diferansiyel tesir kesitleri Wu, Verbinski ve Fultz tarafından ölçülmüş önceki veriler ile;  $90^\circ$  de  $^{16}\text{O}(\gamma, n_0)$  ve  $^{16}\text{O}(\gamma, \text{xn})$  diferansiyel



tesir kesitleri ise Verbinski, Berman ve Veyssiere tarafından ölçülmüş önceki veriler ile karşılaştırılmıştır. Karbon ve oksijen için elde edilen sonuçlar ile varolan verilerin karşılaştırması oldukça uyumludur.

Nilsson vd. (2005),  $^4\text{He}(\gamma, n)$  reaksiyonunun tesir kesitini MAX-Lab'da gerçekleştirmişlerdir. Çalışma  $23 < E_\gamma < 42$  MeV de işaretli fotonlar ile time-of-flight yöntemiyle yapılmıştır.

Rodrigues vd. (2007), tarafından yapılan çalışmada 10 MeV'den 140 MeV'e  $^{90}\text{Zr}$  ve  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  için fotonükleer reaksiyonlar incelenmiştir.  $^{90}\text{Zr}$  için toplam fotoabsorbsiyon tesir kesitinin son sonuçları ve ilgili bozunma kanalları National Bureau of Standards'dan (e,p) ölçümlerinin fitlenmesiyle elde edilmiştir ve daha yüksek enerjilerde çoklu proton emisyonları fotonükleer reaksiyonlara baskındır. Çalışma sonucunda,  $^{90}\text{Zr}$  ve  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  için özel fotonötron tesir kesitleri bu sonuçlardan türetilmiştir ve 140 MeV üzeri Livermore ve Sacloy verilerinin her ikisi ile % 10 uyumlu olarak bulunmuştur.

Afanas'ev vd. (2007), 30 ve 120 MeV arası foton enerji aralığında değişken enerji adımları ile  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^3\text{He}2\alpha$  reaksiyonu için toplam tesir kesitini ölçmüşlerdir. Ayrıca  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^3\text{He}2\alpha$  reaksiyonu için 32 ve 100 MeV enerji aralıklarında, bunun yanında  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^3\text{H}2\alpha$  reaksiyonu için 30 ve 100 MeV arası foton enerji aralıklarında diferansiyel tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. Tesir kesitinde 40 MeV etrafındaki bölgede bir azalış gözlenmiştir. Bu enerji bölgesindeki benzer bir düzensizlik önceden  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  ve  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$  reaksiyonlarında gözlenmiştir. 30-36 MeV eşik bölgesindeki açisal dağılımlar yaklaşık olarak izotropik iken 36-40 MeV enerji aralığında diferansiyel tesir kesitleri  $\sin^2 \theta$  fonksiyonuna orantısal olarak gözlenmiştir.

Schwengner vd. (2008),  $^{90}\text{Zr}$ 'da pygmy dipol kuvveti incelemişlerdir.  $^{90}\text{Zr}$  N=50 çekirdeğinin dipol çözümü, 7.9 MeV, 9.0 MeV ve 13.2 MeV'lik kinetik elektron enerjilerinde üretilmiş bremsstrahlung ile ELBE elektron lineer hızlandırıcısında foton-saçılma deneylerinde çalışılmıştır. İstatistiksel metotlar zenginleştirme oranları için taban-durum geçişlerinin yoğunluklarını kontrol etmek için ve inelastik geçişlerin yoğunluklarını varsaymak için uygulanmıştır.

Bu yolla nötron ayrılma enerjisi üzerinden fotoabsorbsiyon tesir kesiti elde edilmiştir. Bu tesir kesiti,  $(\gamma,n)$  verilerinden elde edilen fotoabsorbsiyon tesir kesiti ile iyi şekilde eşleşir.

Md. L. Rahman vd. (2010), tarafından  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  ve  $^{133}\text{Cs}$  için etkili ortalama  $(\gamma,n)$  tesir kesiti ve  $^{99}\text{Tc}$  için  $(\gamma,3n)$  tesir kesitinin çalışması yapılmıştır. Tahribatsız dedekte tekniği bremsstrahlung fotonlarının kullanımıyla uzun-ömürlü radyonükleitlerin kolay değerlendirmesi için önerilmiştir.  $^{99}\text{Tc}$  çekirdeği, etkili ortalama  $^{99}\text{Tc}(\gamma,3n)^{96}\text{Tc}$  tesir kesiti üzerinde değerlendirme için düşünülmüştür.  $^{99}\text{Tc}$  da deneysel metodu geçerli kılmak için  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  ve  $^{133}\text{Cs}$  ün  $(\gamma,n)$  fotonükleer tesir kesitleri ölçülmüştür. Sürekli-enerji bremsstrahlung fotonlar, bir elektron linactan 32/36 MeV lik bir elektron demet tarafından bombardıman edilmiş platinyum hedeften oluşturulmuştur. Fotonükleer  $(\gamma,n)$  tesir kesitleri Saclay (Fransa) ve Livermore (USA) laboratuvarları tarafından  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  ve  $^{133}\text{Cs}$  çekirdekleri için önceden ölçülmüştür.  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ , ve  $^{133}\text{Cs}$  için şuan ki sonuçlar Saclay ile %9 ve Livermore ile %14-36 uyumludur.

Varlamov vd. (2013), tarafından  $^{90}\text{Zr}(\gamma,p)^{89}\text{Y}$  ve  $^{90}\text{Zr}(\gamma,n)^{89}\text{Zr}$  reaksiyonları ve bu reaksiyonlardan büyük dipol rezonans (GDR) izospin yarıma parametreleri incelenmiştir. İnceleme neticesinde reaksiyon tesir kesitleri gra iklerle, GDR izospin yarıma parametreleri ise tablo ile gösterilmiştir. Ve elde edilen sonuçlar önceki sonuçlar ile karşılaştırıldığında uyum gözlenmiştir.

Kaplan vd. (2013), yapısal fisyon materyalleri olarak kabul edilen  $^{51}\text{V}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{90,91,92,94}\text{Zr}$  ve  $^{181}\text{Ta}$  için 7-40 MeV enerji aralığında  $(\gamma,n)$  fotonötron tesir kesitlerini teoriksel olarak incelemişlerdir. Foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak reaksiyon tesir kesitleri PCROSS ve TALYS 1.2 bilgisayar kodları kullanılarak hesaplanmıştır. TALYS 1.2 varsayılan ve denge öncesi modeller, denge öncesi fotonötron tesir kesitlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Reaksiyon denge bileşeni için, PCROSS Weisskopf-Ewing model hesaplamaları tercih edilmiştir. Hesaplanmış sonuçlar birbirleriyle ve EXFOR ve TENDL-2011 verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda PCROSS Weisskopf-Ewing model hesaplamaları  $^{90}\text{Zr}(\gamma,n)^{89}\text{Zr}$  reaksiyonu hariç deneysel veriler ile benzer

yapı gösterir. Genel olarak, TALYS 1.2 varsayılan ve denge-öncesi model tesir kesiti hesaplamaları  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$  reaksiyonu hariç diğer veriler ile çok iyi uyumdadır.

Kaplan vd. (2013), 40 MeV üzerinde gelen foton enerjilerinde birkaç yapısal isyon materyalleri  $^{51}\text{V}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{90,91,92,94}\text{Zr}$  ve  $^{181}\text{Ta}$  için  $(\gamma, 2n)$  reaksiyonları tarafından üretilen teoriksel fotonötron tesir kesitlerini, PCROSS ve TALYS 1.2 bilgisayar kodlarını kullanarak hesaplamışlardır. TALYS 1.2 varsayılan ve denge öncesi model tesir kesiti hesaplamaları bütün reaksiyonlar için deneysel veriler ile uyumlu olarak bulunmuştur.

Akkurt vd. (2014), Zr izotoplarında  $(\gamma, n)$  reaksiyon fotonötron tesir kesitlerini 7-70 MeV enerji aralığında teoriksel olarak incelemişlerdir. Foton enerjisinin fonksiyonu olarak fotonötron tesir kesitleri TALYS 1.2 nükleer kod programı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış sonuçlar EXFOR, JENDL/PD ve TENDL-2011 verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda fotonötron reaksiyon tesir kesiti hesaplamalarının deneysel ve değerlendirilmiş veriler ile çok iyi uyumu görülmüştür.

Ünal vd. (2014), bazı lantanit çekirdeklerin ( $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{142}\text{Nd}$ ,  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{160}\text{Gd}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{175}\text{Lu}$ ) toplam reaksiyon tesir kesitlerini, 5-30 MeV enerji aralığında seviye yoğunluk modelleri kapsamında gama uyarmalı reaksiyonlar için TALYS 1.2 kodunu kullanarak hesaplamışlardır. Model hesaplamalarından elde edilen toplam fotonötron reaksiyon tesir kesiti değerleri EXFOR kütüphanesinden alınan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Kaplan ve Çapalı (2014), bazı yapısal fisyon materyalleri  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Cu}$ ,  $^{94}\text{Zr}$ ,  $^{98,100}\text{Mo}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{186}\text{W}$  için  $(\gamma, 3n)$  reaksiyonlarının fotonötron tesir kesitlerini 20-110 MeV enerji aralığında gelen fotonlarla incelemişlerdir. Teoriksel nükleer reaksiyon modellerine dayalı teoriksel tesir kesiti hesaplamaları PCROSS, EMPIRE 3.1 ve TALYS 1.6 kodları ile gerçekleştirilmiştir.  $^{65}\text{Cu}(\gamma, 3n)^{62}\text{Cu}$  reaksiyonu hariç, çalışmadaki bütün denge ve denge öncesi tesir kesiti hesaplamaları deneysel veriler ile genellikle iyi uyumdadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Fotonlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri özellikle nükleer yapı fiziğinde önemli yer tutar. Bu tür reaksiyonların oluşumu sırasında önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için teorik hesaplamaların yapılabilmesi gerekir. Gönderilen parçacık baz alınarak hangi enerji aralığında maksimum tesir kesiti olabileceğini veya gönderilen parçacığın enerjisinin hangi aralıklarda olması gerektiğini belirleyebilmek için bu hesaplamaların önemi ortaya çıkmaktadır.

Monte Carlo uygulamaları arasında yer alan bilgisayar kod sistemleri (TALYS, ALICE, GNASH, EMPIRE vb.) karmaşık sorunların çözülmesi, deneysel tasarımların benzetiminin yapılması ve henüz deney yapılmadan önce deneysel sonuçların tahmininin yapılmasında yararlar sağlamaktadır.

Bu bölümde çalışmada kullanılan nükleer reaksiyon modellerinin tanımı ve tanıtımı TALYS 1.2 nükleer simülasyon kod programı temelinde yapılmıştır.

#### 3.1 TALYS 1.2 Nükleer Reaksiyon Kod Programı

Bu tezde bremsstrahlung foton nükleer tesir kesiti hesaplamaları nükleer reaksiyon simülasyon kod programı ile yapılmıştır. Bu amaçla TALYS 1.2 Monte Carlo simülasyon kod programı kullanılmıştır.

TALYS, fortran programlama diline sahip ve Linux işletim sisteminde çalışan ve nükleer reaksiyonların öngörü ve analizi için geliştirilmiş olan bilgisayar kod sistemidir. Hedef çekirdek kütlelerinin 12 ve daha ağır kütleli olma şartı sözkonusudur. Ancak bu şart TALYS 1.2 sürümü ile  $5 < A \leq 339$  durumuna geliştirilmiştir. Enerji aralığı olarak 1 keV-250 MeV bölgesinde nötron, proton, döteron, triton,  $^3\text{He}$ , alfa parçacıkları ve fotonu kapsayan hesaplamalar yapan nükleer reaksiyonların bir simülasyonunu temsil eder. TALYS çıktı dosyalarında esnek, esnek olmayan ve toplam tesir kesiti, elastik saçılma açısal dağılımlar, kesikli seviyelerde açısal dağılımlar, izomerik ve taban durum tesir kesiti, toplam parçacık ve çift diferansiyel tesir kesitleri, tekli veya çoklu emisyon tesir kesitleri, ürün çekirdeklerin oluşma tesir kesiti sonuçları elde edilebilir (Koning vd., 2009).

TALYS simülasyon programının iki temel amacı vardır. Birincisi, TALYS nükleer reaksiyon deneylerinin analizi için kullanılabilen nükleer fizik aracı olmasıdır. İkincisi, nükleer veri aracı olarak adlandırılmasıdır (Koning vd., 2009).

### **3.2 Optik Model**

Optik modele dayalı merkezi anlayış, çekirdek ve gelen parçacık arasındaki karmaşık etkileşimin kompleks ortalama alan potansiyeli ile temsil edilebilir olmasıdır. Bu kompleks potansiyel ile Schrödinger denkleminin çözümü, değerli bilginin bolluğunu sentezler (Koning vd., 2009).

### **3.3 Bileşik Reaksiyonlar**

Bileşik çekirdek reaksiyon terimi çoğunlukla iki farklı mekanizma için kullanılır. İlki, hedef çekirdekte merminin yakalanmasının süreci, bileşik çekirdek formuna geçmesi, bu sayede bir parçacık veya gama ışını salmasıdır. Bu mekanizma düşük gelme enerjilerinde rol oynar. İkincisi, ikili reaksiyon sonrasında biçimlenmiş uyarılmış artık çekirdeğin çoklu emisyon sürecidir (Koning vd., 2009).

### **3.4 Denge öncesi Süreç (Pre-equilibrium)**

Denge öncesi mekanizması, hedef çekirdeklerin kütesine ve bileşik sistemin uyarma enerjisine bağlıdır. Bu sebeple, birincil nötron, proton ve alfa parçacıklarının yayınlanmasında diğer reaksiyon türlerine kıyasla daha önemlidir. Denge öncesi süreç, reaksiyonların ilk aşamasından sonra gerçekleşir. Bu denge öncesi durum bileşik çekirdeklerin istatistiksel dengesine kadar devam eder. Yüksek gelme enerjilerinde ( $E > 4$  MeV) ilk olarak esnek olmayan reaksiyon kanalları açılır. Denge öncesi süreçler, 10 (en azından) ve 200 MeV arasında gelen enerjiler için reaksiyon tesir kesitinin büyük bölümünü kapsar (Koning vd., 2009).

### **3.5 Fotoabsorbsiyon Modeli**

Fotoabsorbsiyon modeli, parçacık ve gama ışını emisyonu tarafından uyarılmış çekirdeğin sonraki bozunması ve başlangıç nükleer uyarma sürecinde bulunan

farklı reaksiyon mekanizmaları için hesaplanması gerekli olan fotonükleer reaksiyonların modeli olarak ifade edilir.

TALYS, denge öncesi gama ışın emisyonu için ve fotonükleer reaksiyonlar için fotoabsorbsiyon tesir kesitlerini gerekli kılar. Fotonötron reaksiyon tesir kesitinde tek parçacık (nötron) yayınlanması söz konusu olduğu için bileşik kanallara veya çoklu reaksiyon kanallarına gerek duyulmaz. Giant dipol rezonans (GDR) bölgesine rast gelen tek nötron yayınlanma reaksiyonu hesaplaması fotoabsorbsiyon model başlığı altında hesaplanır (Koning vd., 2009).

Fotoabsorbsiyon tesir kesiti, büyük dipol rezonans (GDR) tesir kesiti ile sanki-döteron (QD) tesir kesitinin toplamı şeklinde

$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \sigma_{GDR}(E_\gamma) + \sigma_{QD}(E_\gamma) \quad (3.1)$$

ile verilir (Koning vd., 2009).

Foto yüklü parçacık tesir kesiti toplamı, toplam fotoabsorbsiyon reaksiyon tesir kesitini verir. Toplam fotoabsorbsiyon reaksiyon tesir kesiti

$$\begin{aligned} \sigma(\gamma, abs) = & \sigma(\gamma, sn) + \sigma(\gamma, p) + \sigma(\gamma, 2p) + ..... + \sigma(\gamma, d) + \sigma(\gamma, dp) + ..... + \\ & + \sigma(\gamma, \alpha) + .... \end{aligned} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemden  $\sigma(\gamma, sn)$  toplam fotonötron tesir kesitini,  $\sigma(\gamma, p)$  tek fotoproton tesir kesitini,  $\sigma(\gamma, 2p)$  iki fotoproton tesir kesitini,  $\sigma(\gamma, d)$  fotodöteron tesir kesitini,  $\sigma(\gamma, dp)$  fotodöteronproton tesir kesitini ve  $\sigma(\gamma, \alpha)$  fotoalfa tesir kesitini temsil eder (IAEA, 2000).

Denklem (3.2) eşitliğinde reaksiyon çıkış kanallarında oluşan tüm parçacık reaksiyonlarına bağlı olarak, toplam tesir kesitinin elde edildiği görülür. Bu durumda, tüm reaksiyonlar neticesinde gama ışınının çekirdekteki absorpsiyonu toplam olarak bulunmaktadır (IAEA, 2000).

Ağır çekirdek fotoabsorbsiyon reaksiyon tesir kesiti için, toplam fotoabsorbsiyon tesir kesiti ile toplam fotonötron tesir kesiti terimleri yaklaşık olarak birbirine eşittir. Bu eşitlik

$$\sigma(\gamma, abs) \cong \sigma(\gamma, sn) \quad (3.3)$$

ile ifade edilir (IAEA, 2000).

### 3.6 Gama Işını Kuvvet Fonksiyonları

Gama ışını kuvvet fonksiyonu, elektromagnetik nükleer özelliklerin ortalamasının bir ölçümü olarak düşünülür. Gama ışını kuvvet fonksiyonu nükleer yapı ve nükleer reaksiyonların her ikisinin de anlaşılması için önemlidir. İlk kez 1951'de Weisskopf tarafından tahmin edilmiştir. Bu tahmin bağımsız parçacık modeline dayandırılmıştır. Bu enerji-bağımsız model tek parçacık modeli olarak bilinmektedir (Tavukcu, 2002).

Gama ışını geçiş katsayıları nükleer reaksiyonlarda gama emisyon kanalının tanımlanması için önemlidir. Gama ışını kuvvet fonksiyonu için Brink-Axel modeli, Lorentzian formu, Hartree-Fock BCS tablosu, Hartree-Fock Bogolyubov tablosu ve Goriely'nin hibrit modeli olmak üzere 5 model söz konusudur (Koning vd., 2009).

Brink-Axel (Brink,1957; Axel, 1962) modelinde büyük dipol rezonans (GDR) formu standart Lorentzian formuyla

$$f_{\mathcal{M}}(E_{\gamma}) = K_{\mathcal{M}} \frac{\sigma_{\mathcal{M}} E_{\gamma} \Gamma_{\mathcal{M}}^2}{(E_{\gamma}^2 - E_{\mathcal{M}}^2)^2 + E_{\gamma}^2 \Gamma_{\mathcal{M}}^2} \quad (3.4)$$

şeklinde verilir. Denklemdaki  $\sigma_{\mathcal{M}}$  büyük rezonansın genişliğini,  $E_{\mathcal{M}}$  rezonansın enerjisini ve  $\Gamma_{\mathcal{M}}$  rezonansın kuvvetini temsil eder (Koning vd., 2009). Bu denklem küresel çekirdekler için geçerlidir. Brink hipotezinin bir sonucu uyarma enerjisinden bağımsız olarak sadece geçiş enerjisine bağlı ışın kuvvet fonksiyonu olmasıdır (Tavukcu, 2002).

E1 foton kuvveti için en basit model enerji-bağımsız tek-parçacık modelidir. Daha gerçekçi bir yaklaşım giant elektrik dipol rezonansın kullanımıdır. Giant dipol rezonans doğrudan fotonükleer reaksiyonlarda gözlenir (Tavukcu, 2002).

E1 radyasyonu için, TALYS'de kullanılan varsayılan fikir Kopecky ve Uhl'nin (Kopecky ve Uhl, 1990) Lorentzian formülü

$$f_{E1}(E_\gamma, T) = K_{E1} \left[ \frac{E_\gamma \Gamma_{E1}(E_\gamma)}{(E_\gamma^2 - E_{E1}^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma_{E1}(E_\gamma)^2} + \frac{0.7 \Gamma_{E1} 4\pi^2 T^2}{E_{E1}^3} \right] \sigma_{E1} \Gamma_{E1} \quad (3.5)$$

şeklindedir. Denklemdaki  $\Gamma(E_\gamma)$  enerji-bağımlı sönümlenme genişliğini ve  $T$  nükleer sıcaklığı temsil etmektedir (Koning vd., 2009).

### 3.7 Kalbach Sistematiği ve DDX Hesaplaması

Açı bağımlı tesir kesitlerine özel spektranın genellemesi, özel çift diferansiyel tesir kesitinin ifadesiyle yapılır. Fiziksel modeller ve sistematikler ile

$$\frac{d^2 \sigma^{ex}}{dE_k d\Omega}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir. Açılar üzerinden bu ifadenin integrali alındığında denklem 3.7'de görüldüğü gibi özel spektrumu verir (Koning vd., 2009).

$$\frac{d\sigma^{ex}}{dE_k}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) = \int d\Omega \frac{d^2 \sigma^{ex}}{dE_k d\Omega}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) \quad (3.7)$$

Diğer ilişkiler spektranın bu hallerine benzerdir, örneğin süreklilik için elastik olmayan çift-diferansiyel tesir kesiti

$$\frac{d^2 \sigma_{n,n'}}{dE_{n'} d\Omega} = \frac{d^2 \sigma^{ex}}{dE_n d\Omega}(1, 0, 0, 0, 0, 0) \quad (3.8)$$

ile tanımlanır. Ve toplam nötron çift diferansiyel tesir kesiti,



$$\frac{d^2\sigma_{n,xn}}{dE_n d\Omega} = \sum_{i_n=0}^{\infty} \sum_{i_p=0}^{\infty} \sum_{i_d=0}^{\infty} \sum_{i_t=0}^{\infty} \sum_{i_h=0}^{\infty} \sum_{i_\alpha=0}^{\infty} \frac{d^2\sigma^{ex}}{dE_n d\Omega}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) \quad (3.9)$$

olarak ifade edilebilir (Koning vd., 2009).

Yarı-klasiksel modellerde, exciton model gibi, açısal dağılımları tanımlamak için her zaman bazı problemler mevcuttur. Güçlü bir görüngüsel metot Kalbach tarafından verilir. Bu metot sadece deneysel bilgiye dayanır. Hedefe yollanan mermi parçacık  $\alpha$  ve sistemden çıkan parçacık  $b$  olmak üzere, çift-diferansiyel tesir kesiti için Kalbach formülü

$$\frac{d^2\sigma_{a,xb}}{dE_b d\Omega} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{d\sigma^{PE}}{dE_b} + \frac{d\sigma^{comp}}{dE_b} \right] \frac{a}{\sinh(a)} [\cosh(a \cos \Theta) + f_{MSD}(E_b) \sinh(a \cos \Theta)] \quad (3.10)$$

şeklinde dir. Denkle mde  $\frac{d\sigma^{PE}}{dE_b}$  açı integreli den ge öncesi ve  $\frac{d\sigma^{comp}}{dE_b}$  bileşik spektrayı temsil eder. Ve  $f_{MSD}$  çok adımlı direkt veya çok adımlı den ge öncesi oranı olarak adlandırılır. İfade,

$$f_{MSD}(E_b) = \frac{d\sigma^{PE}}{dE_b} / \left[ \frac{d\sigma^{PE}}{dE_b} + \frac{d\sigma^{comp}}{dE_b} \right] \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanır. Böylece, düşük emisyon enerjilerinde 0'dan yüksek emisyon enerjilerinde 1'e doğru artar. Denklem (3.10)'daki  $\alpha$  parametresi, sistematikteki açısal dağılımı belirler. Sonuç olarak ise açı-integreli spektrum elde edilir (Koning vd., 2009).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

TARLA Bremsstrahlung foton tesisinde, özellikle nükleer araştırmalar için tasarlanacak olan deneyler, üretilen bremsstrahlung fotonlarının enerjisine ve fotonükleer tesir kesitine önemli ölçüde bağlıdır. Yüksek enerjili fotonlarla çekirdek durumları uyarılabilir. Bu uyarılma mekanizmalarını ve çekirdek yapısını incelemek için fotonükleer tesir kesiti verilerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle seçilen  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  hedef çekirdekleri için bazı fotonükleer reaksiyonların toplam tesir kesiti verileri ve çift diferansiyel tesir kesiti verileri TALYS 1.2 nükleer reaksiyon simülasyon kodu kullanılarak hesaplanmıştır.  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  hedef çekirdeklerinde hesaplanan toplam tesir kesiti verileri ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, np$ ) fotonükleer reaksiyonlarını kapsamaktadır. Toplam tesir kesiti hesaplamaları yapılırken gama kuvvet fonksiyon modellerinin oluşturdukları etkiler de incelenmiştir. Hesaplanan çift diferansiyel tesir kesiti verileri ise farklı enerji değerlerinde  $40^\circ$ - $150^\circ$  arasındaki açılarda ( $\gamma, n$ ) ve ( $\gamma, p$ ) fotonükleer reaksiyonlarıdır. Hesaplama sonuçları ile, mevcut deneysel veriler EXFOR kütüphanesinden ve teorik hesaplanmış verilerin alındığı JENDL kütüphanesinin verileri birleştirilerek elde edilen reaksiyon tesir kesitleri ve çift diferansiyel tesir kesitleri şekilleri sunulmuştur.

##### 4.1 Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları

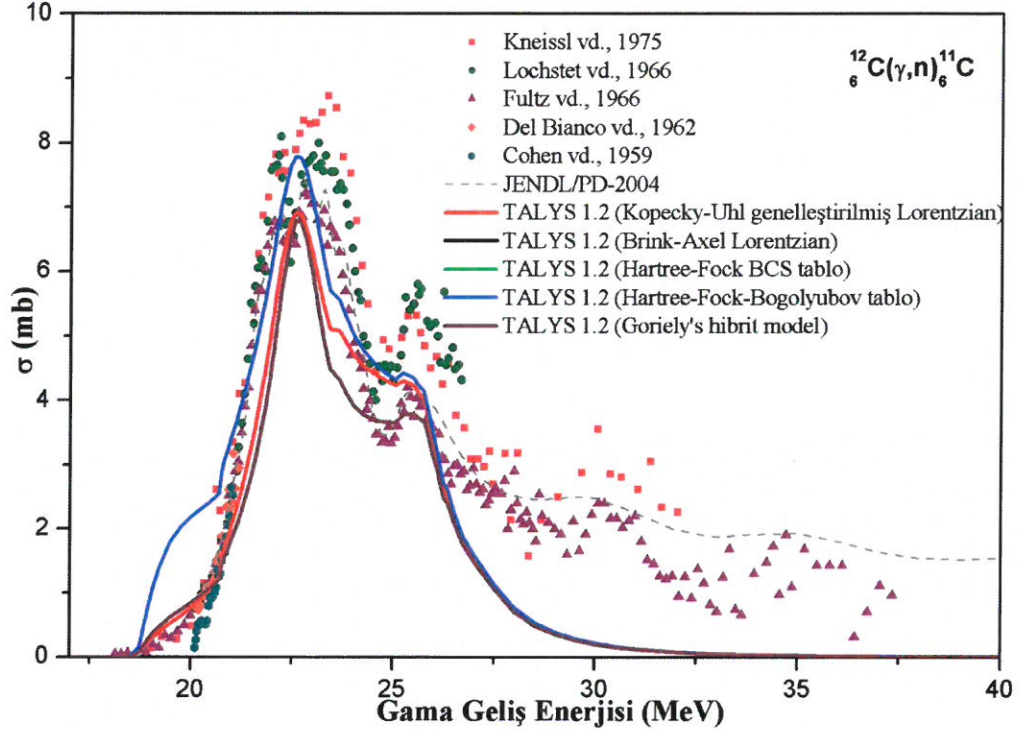
###### 4.1.1 $^{12}\text{C}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları

###### 4.1.1.1 $^{12}\text{C} (\gamma, n)^{11}\text{C}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 15-100 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan ( $\gamma, n$ ) reaksiyonu tesir kesiti ve mevcut deneysel veriler (Kneissl vd., 1975, Lochstet vd., 1966, Fultz vd., 1966, Del Bianco vd., 1962, Cohen vd., 1959) ve JENDL hesaplanmış reaksiyon tesir kesiti verileri ile uyumu incelenmiştir.

Görülmesi beklenen ( $\gamma, n$ ) reaksiyonlarına ait olan  $90^\circ$ lik pikleşme Şekil 4.1'de görülmektedir ve ilk pikin ardından küçük de olsa ikinci bir pik de gözlenmiştir. 25 MeV civarında bu ikinci pik gözlenme sebebi, deneylerin yapıldığı tarihteki

kullanılan dedektörlerin şunda kullanılan dedektörlere benzememesinden kaynaklı olabilir. Ayrıca 25 MeV civarındaki bu hafif pik oluşumunun sebebi bu enerji bölgesinde büyük dipol rezonans (GDR) etkisinin görülmesinden de kaynaklı olabilir.

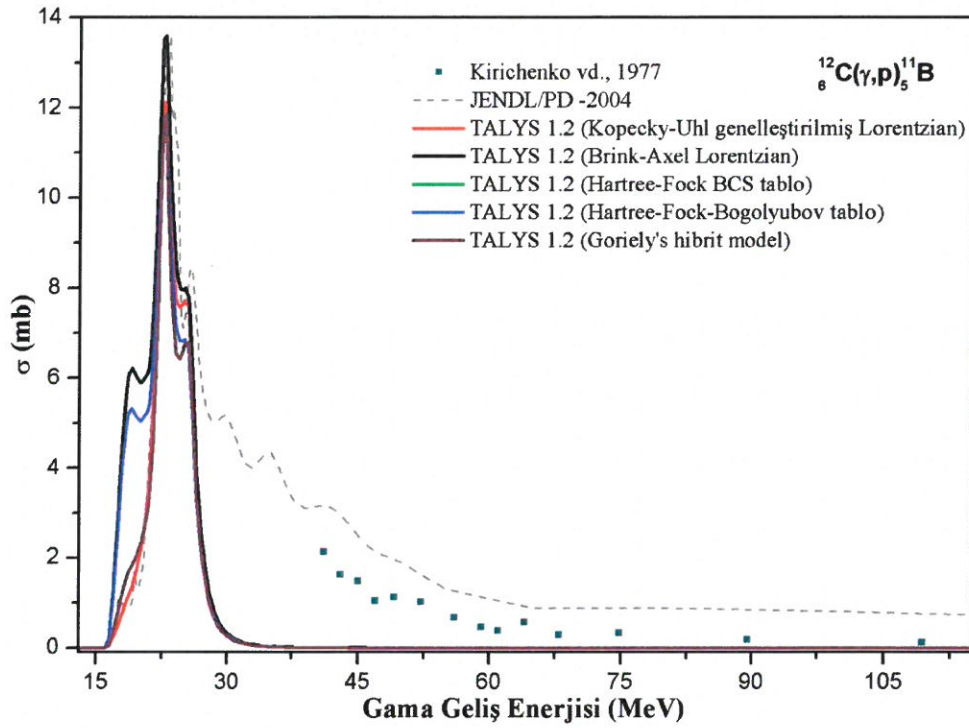


Şekil 4.1.  $^{12}\text{C}$  çekirdeği için  $(\gamma, n)$  reaksiyonu tesir kesiti

Brink-Axel Lorentzian, Hartree-Fock-Bogolyubov tablo ve Hartree-Fock BCS tablo modelinin üst üste çakıştığı gözlenmiştir. Kopecky-Uhl geliştirilmiş Lorentzian model ile Goriely's hibrit model şekil olarak aynı görünümde iken; yükseklikleri farklı görünümündedir. Gama kuvvet fonksiyon modelleri şekilsel olarak benzerlik göstermeleri açısından Brink-Axel Lorentzian, Hartree-Fock BCS tablo, Hartree-Fock-Bogolyubov tablo kendi içinde üçlü grup; Kopecky-Uhl geliştirilmiş Lorentzian ve Goriely's hibrit model kendi içinde ikili grup oluşturmaktadır. Deneysel veriler özellikle Kopecky-Uhl geliştirilmiş Lorentzian ve Goriely's hibrit model ile daha iyi uyumludur. Modeller kendi içlerinde kıyaslandığında ise maksimum pik değerinin Hartree-Fock-Bogolyubov tablo, Hartree-Fock-BCS tablo ve Brink-Axel Lorentzian modellerinde en yüksek değerde olduğu görülmektedir.

#### 4.1.1.2 $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.2'de verilmiştir. Burada hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 10-200 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu tesir kesiti ve mevcut deneysel veri (Kirichenko vd., 1977) ve JENDL hesaplanmış reaksiyon tesir kesiti verileri ile uyumu incelenmiştir.



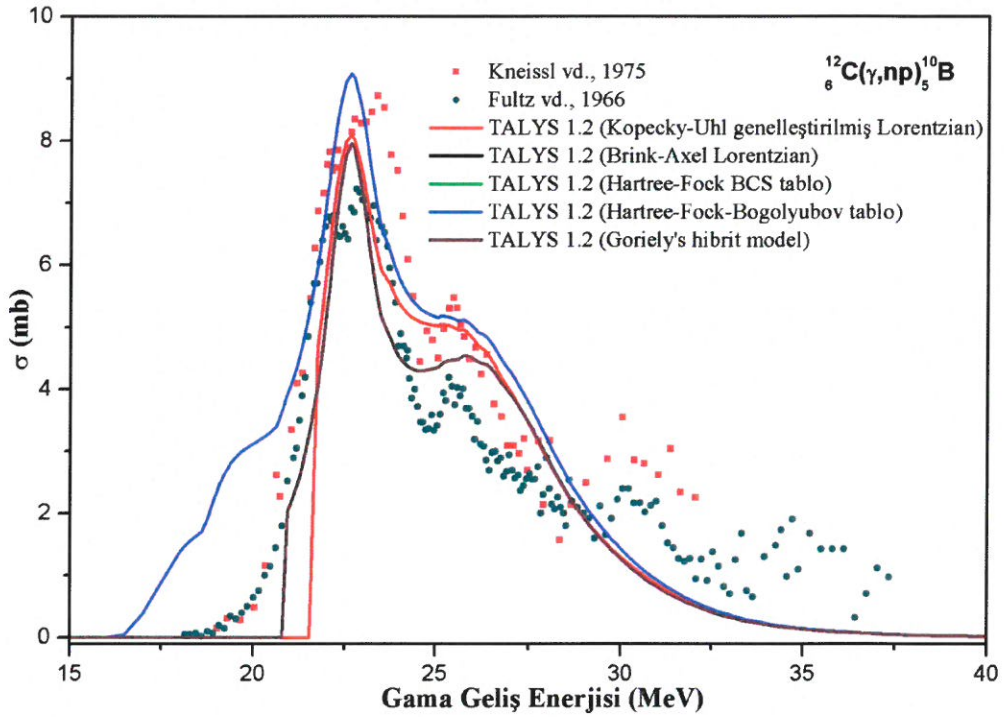
Şekil 4.2.  $^{12}\text{C}$  çekirdeği için  $(\gamma, p)$  reaksiyonu tesir kesiti

Kopecky-Uhl geliştirilmiş Lorentzian ile Goriely's hibrit modelin üst üste çakıştığı görülmektedir. Aynı durum Hartree-Fock BCS tablo ve Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modelleri için de geçerlidir. Bununla birlikte Brink-Axel Lorentzian ile Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modelleri şekil benzerliği göstermelerine rağmen maksimum pik yükseklikleri farklı değerlerdedir. Deneysel verilerin 41,1 ile 109,4 MeV arasında reaksiyon oluşma olasılığı sonuçları teorik hesaplama sonuçları ile farklı tarihlerde kullanılan dedektörlerin benzememesinden dolayı uyum gösterememektedir. Gama kuvvet fonksiyon modelleri kendi içlerinde kıyaslandığında maksimum pik değerinin Brink-Axel Lorentzian modelde olduğu görülür.



#### 4.1.1.3 $^{12}\text{C}(\gamma, np)^{10}\text{B}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötronproton toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.3'de verilmiştir. Bu şekilde, hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 10-200 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti ve mevcut deneysel veriler (Kneissl vd., 1975 ve Fultz vd., 1966) ile uyumu incelenmiştir.



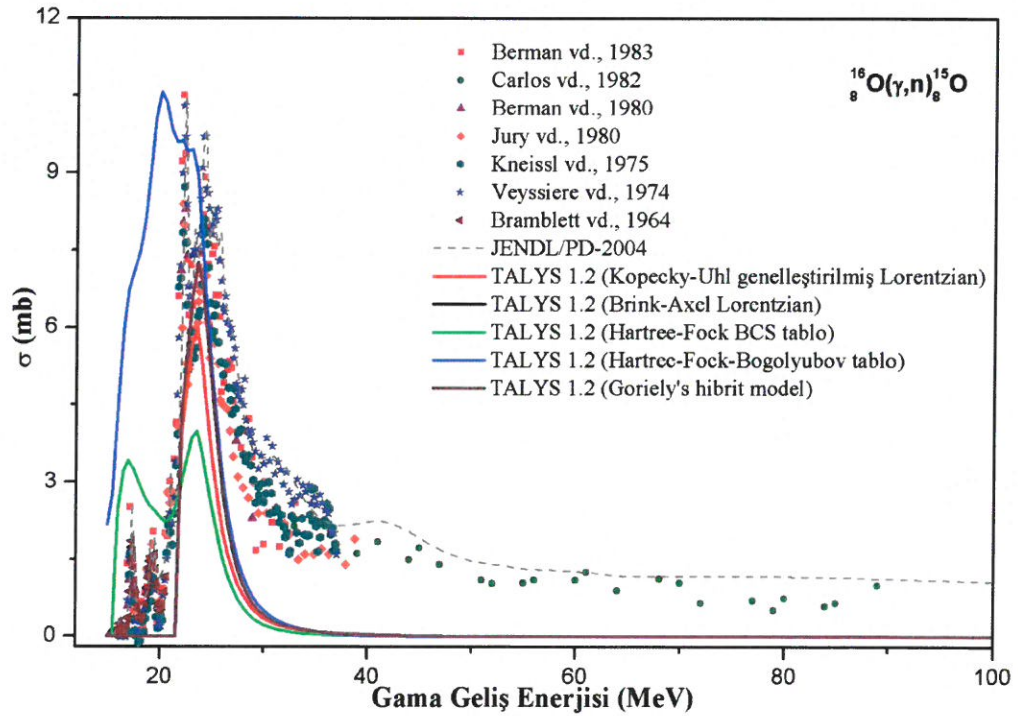
Şekil 4.3.  $^{12}\text{C}$  çekirdeği için  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti

Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian ve Goriely's hibrit model şekilsel olarak aynı özellikleri göstermektedir. Aynı zamanda deneysel veriler de bu iki model ile çok uyumludur. Brink-Axel Lorentzian, Hartree-Fock-Bogolyubov tablo, Hartree-Fock BCS tablo modellerinin üçü de üst üste çakıştığı için grafikte tam olarak görülememektedir. Deneysel verilerde 21,337 MeV-32,063 MeV ile 18,153 MeV- 37,354 MeV arasında  $(\gamma, np)$  reaksiyon oluşma olasılığı gözlenmektedir. Gama kuvvet fonksiyon modellerini maksimum pik değeri açısından değerlendirdiğimizde Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modelin diğer modellere göre daha yüksek değere sahip olduğunu görmekteyiz.

#### 4.1.2 $^{16}\text{O}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları

##### 4.1.2.1 $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.4'de verilmiştir. Burada hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 10-100 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu tesir kesiti ve beraberinde mevcut deneysel veriler (Berman vd., 1983, Carlos vd., 1982, Berman vd., 1980, Jury vd., 1980, Kneissl vd., 1975, Veyssiere vd., 1974, Bramblett vd., 1964) ve JENDL hesaplanmış reaksiyon tesir kesiti verileri ile uyumu incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ile TALYS 1.2 hesaplama sonuçları arasında deneylerin yapıldığı tarihlerde mevcut kullanımda olan dedektörlerin şuanda kullanılan dedektörlere benzememesinden kaynaklı uyumsuzluk gözlenmesine rağmen; deneysel sonuçlar ile JENDL/PD-2004 verilerinde uyum gözlenmektedir.



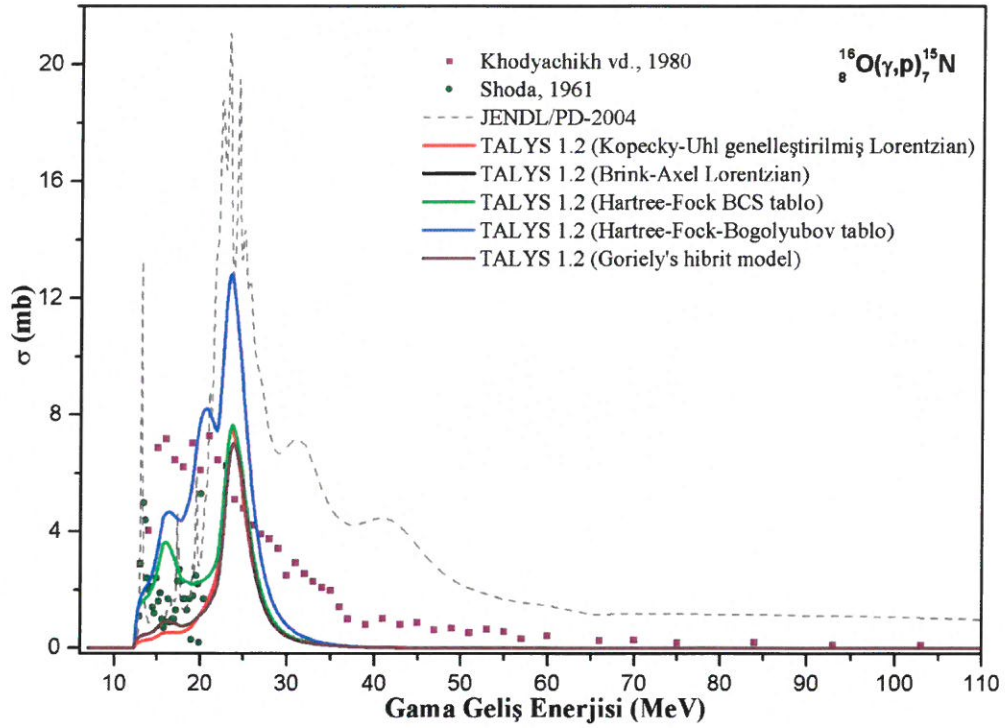
Şekil 4.4.  $^{16}\text{O}$  çekirdeği için  $(\gamma, n)$  reaksiyonu tesir kesiti

Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian ile Goriely's hibrit model üst üste çakışık gibi görünürken; Goriely's hibrit modelde daha yüksek pik gözlenmektedir. Aynı üst üste çakışma durumu Brink-Axel Lorentzian ve

Hartree-Fock BCS tablo modellerinde gözlenmektedir. Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modeli diğer modellerden hem şekil olarak hem pik yüksekliği olarak çok farklıdır. Deneysel veriler Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian ve Goriely's hibrit model ile uyumlu görünmektedir. Ayrıca maksimum pik değerinin Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modelde diğer modellere kıyasla daha yüksek olduğunu görmekteyiz.

#### **4.1.2.2 $^{16}\text{O}(\gamma,p)^{15}\text{N}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması**

$^{16}\text{O}$  için elde edilen fotoproton toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.5'de verilmiştir. Burada hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 7-120 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu tesir kesitiyle birlikte mevcut deneysel veriler (Khodyachikh vd., 1980, Shoda vd., 1961) ve JENDL hesaplanmış reaksiyon tesir kesiti verileri ile uyumu incelenmiştir. Deneysel veriler 13-113 MeV enerji bölgesindedir. Deneysel veriler ile TALYS 1.2 hesaplama sonuçları arasında deneylerin yapıldığı tarihlerdeki kullanılan dedektörlerin şu zamanda kullanılan dedektörlere benzememesinden dolayı herhangi bir uyum gözlenemese de; JENDL/PD-2004 verileri ve TALYS 1.2 hesaplama sonuçları arasında eğrisel benzerlik görülmüştür.



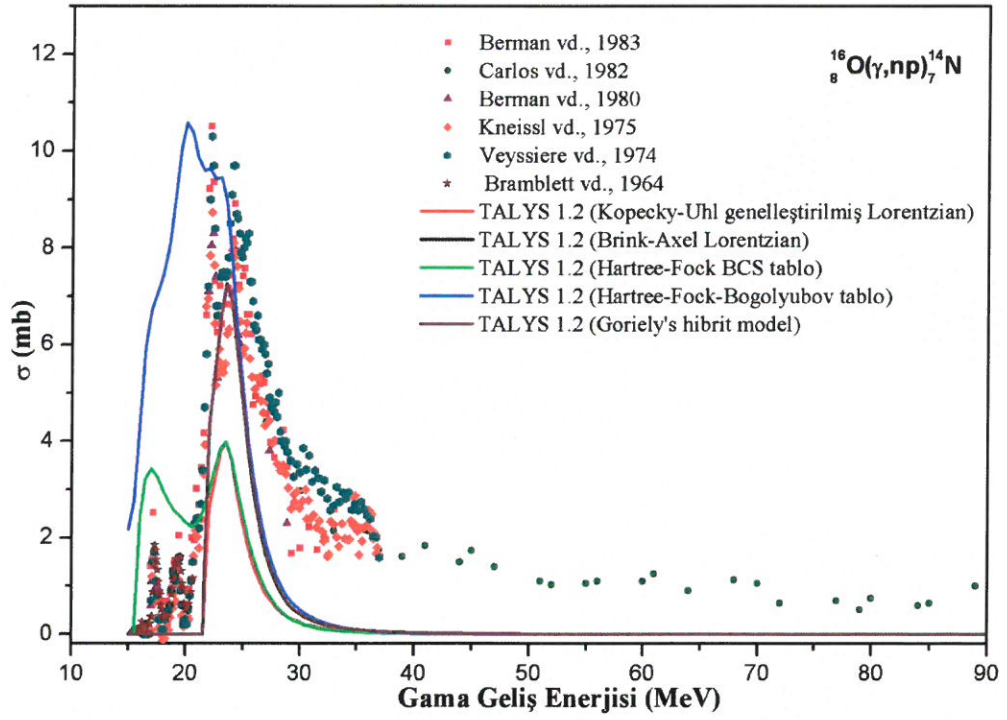
Şekil 4.5.  $^{16}\text{O}$  çekirdeği için  $(\gamma, p)$  reaksiyonu tesir kesiti

Hartree-Fock BCS tablo model ile Brink-Axel Lorentzian model üst üste çakışmaktadır. Aynı durumu Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian ile Goriely's hibrit modelde görmek mümkündür. Hartree-Fock-Bogolyubov tablo model diğer modellerden hem şekil olarak hem de pik yüksekliği olarak bağımsızdır. Bunun yanında Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian, Goriely's hibrit model, Hartree-Fock BCS tablo ve Brink-Axel Lorentzian modelleri maksimum pik değerlerinde üst üste çakışmaktadır. En yüksek pik değerini ise Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modelde görmekteyiz.

#### 4.1.2.3 $^{16}\text{O}(\gamma, np)^{14}\text{N}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötronproton toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.6'da verilmiştir. Burada hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 7-120 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti ile birlikte mevcut deneysel veriler (Berman vd., 1983, Carlos vd., 1982, Berman vd., 1980, Kneissl vd., 1975, Veyssiere vd., 1974, Bramblett vd., 1964) ile uyumu incelenmiştir.





Şekil 4.6.  $^{16}\text{O}$  çekirdeği için  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti

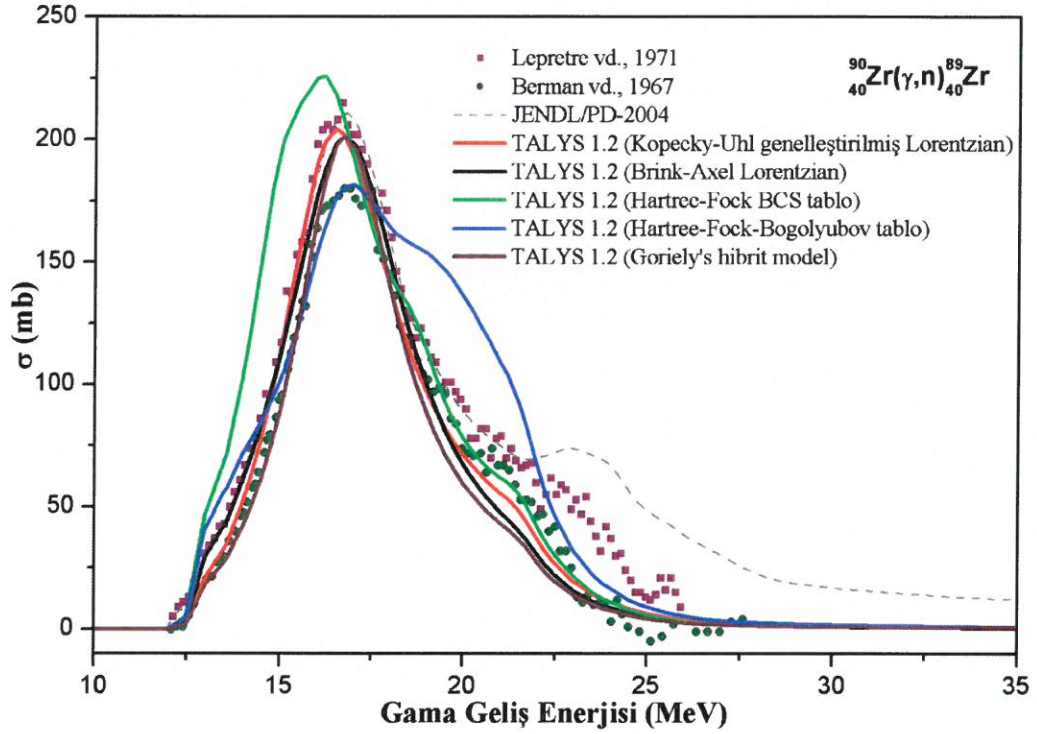
Brink-Axel Lorentzian model ile Hartree-Fock BCS tablo model üst üste çakışmaktadır. Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian model ile Goriely's hibrit model üst üste çakışıyor gibi görünürken; Goriely's hibrit modelin maksimum pik yüksekliği daha fazla görülmektedir. Hartree-Fock-Bogolyubov tablo diğer modellerden hem şekil hem de pik yüksekliği bakımından çok farklıdır. Deneysel veriler kendi içlerinde birbirleriyle uyumlu iken; hesaplama sonuçları ile elde edilen modellerle kıyaslandığında deneylerin yapıldığı tarihlerdeki kullanılan dedektörler ile şuanda kullanılan dedektörlerin farklı oluşundan dolayı uyumsuz görünmektedir. En yüksek pik değerine sahip gama kuvvet fonksiyonu modelinin ise Hartree-Fock-Bogolyubov tablo model olduğu saptanmıştır.

#### 4.1.3 $^{90}\text{Zr}$ Fotonükleer Reaksiyon Toplam Tesir Kesiti Hesaplamaları

##### 4.1.3.1 $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)^{89}\text{Zr}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{90}\text{Zr}$  için elde edilen fotonötron toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.7'de verilmiştir. Burada hedef  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 10-100 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$

reaksiyonu tesir kesiti ve mevcut deneysel veriler (Lepretre vd., 1971, Berman vd., 1967) ile JENDL hesaplanmış reaksiyon tesir kesiti verileri ile uyumu incelenmiştir. Görülmesi beklenen  $(\gamma,n)$  reaksiyonlarına ait olan  $90^\circ$ 'lik pikleşme  $^{90}\text{Zr}(\gamma,n)$  reaksiyonunda net olarak gözlenmektedir.

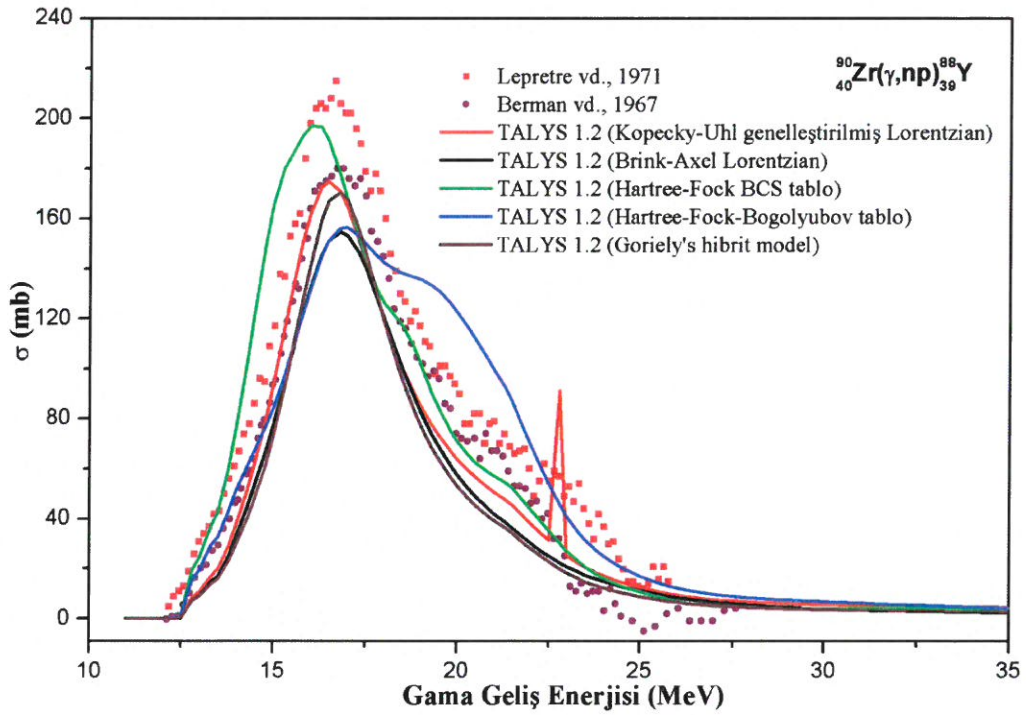


Şekil 4.7.  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği için  $(\gamma,n)$  reaksiyonu tesir kesiti

Gama kuvvet fonksiyon modellerinin hepsi de üst üste çakışmakta iken; Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modeli maksimum pikten sonra şekilsel olarak farklılık göstermektedir. Bunun yanın da üst üste çakışan modellerin maksimum pik değerleri farklı değerlerdedir. Özellikle Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian, Brink-Axel Lorentzian, Goriely's hibrit model tümüyle birbirleriyle örtüşmektedir. Bu örtüşmeyi Lepretre vd., 1971 yılına ait deneysel verilerin uygunluğu da kuvvetlendirmektedir. Berman vd., 1967 yılına ait deneysel veriler ise maksimum pik değerine kadar ve maksimum pik değerinde Hartree-Fock-Bogolyubov tablo modeli ile oldukça uyum gösterirken; maksimum pik değerinden sonra Hartree-Fock-Bogolyubov tablo model haricindeki dört modelin hepsiyle de birebir uyum göstermektedir. Gama kuvvet fonksiyon modellerini karşılaştırdığımızda Hartree-Fock BCS tablo modelin maksimum pik değerinin diğer modellere göre daha yüksek olduğunu görmekteyiz.

#### 4.1.3.2 $^{90}\text{Zr}(\gamma, np)^{88}\text{Y}$ Reaksiyonu toplam tesir kesiti hesaplaması

$^{90}\text{Zr}$  için elde edilen fotonötronproton toplam tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.8'de verilmiştir. Burada hedef  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeğine gama parçacığı yollanarak, 10-100 MeV enerji bölgesinde TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti ve mevcut deneysel veriler (Lepretre vd., 1971, Berman vd., 1967) ile uyumu incelenmiştir.



Şekil 4.8.  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği için  $(\gamma, np)$  reaksiyonu tesir kesiti

Gama kuvvet fonksiyonuna ait tüm modeller şekil olarak birbirleriyle uyumlu görülürken; maksimum pik değerleri birbirlerinden farklıdır. Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian modelde 22,8 MeV enerji değerinde 91,30mb değerinde büyük dipol rezonanstan (GDR) kaynaklanabileceğini düşündüğümüz bir pik görülmektedir. Hem Lepretre vd., 1971 yılına ait deneysel veriler hem de Berman vd., 1967 yılına ait deneysel veriler tüm modeller ile uyumlu görülmekte iken; Lepretre vd., 1971 deneysel verileri Hartree-Fock BCS tablo model ile Berman vd., 1967 yılına ait deneysel veriler ise Brink-Axel Lorentzian, Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian, Goriely's hibrit model ile daha iyi uyum göstermektedir. Özellikle ise Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian



model ile daha iyi uyumludur. Modeller açısından karşılaştırma yaptığımızda Hartree-Fock BCS tablo modelin maksimum pik değerinin diğer modellere kıyasla daha yüksek olduğunu görmekteyiz.

## 4.2 Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti Hesaplamaları

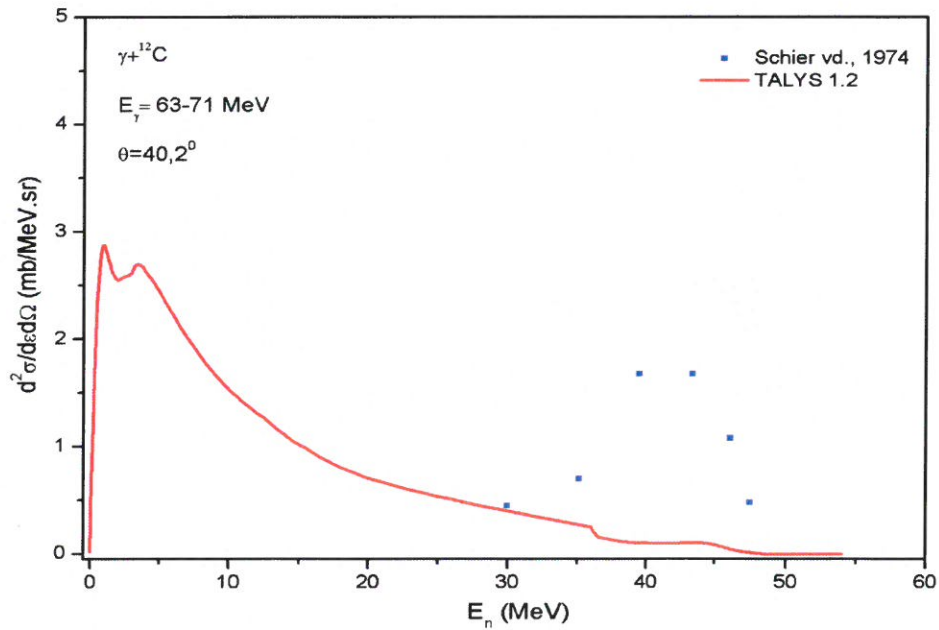
### 4.2.1 $^{12}\text{C}$ Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti Hesapları

#### 4.2.1.1 $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ Reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti hesaplamaları

##### 4.2.1.1.1 $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=63\text{-}71$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.1.1 $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

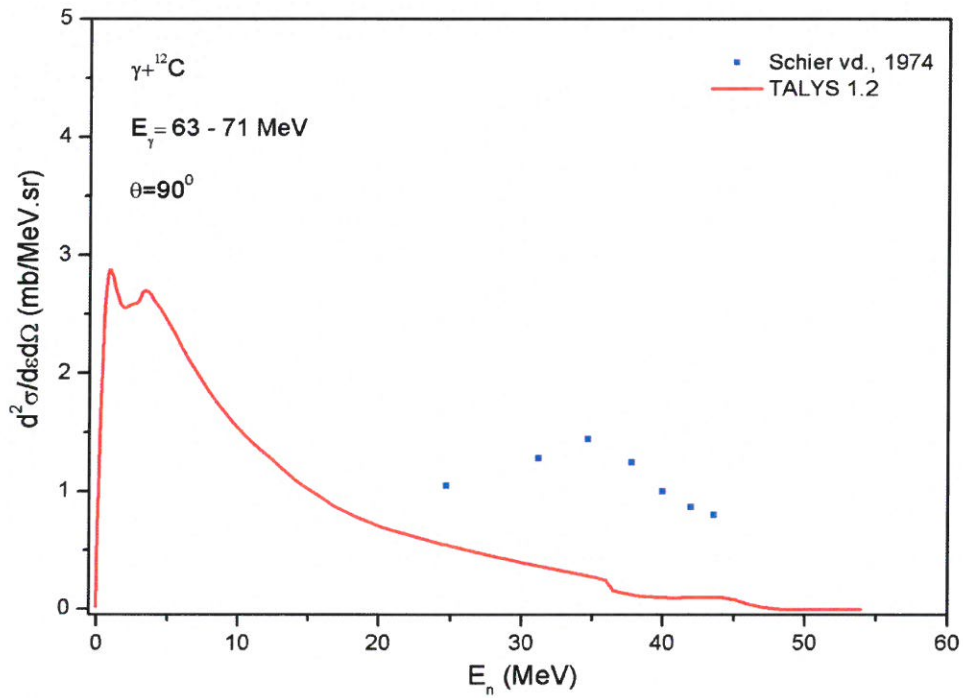
$^{12}\text{C}$  için 63-71 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9'da hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 63-71 MeV enerji aralığındaki enerjilerde gama parçacığı yollanarak,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Artan enerji değeriyle birlikte gözlenen düşüş yaklaşık 40 MeV enerji bölgesine kadar devam etmektedir. Deneyisel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında 40 MeV'den sonra dedektör farklılığından kaynaklı uyumsuzluk görülmektedir.



Şekil 4.9.  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.1.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

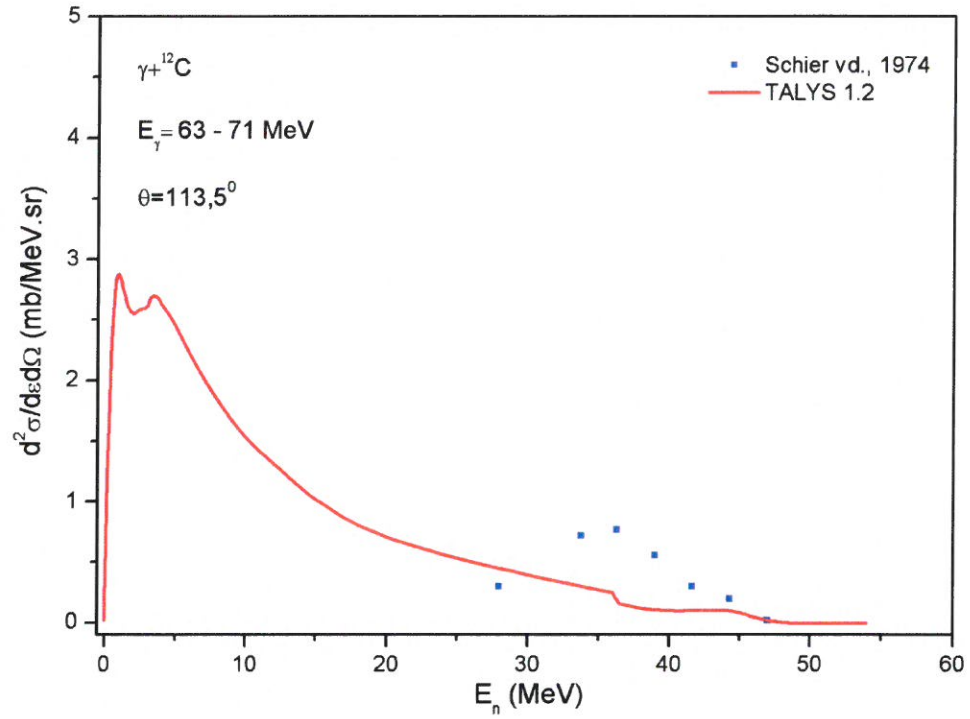
63-71 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'da 63-71 MeV enerji değerine sahip gama parçacıkları hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine yollanarak,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.  $40,2^\circ$  açındaki görülen benzer durumlar  $90^\circ$  açı değerinde de karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.10.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.1.3 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

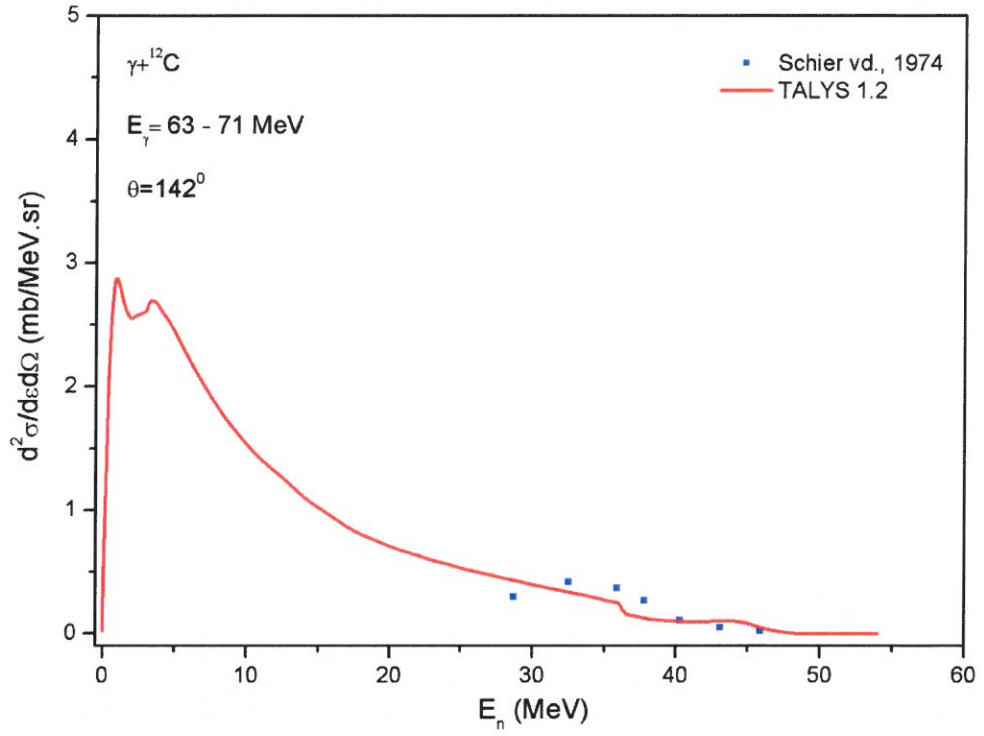
$^{12}\text{C}$  için 63-71 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 63-71 MeV enerji aralığında gama parçacıkları yollanarak,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.11.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.1.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

63-71 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12'de 63-71 MeV enerji aralığına sahip gama parçacıkları hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine yollanarak,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Diğer açı değerlerinde görülen benzerliği bu açı değerinde de görmek mümkündür.



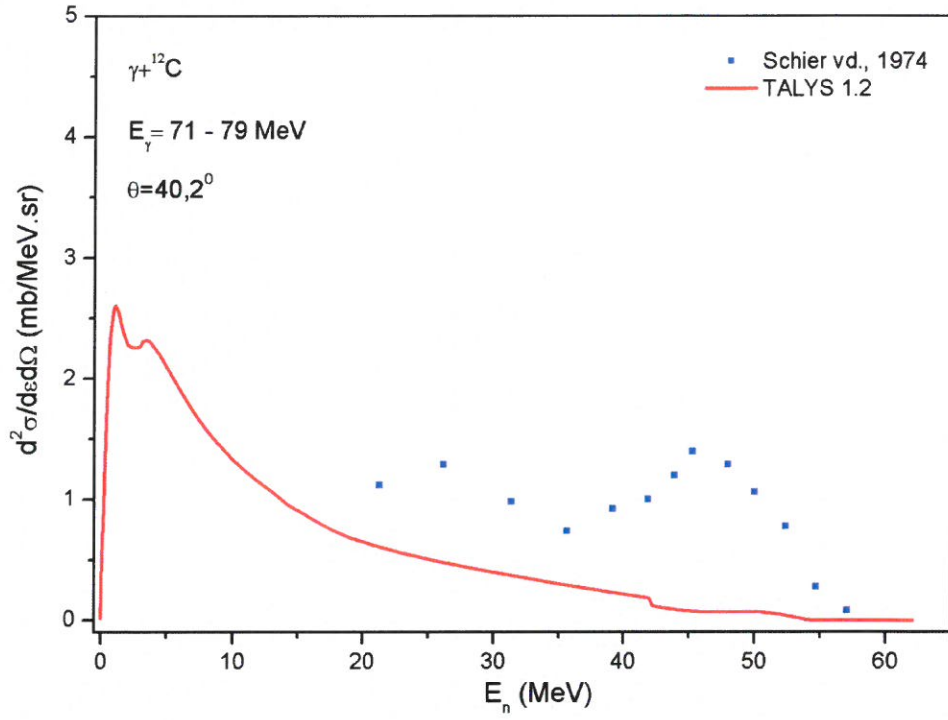
Şekil 4.12.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=71-79$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.2.1 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için 71-79 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekil 4.13'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı yollanarak,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Artan enerji değeriyle birlikte gözlenen düşüş yaklaşık 50 MeV bölgesine kadar devam etmektedir. Bununla birlikte deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları arasında dedektör farklılığından dolayı uyumsuzluk göze çarpmaktadır.

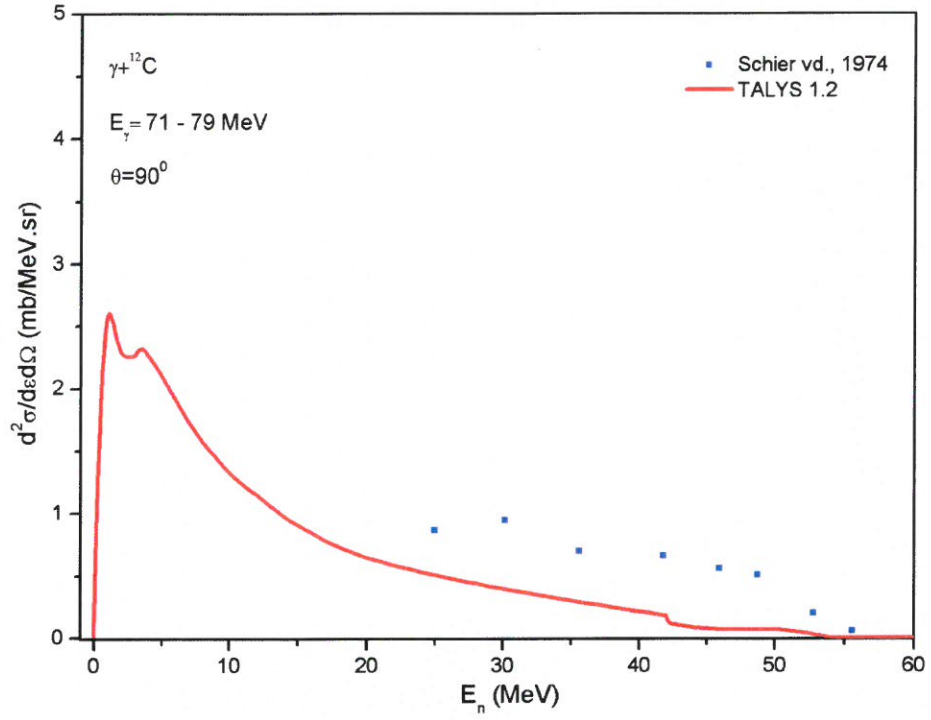




Şekil 4.13.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.2.2 ${}^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

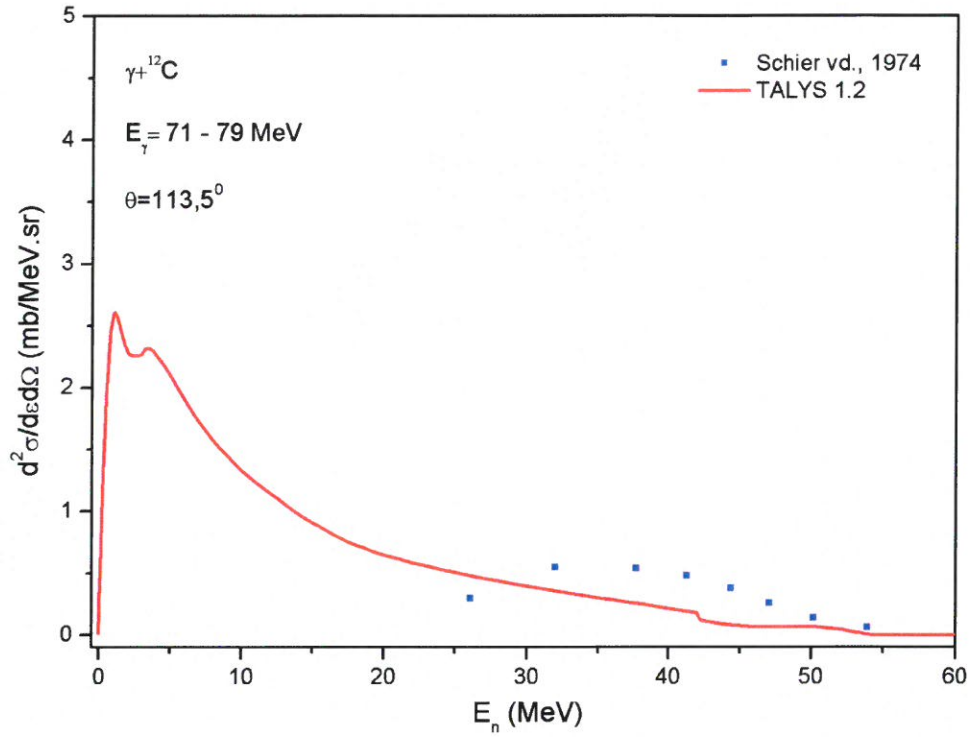
71-79 MeV enerji aralığında  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.14'de verilmiştir. Şekil 4.14'de 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilmesi sonucu  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.14.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.2.3 ${}^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

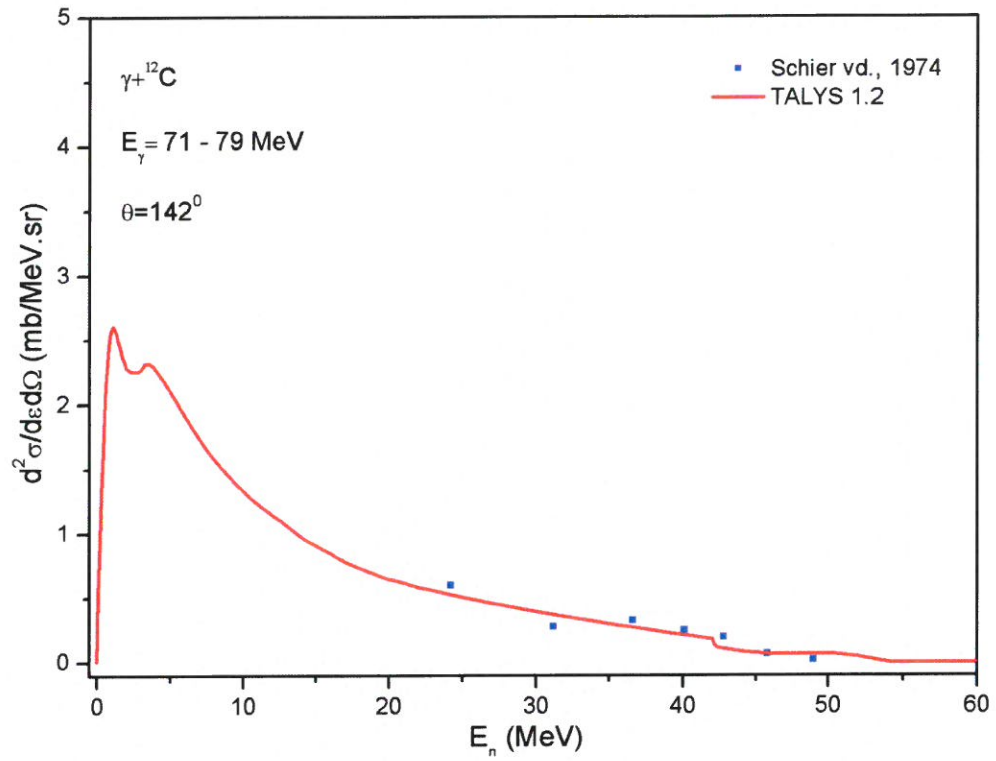
${}^{12}\text{C}$  için 71-79 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonuç Şekil 4.15’de verilmiştir. Şekil 4.15’de hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında uyum, diğer açılarda görülen uyuma nazaran daha belirgindir.



Şekil 4.15.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.2.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

71-79 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.16'da 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 25 MeV enerji değerinden sonra deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında uyum gözlenmektedir.

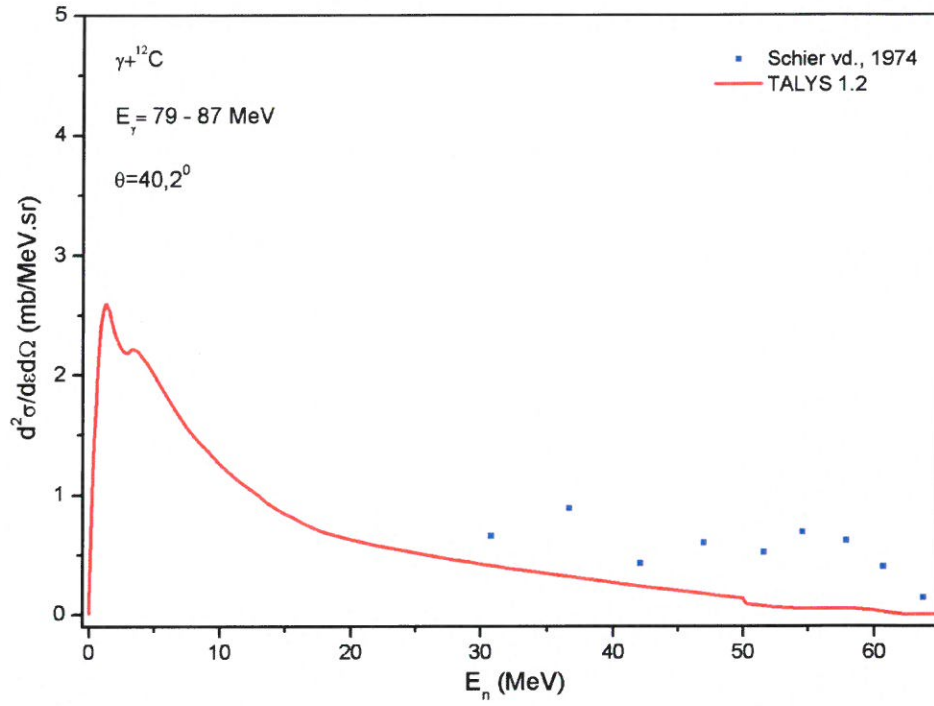


Şekil 4.16.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.3 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=79-87$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.3.1 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

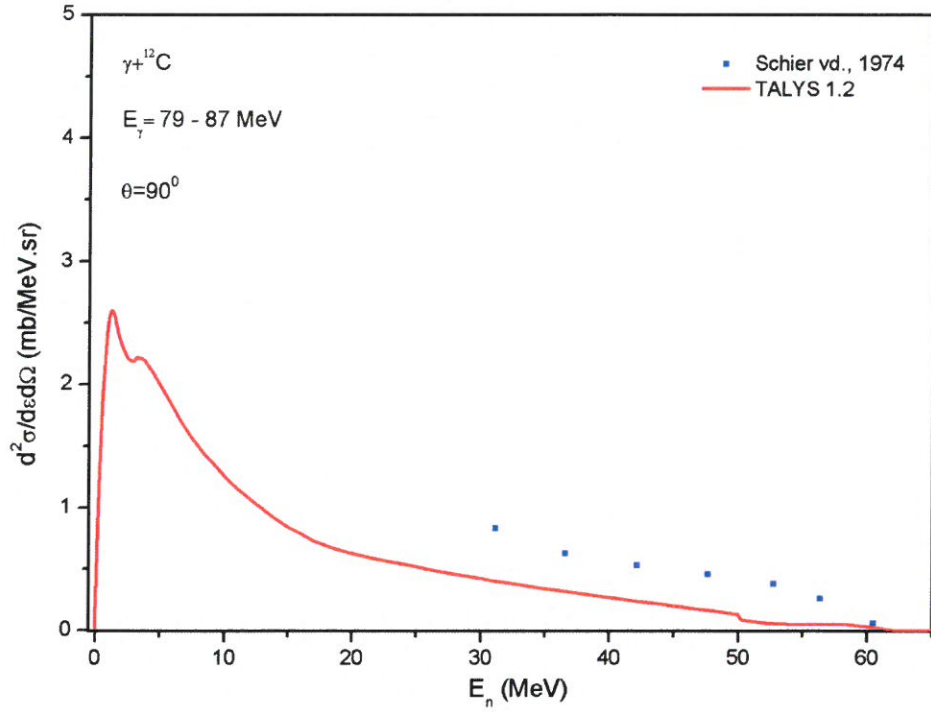
79-87 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.17'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.17.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.3.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

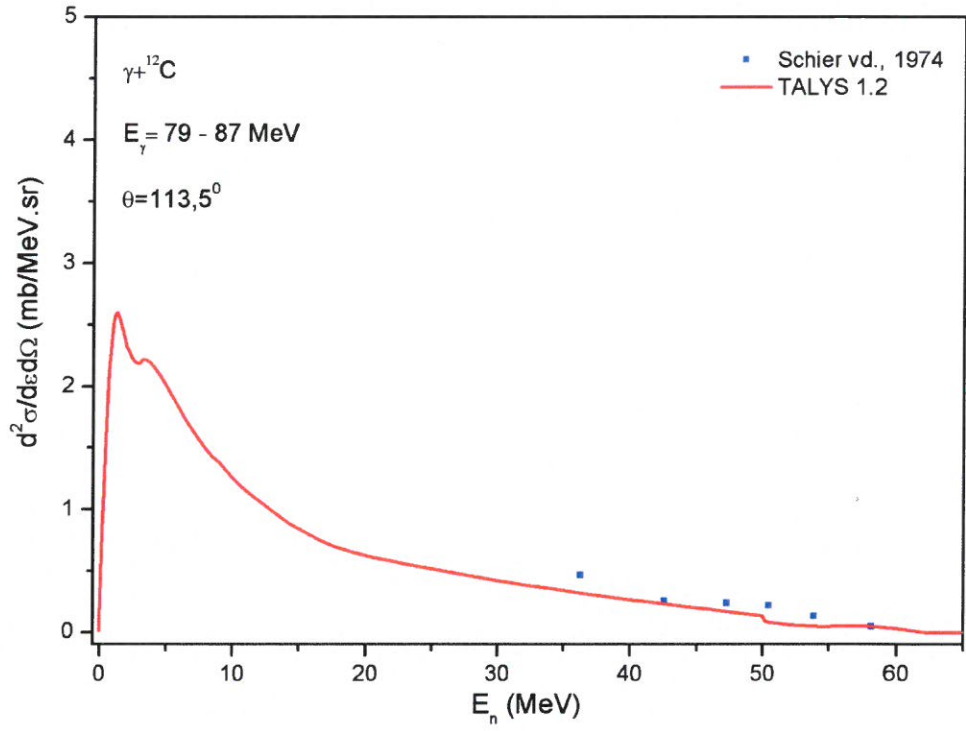
$^{12}\text{C}$  için 79-87 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.18'de 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 30-60 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile görülen mükemmel uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.18.  ${}^{12}\text{C}(\gamma, n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.3.3 ${}^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

79-87 MeV enerji aralığında  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19'da hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 36-59 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile mükemmel uyum görülmektedir.

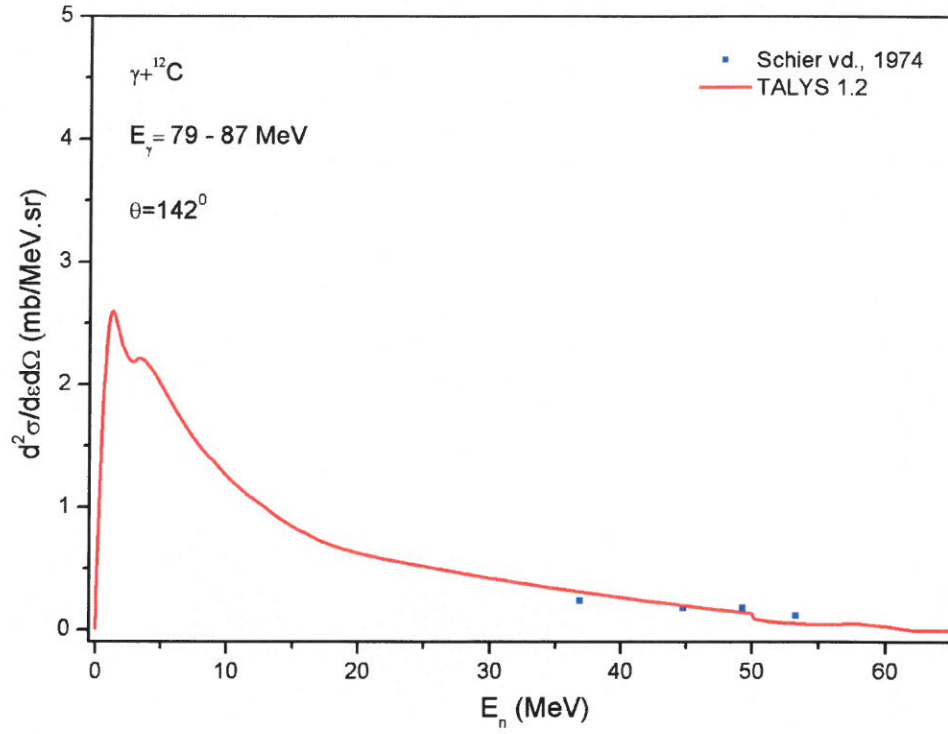


Şekil 4.19.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.3.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

79-87 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.20'de 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile görülen uyum göze çarpmaktadır.



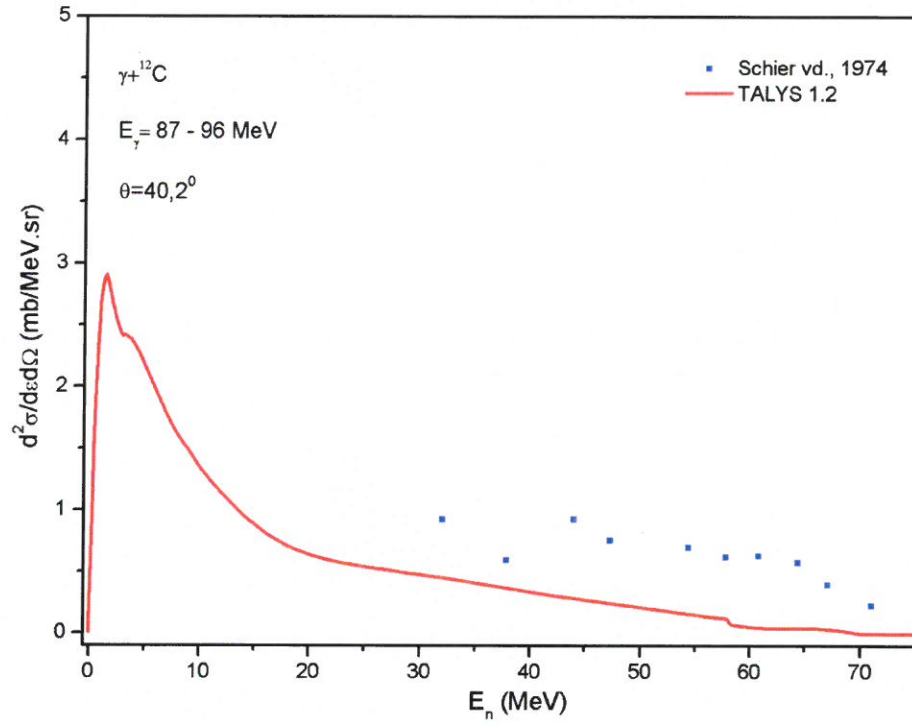


Şekil 4.20.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=87-96$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.4.1 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

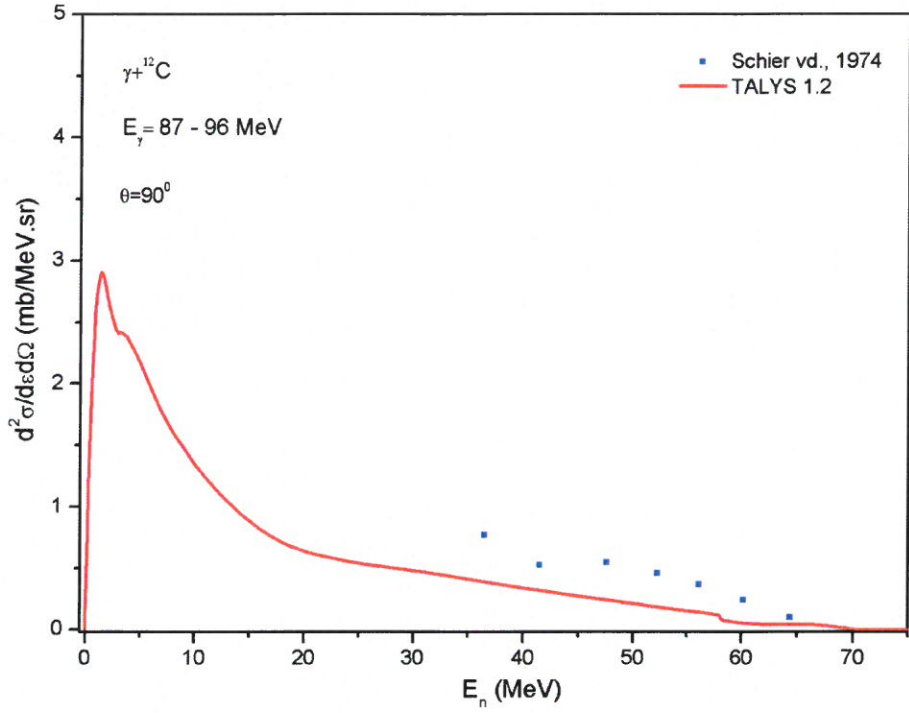
$^{12}\text{C}$  için 87-96 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.21'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 87-96 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Bu açı değerinde deneysel veriler ile şekilsel uyum, deneyin yapıldığı tarihteki dedektörlerin şu anda kullanılan dedektörlerle olan farklılığından dolayı tam olarak yakalanamamıştır.



Şekil 4.21.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 87-96 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.4.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

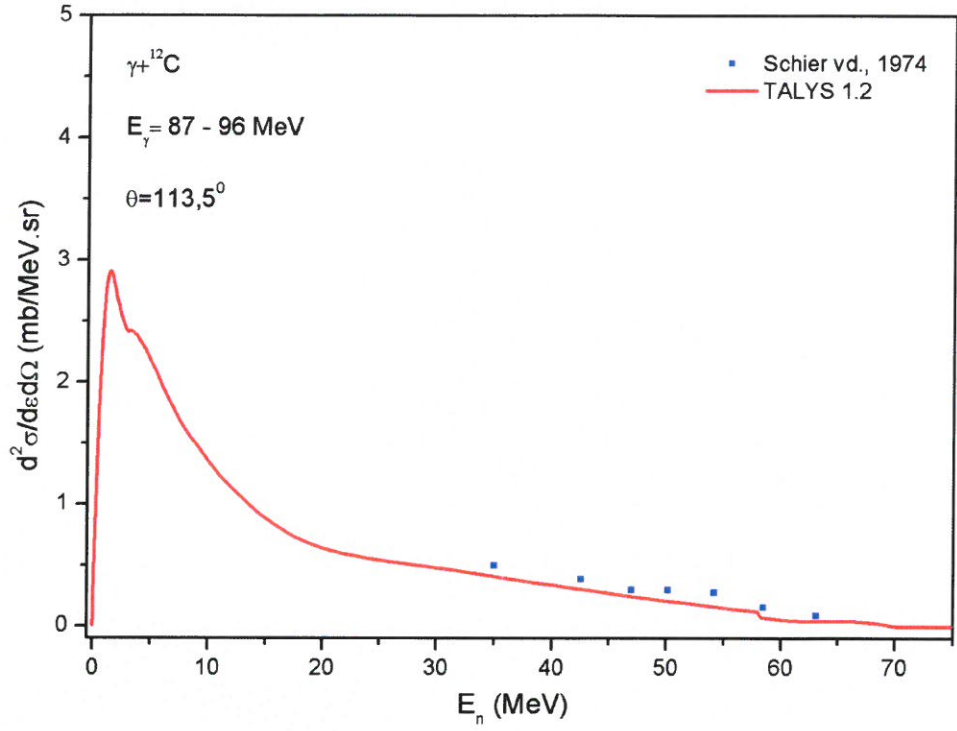
87-96 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekil 4.22'de 87-96 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 36-65 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.22.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 87-96 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.4.3 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

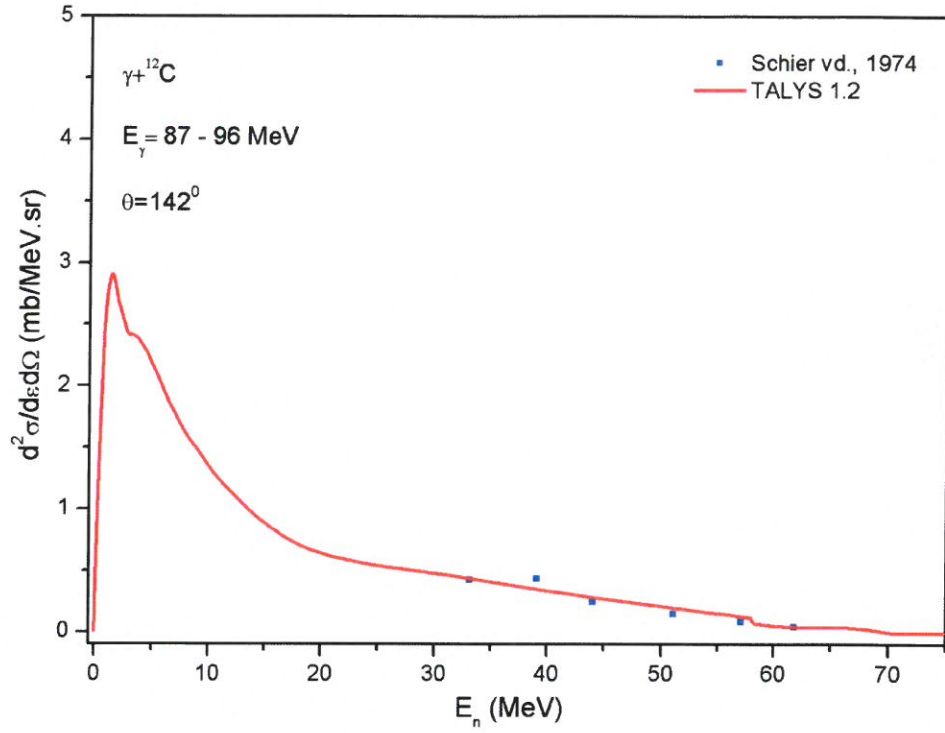
$^{12}\text{C}$  için 87-96 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.23'de verilmiştir. Şekil 4.23'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 87-96 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 35-63 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile mükemmel uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.23.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 87-96 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.4.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

87-96 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.24'de verilmiştir. Şekil 4.24'de 87-96 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 33-61 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile mükemmel uyum şekilden görülmektedir.

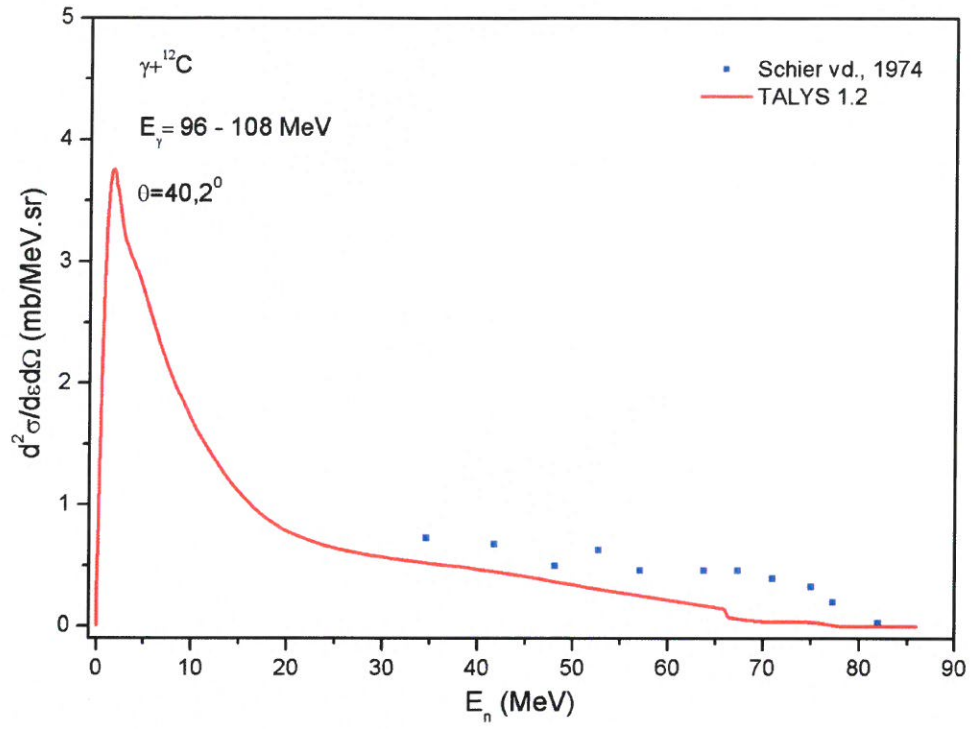


Şekil 4.24.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 87-96 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.5 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=96-108$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.5.1 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için 96-108 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.25'de verilmiştir. Şekil 4.25'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 96-108 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 34-57 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları uyumlu görülmektedir.

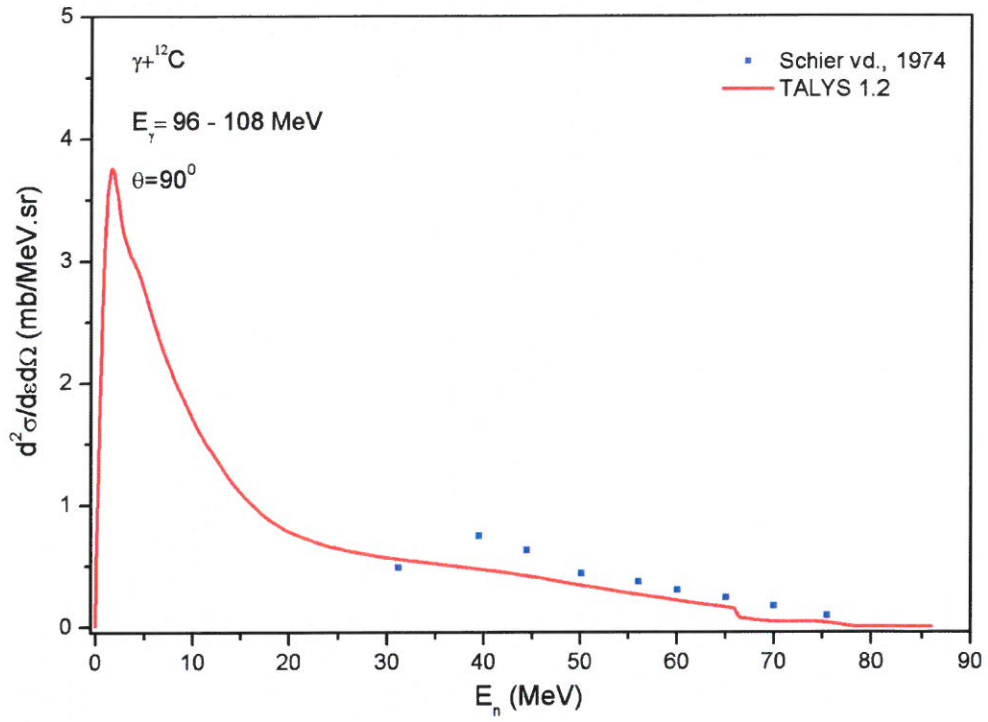


Şekil 4.25.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 96-108 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.5.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

96-108 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.26'da 96-108 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 39-75 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının birbirleriyle olan mükemmel uyumu göze çarpmaktadır.



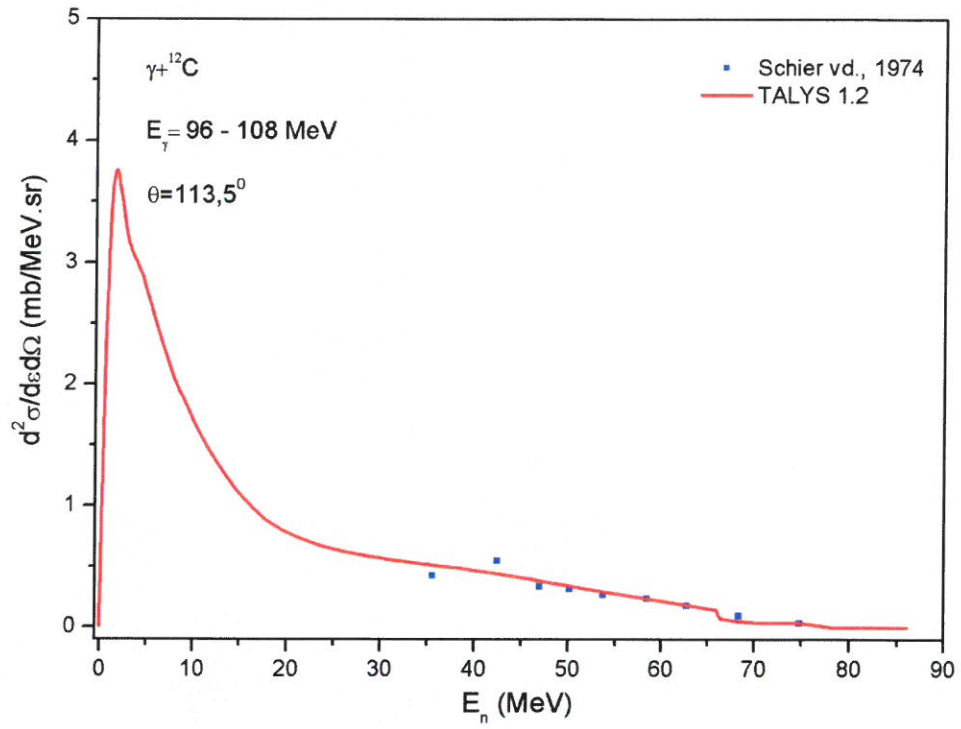


Şekil 4.26.  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  reaksiyonu 96-108 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.5.3 $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için 96-108 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.27'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 96-108 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 35-75 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları birbirleriyle birebir uyumlu görülmektedir.

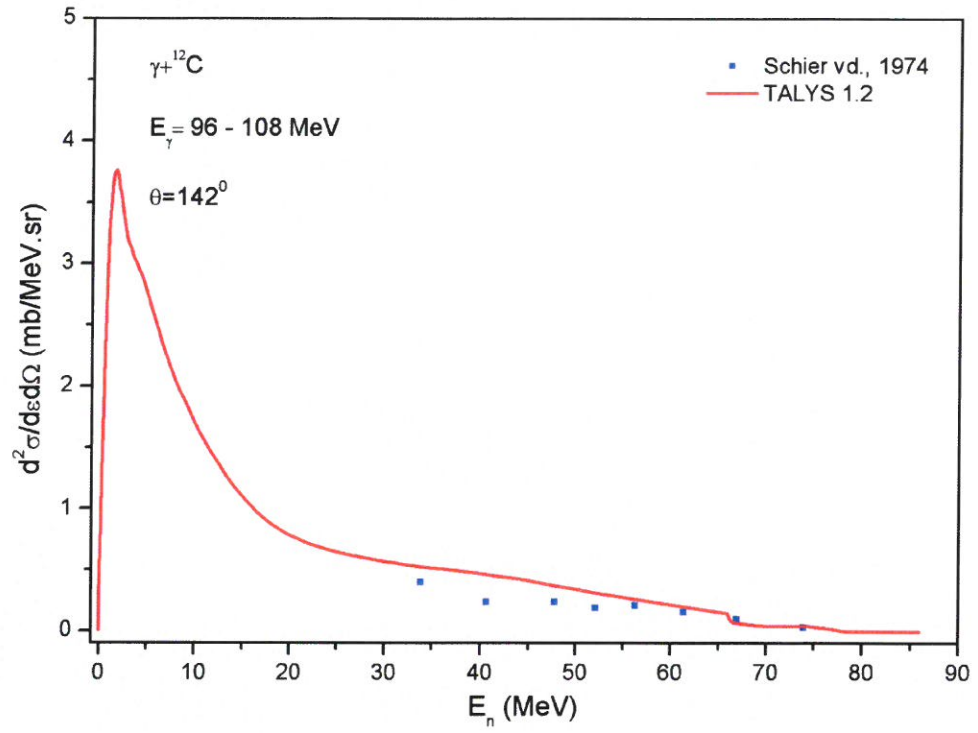




Şekil 4.27.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 96-108 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.5.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

96-108 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekil 4.28'de 96-108 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yaklaşık 33-74 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları birbirleriyle uyumludur.

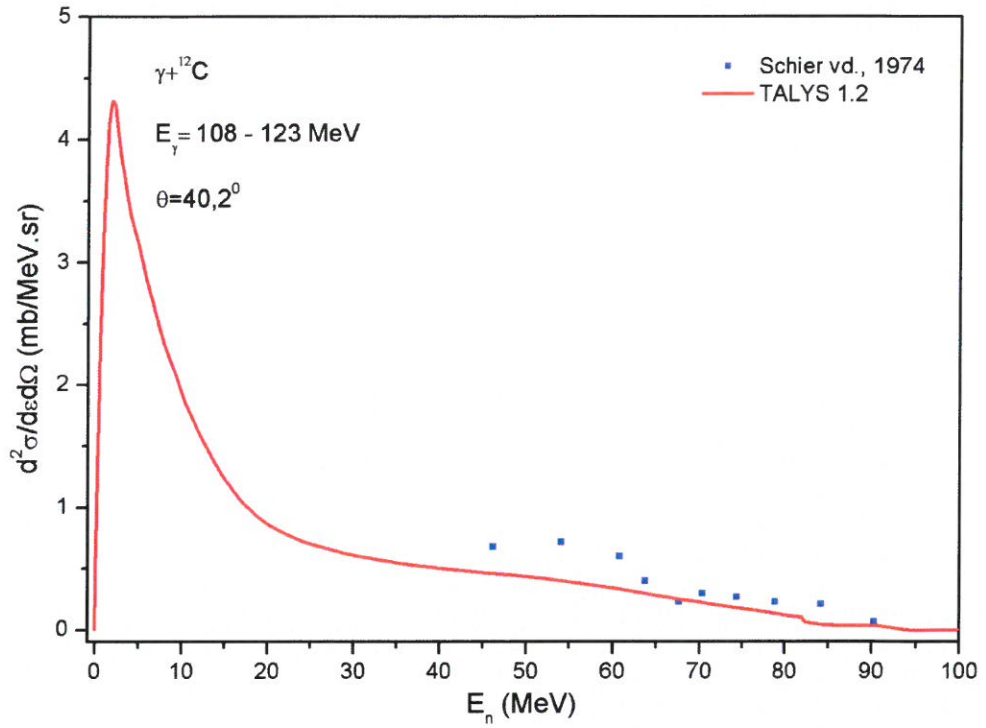


Şekil 4.28.  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  reaksiyonu 96-108 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.6 $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $E_\gamma = 108-123$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.1.1.6.1 $^{12}\text{C}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta = 40,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

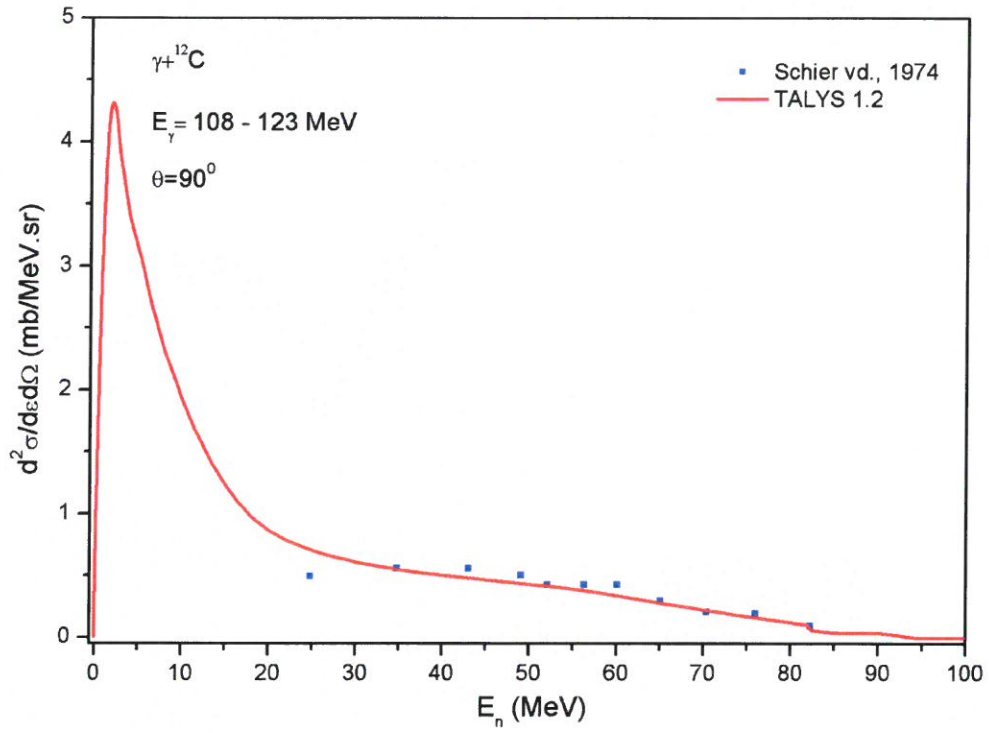
$^{12}\text{C}$  için 108-123 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.29'da hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 108-123 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 45-90 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının yaklaşık uyumluluğu göze çarpmaktadır.



Şekil 4.29.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 108-123 MeV  $40,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.6.2 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

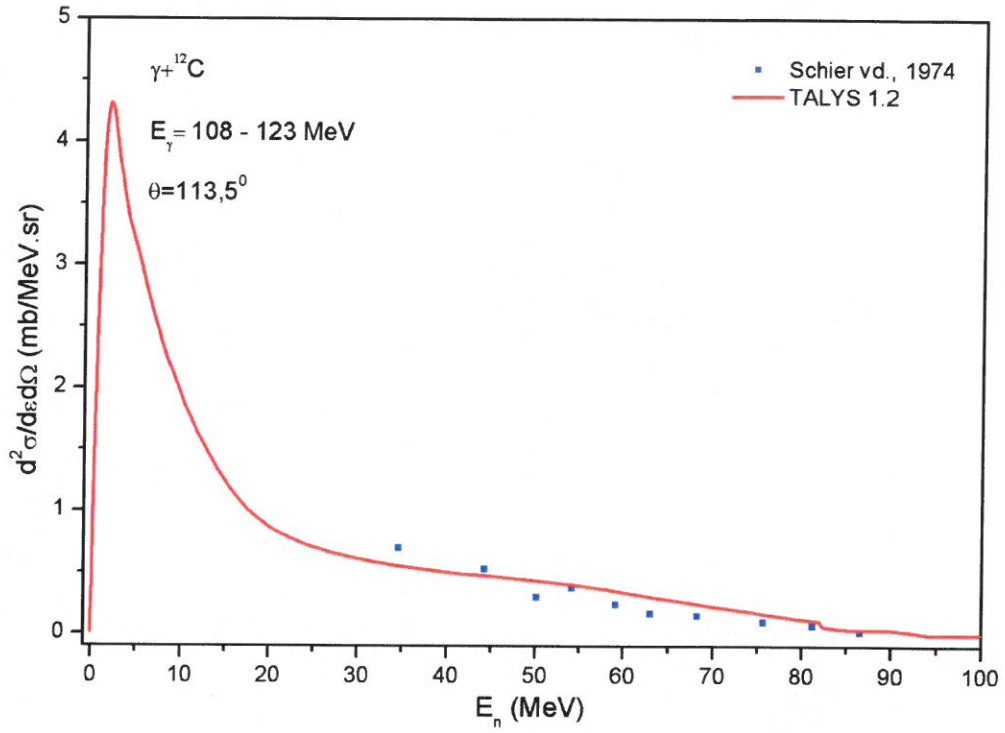
108-123 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.30'da verilmiştir. Şekil 4.30'da 108-123 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 24-82 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının birbirleriyle mükemmel uyumu göze çarpmaktadır.



Şekil 4.30.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 108-123 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.6.3 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

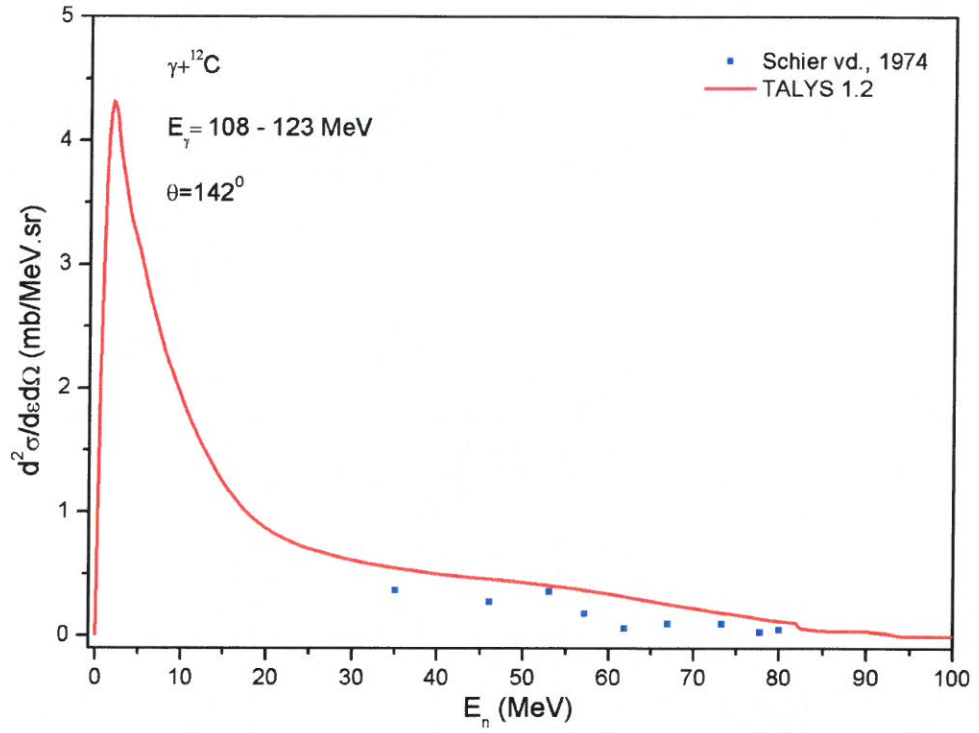
$^{12}\text{C}$  için 108-123 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.31'de verilmiştir. Şekil 4.31'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 108-123 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 35-87 MeV enerji aralığında deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının birebir uyumluluğu söz konusudur.



Şekil 4.31.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 108-123 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.1.6.4 $^{12}\text{C}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142^\circ$ açıda DDX hesaplaması

108-123 MeV enerji aralığında  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.32'de verilmiştir. Şekil 4.32'de 108-123 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının şekilsel uyumu görülmektedir.



Şekil 4.32.  $^{12}\text{C}(\gamma,n)$  reaksiyonu 108-123 MeV  $142^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

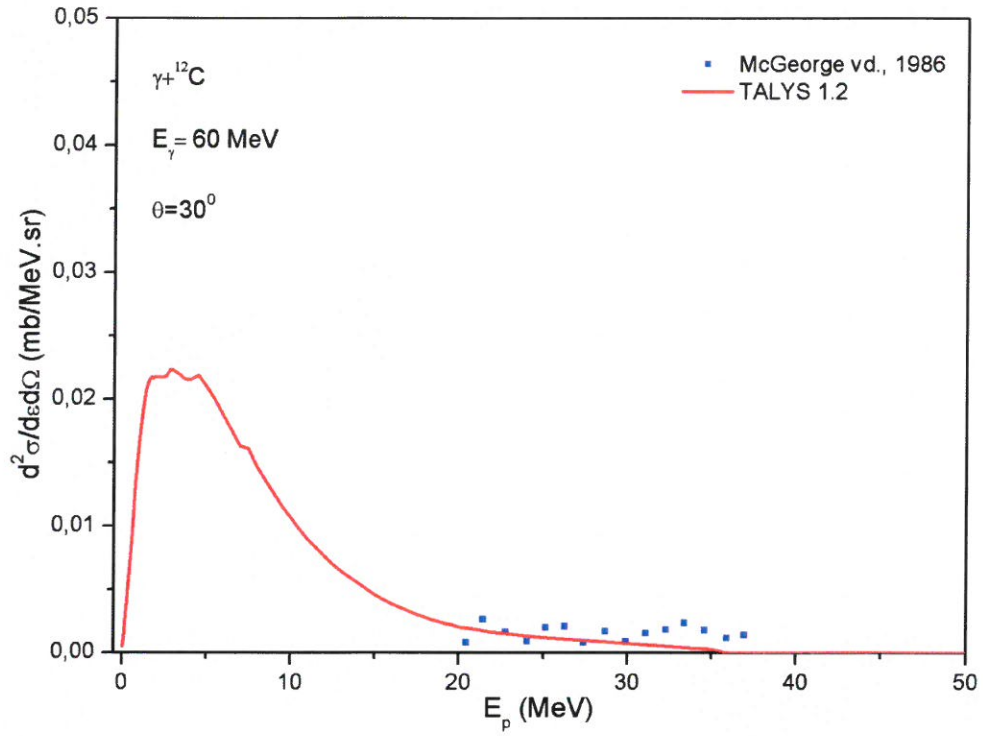
#### 4.2.1.2 $^{12}\text{C}(\gamma,p)^{11}\text{B}$ Reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti hesaplamaları

##### 4.2.1.2.1 $^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $E_\gamma=60$ MeV enerjide DDX hesaplaması

##### 4.2.1.2.1.1 $^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=30^\circ$ açıda DDX hesaplaması

60 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.33'de verilmiştir. Şekil 4.33'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $30^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 20-37 MeV enerji aralığında deneysel verilerin bazıları ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel uyum söz konusudur.



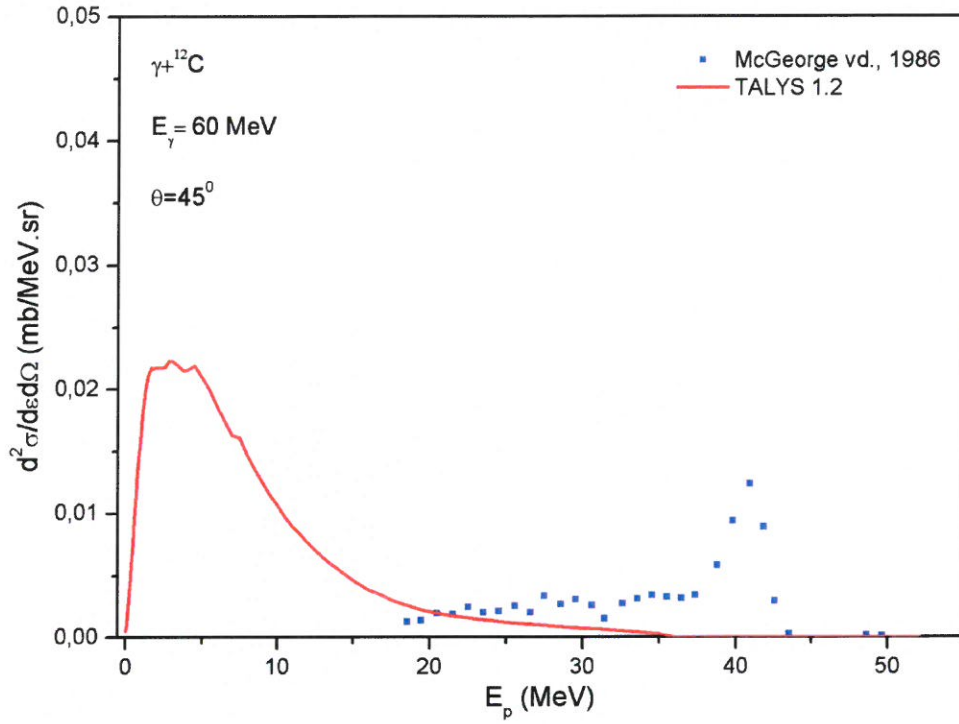


Şekil 4.33.  ${}^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 60 MeV  $30^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.2 ${}^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=45^\circ$ açıda DDX hesaplaması

${}^{12}\text{C}$  için 60 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.34'de verilmiştir. Şekil 4.34'de 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $45^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.  $30^\circ$  açıda görülen benzerlik  $45^\circ$  açıda da gözlenmektedir.

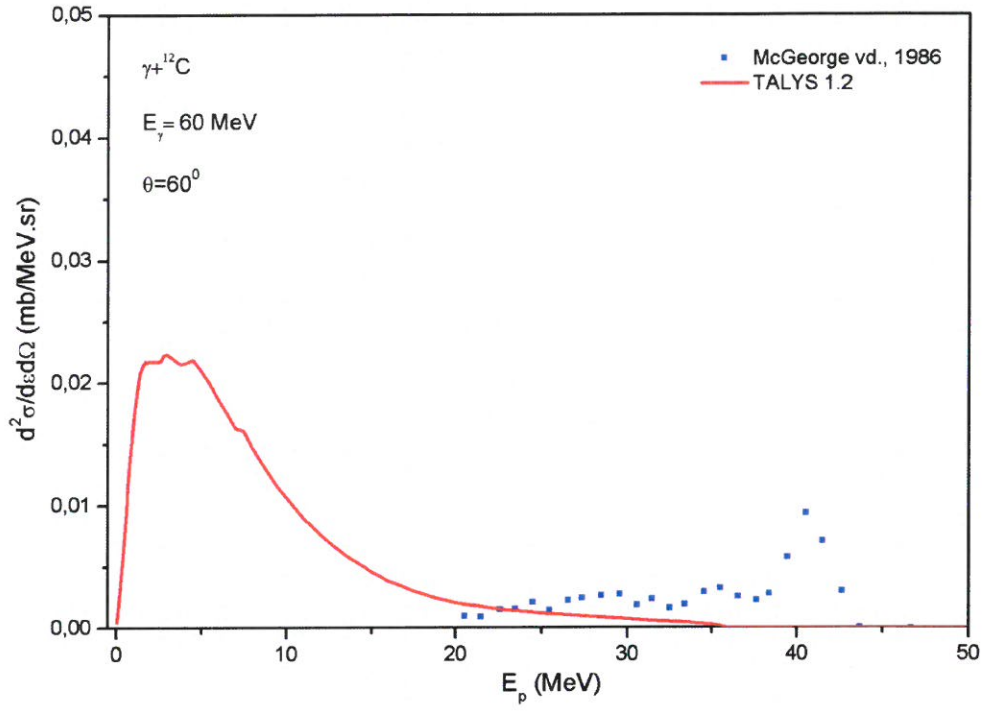




Şekil 4.34.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 60 MeV  $45^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.3 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=60^\circ$ açıda DDX hesaplaması

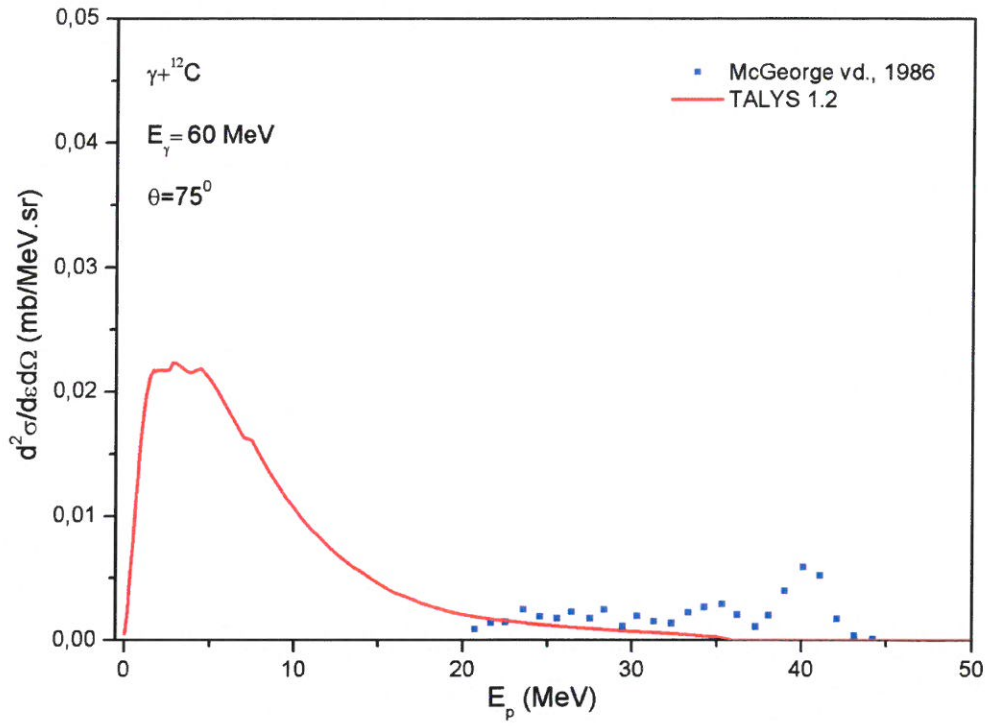
60 MeV enerji değerinde  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.35’de verilmiştir. Şekil 4.35’de hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $60^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.35.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 60 MeV  $60^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.4 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=75^\circ$ açıda DDX hesaplaması

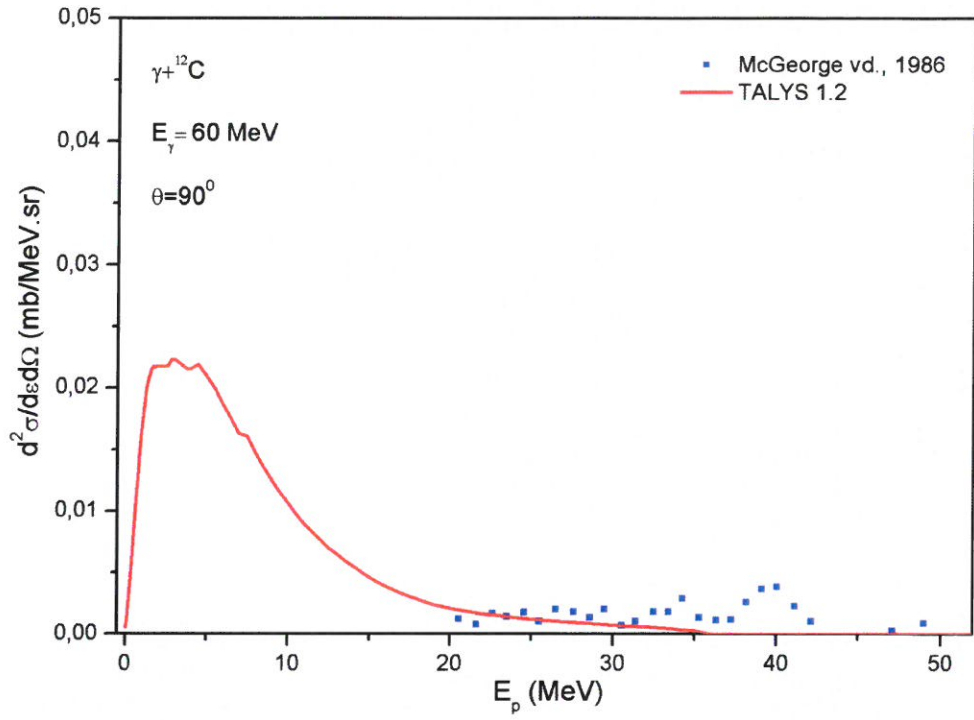
60 MeV enerji değerinde  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.36'da verilmiştir. Şekil 4.36'da 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $75^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.36.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 60 MeV  $75^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.5 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

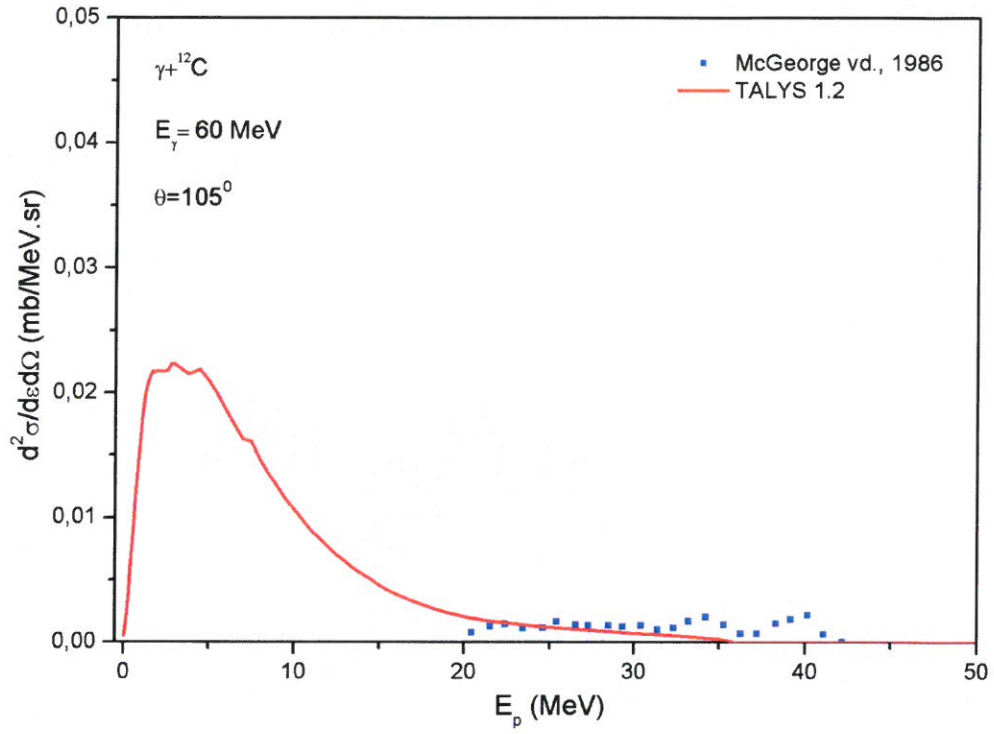
$^{12}\text{C}$  için 60 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.37’de verilmiştir. Şekil 4.37’de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.37.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 60 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.6 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=105^\circ$ açıda DDX hesaplaması

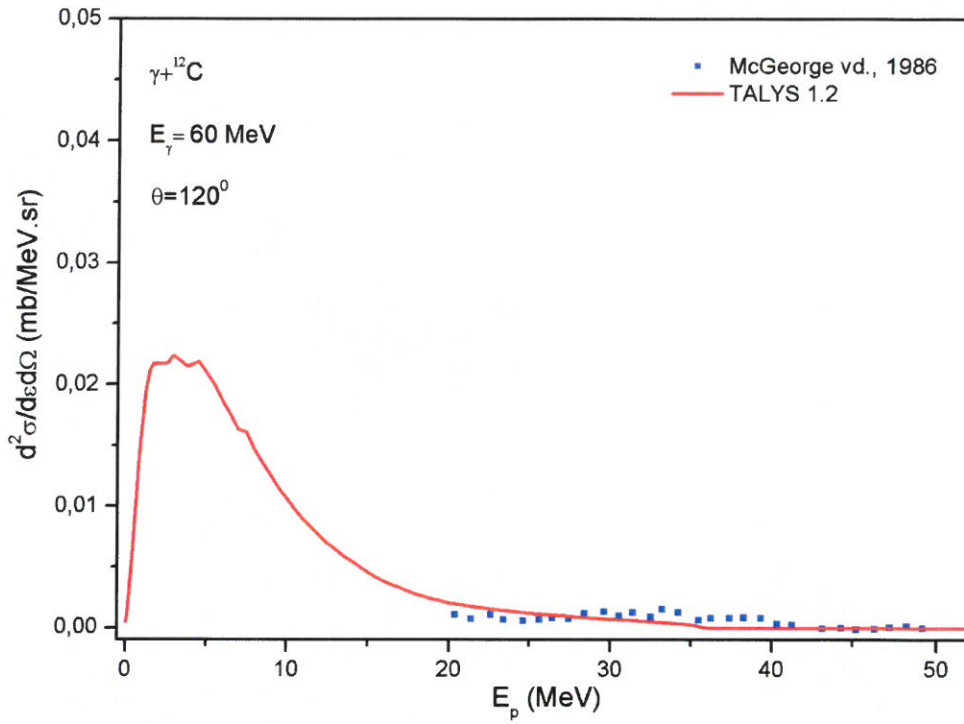
${}^{12}\text{C}$  için 60 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38’de 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $105^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.38.  ${}^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 60 MeV  $105^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.7 ${}^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=120^\circ$ açıda DDX hesaplaması

60 MeV enerji değerinde  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.39'da verilmiştir. Şekil 4.39'da hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $120^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.

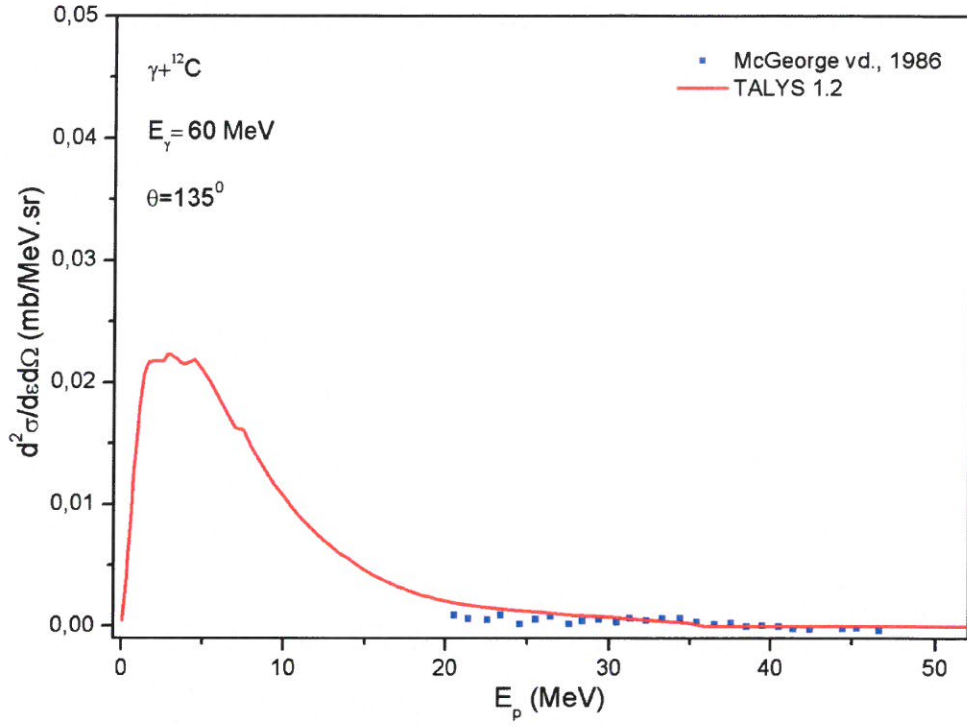


Şekil 4.39.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 60 MeV  $120^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.1.8 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=135^\circ$ açıda DDX hesaplaması

60 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.40'da verilmiştir. Şekil 4.40'da 60 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $135^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçlarının yaklaşık 22-47 MeV enerji aralığına kadar birebir uyumu söz konusudur.



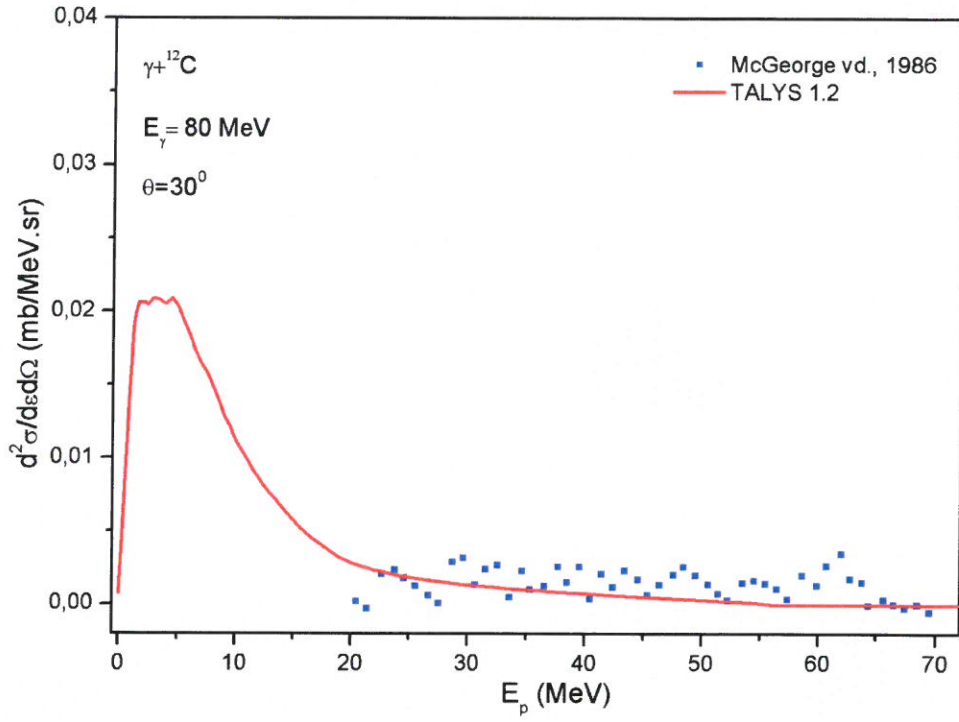


Şekil 4.40.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 60 MeV  $135^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $E_\gamma=80$ MeV enerjide DDX hesaplaması

##### 4.2.1.2.2.1 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=30^\circ$ açıda DDX hesaplaması

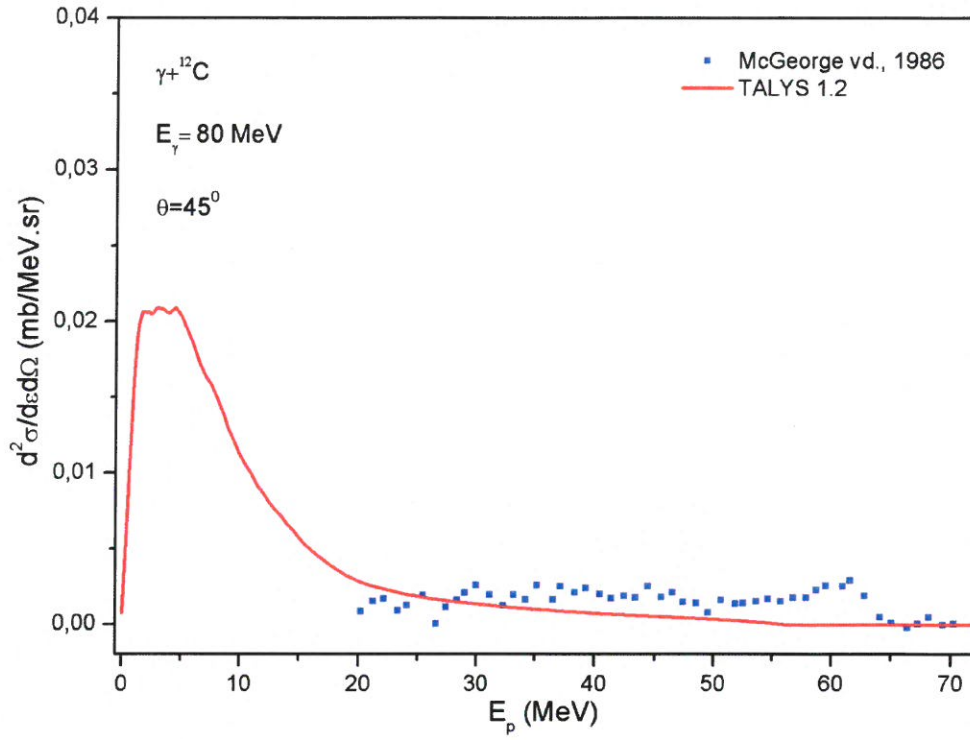
$^{12}\text{C}$  için 80 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.41'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $30^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.41.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 80 MeV  $30^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2.2 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=45^\circ$ açıda DDX hesaplaması

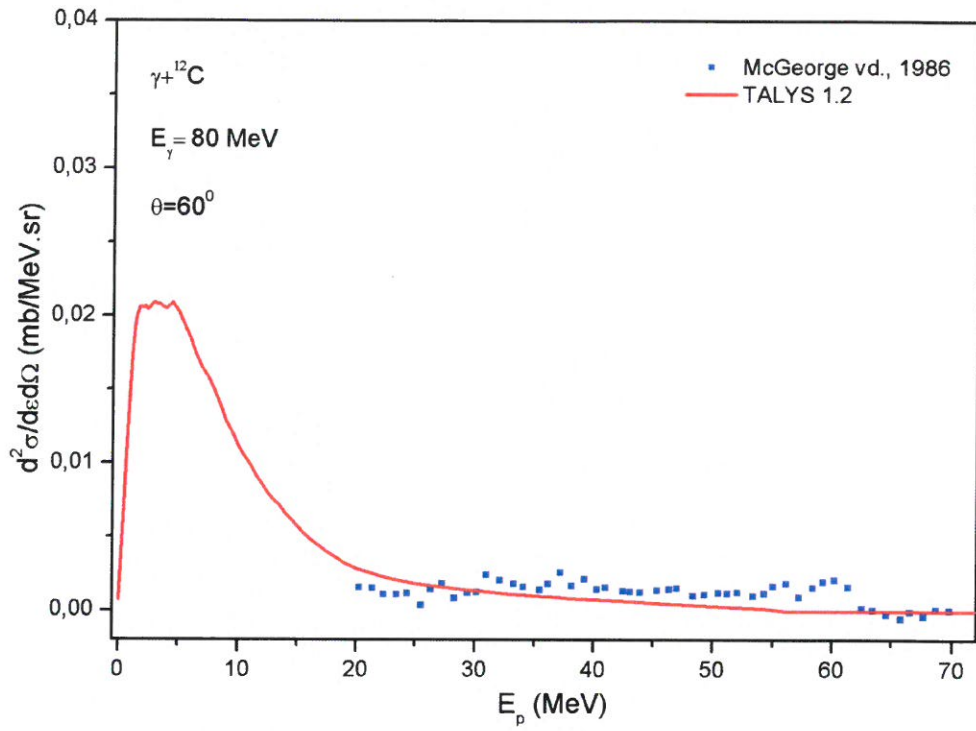
80 MeV enerji değerinde  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.42’de verilmiştir. Şekil 4.42’de 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $45^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel verilerin bazıları ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel uyum söz konusudur.



Şekil 4.42.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 80 MeV  $45^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2.3 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=60^\circ$ açıda DDX hesaplaması

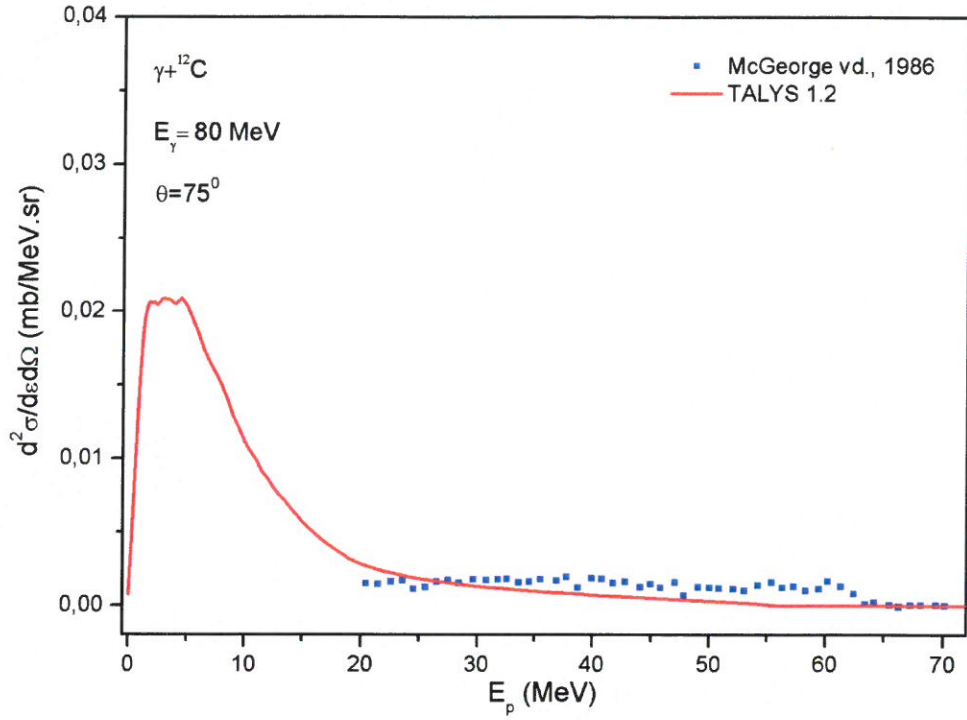
80 MeV enerji değerinde  ${}^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.43'de verilmiştir. Şekil 4.43'de hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $60^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel verilerin bazıları ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel uyum görülmektedir.



Şekil 4.43.  ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 80 MeV  $60^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2.4 ${}^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=75^\circ$ açıda DDX hesaplaması

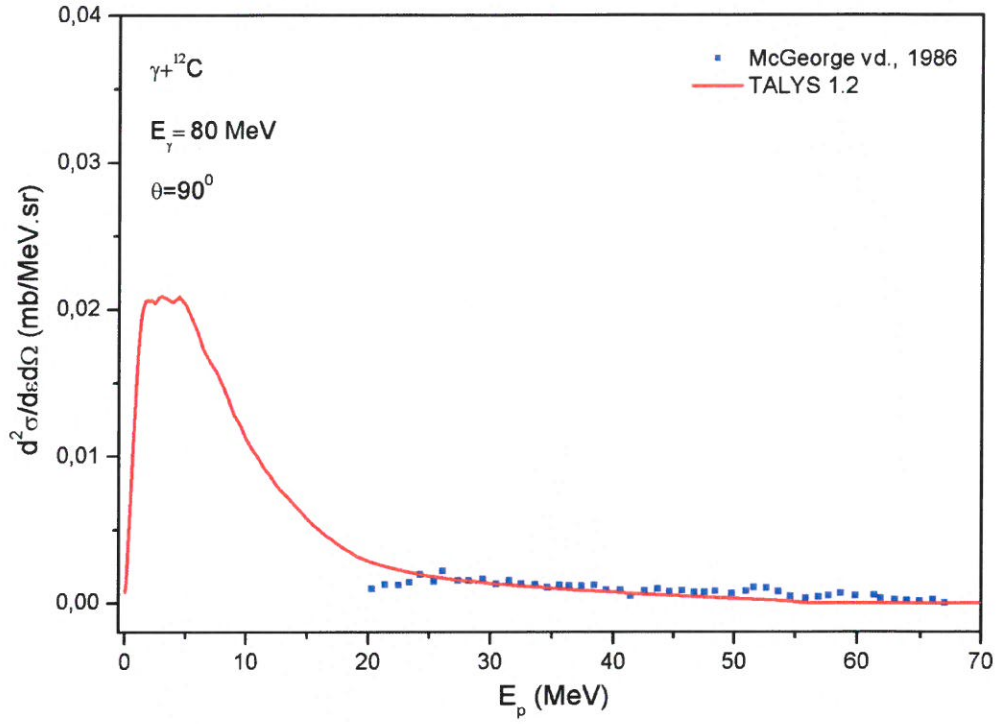
${}^{12}\text{C}$  için 80 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.44'de verilmiştir. Şekil 4.44'de 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  ${}^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $75^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel uyumu görmek mümkündür.



Şekil 4.44.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 80 MeV  $75^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2.5 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için 80 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.45'de verilmiştir. Şekil 4.45'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum göze çarpmaktadır.

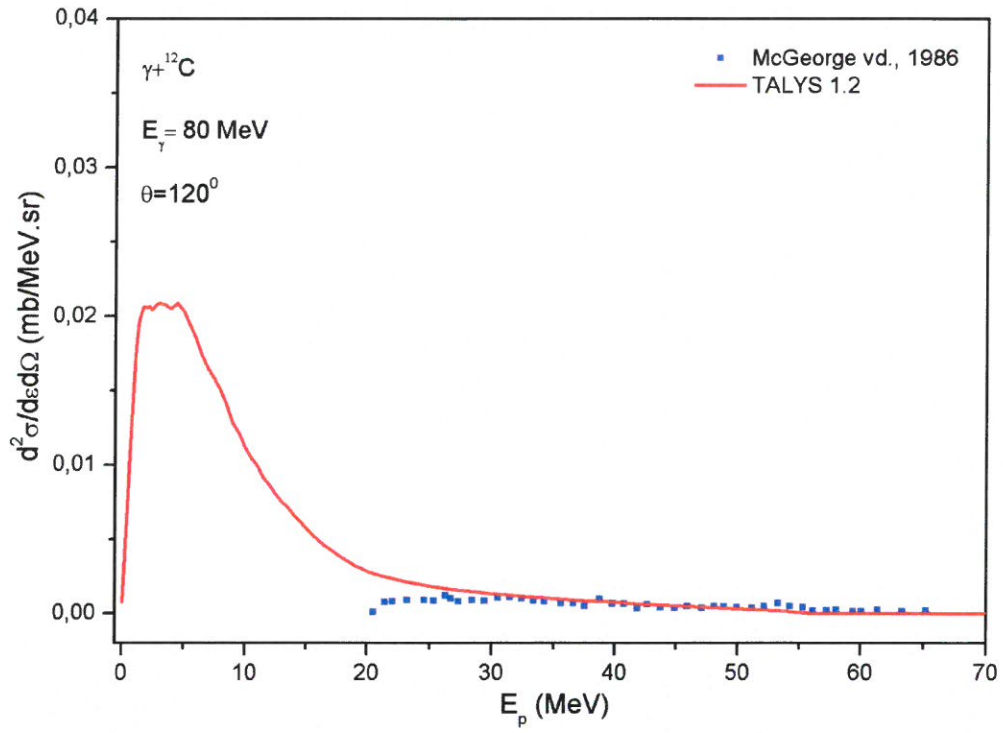


Şekil 4.45.  $^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 80 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.2.6 $^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=120^\circ$ açıda DDX hesaplaması

80 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.46'da verilmiştir. Şekil 4.46'da 80 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $120^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki mükemmel uyum şekilde görülmektedir.





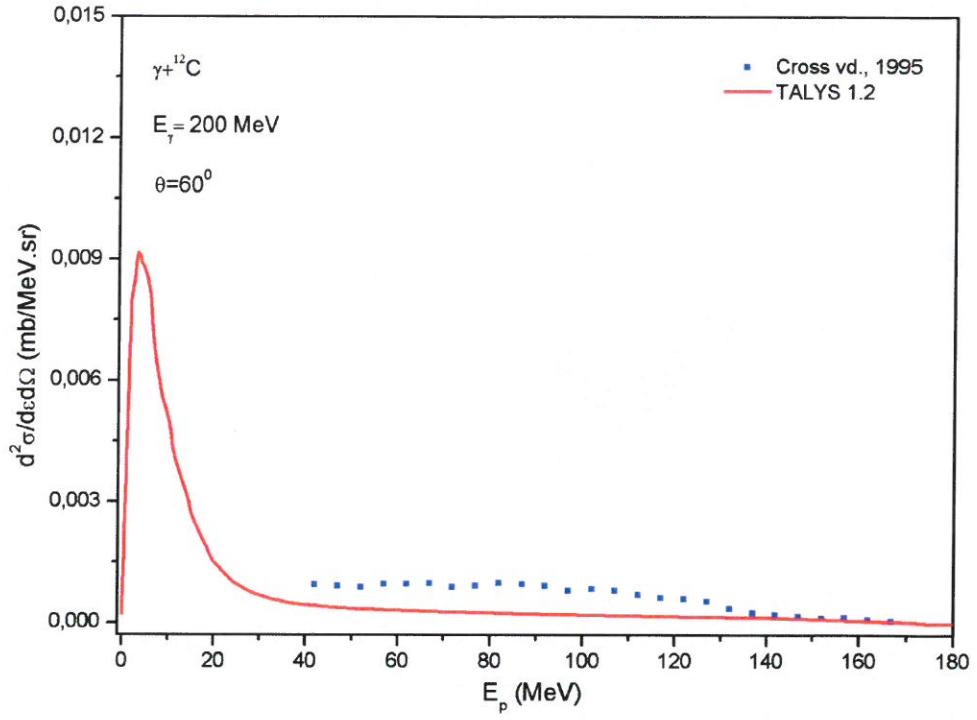
Şekil 4.46.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 80 MeV  $120^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.3 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $E_\gamma = 200$ MeV enerjide DDX hesaplaması

##### 4.2.1.2.3.1 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta = 60^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{12}\text{C}$  için 200 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.47'de verilmiştir. Şekil 4.47'de hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 200 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $60^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum şekilde görülmektedir.

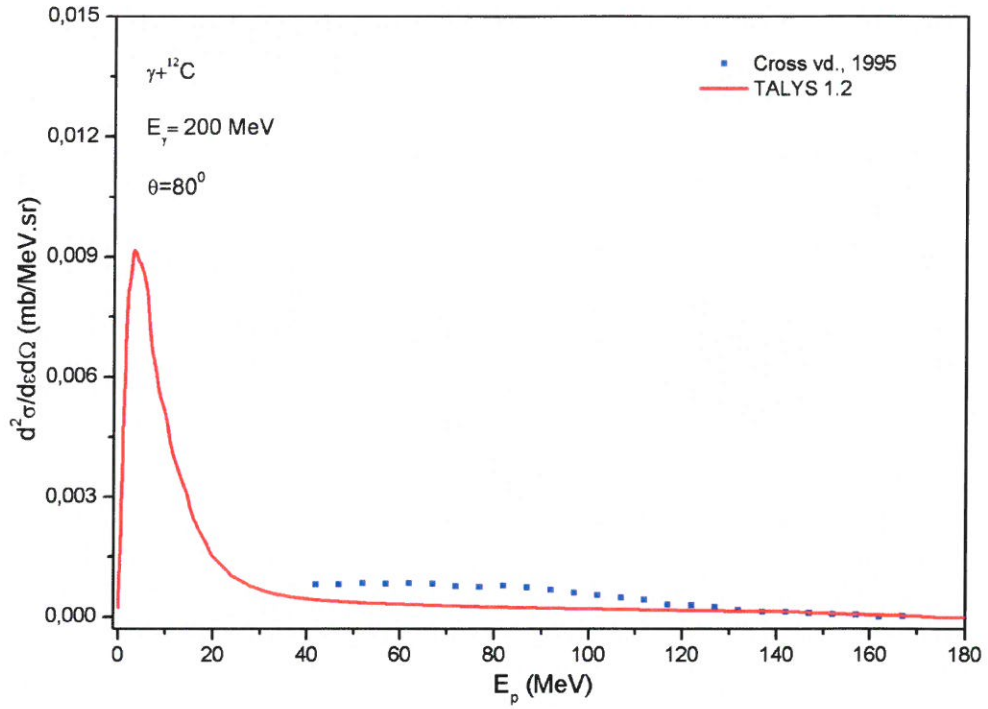




Şekil 4.47.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 200 MeV  $60^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.3.2 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=80^\circ$ açıda DDX hesaplaması

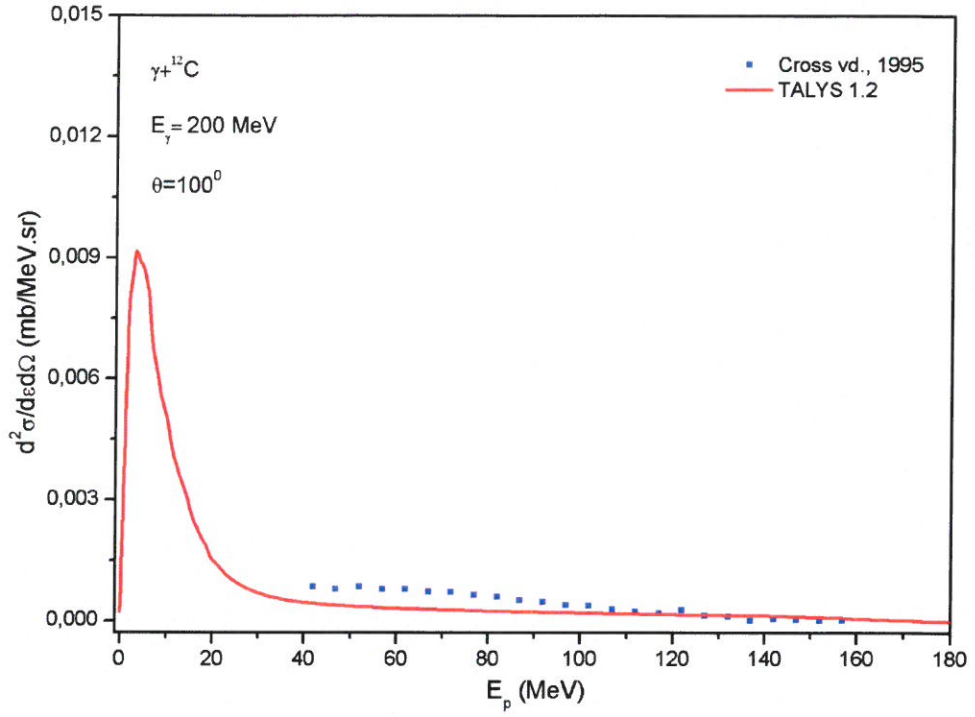
200 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.48'de verilmiştir. Şekil 4.48'de 200 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $80^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum 164 MeV enerji değerine kadar devam etmektedir.



Şekil 4.48.  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  reaksiyonu 200 MeV  $80^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.3.3 $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaksiyonu $\theta=100^\circ$ açıda DDX hesaplaması

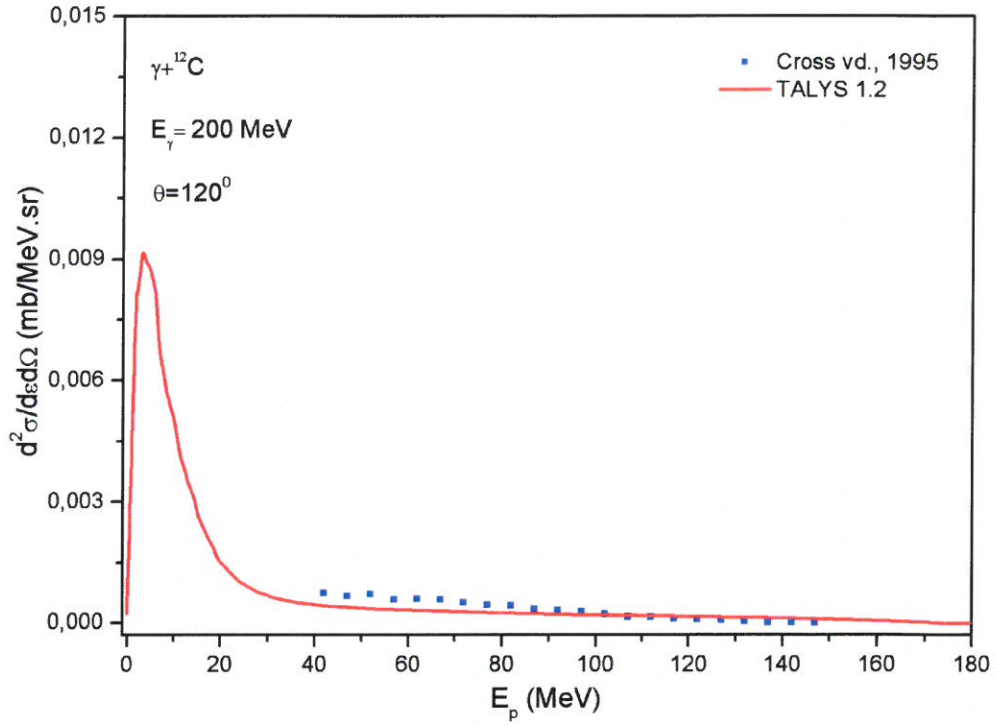
$^{12}\text{C}$  için 200 MeV enerji değerinde elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.49'da verilmiştir. Şekil 4.49'da hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine 200 MeV enerji değerinde gama parçacığı gönderilerek,  $100^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel birebir uyum söz konusudur.



Şekil 4.49.  $^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 200 MeV  $100^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.1.2.3.4 $^{12}\text{C}(\gamma,p)$ Reaksiyonu $\theta=120^\circ$ açıda DDX hesaplaması

200 MeV enerji değerinde  $^{12}\text{C}$  için elde edilen fotoproton çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.50'de verilmiştir. Şekil 4.50'de 200 MeV enerji değerinde gama parçacığı hedef  $^{12}\text{C}$  çekirdeğine gönderilerek,  $120^\circ$  de saçılan protonların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,p)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 150 MeV enerji değerine kadar deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.50.  $^{12}\text{C}(\gamma,p)$  reaksiyonu 200 MeV  $120^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

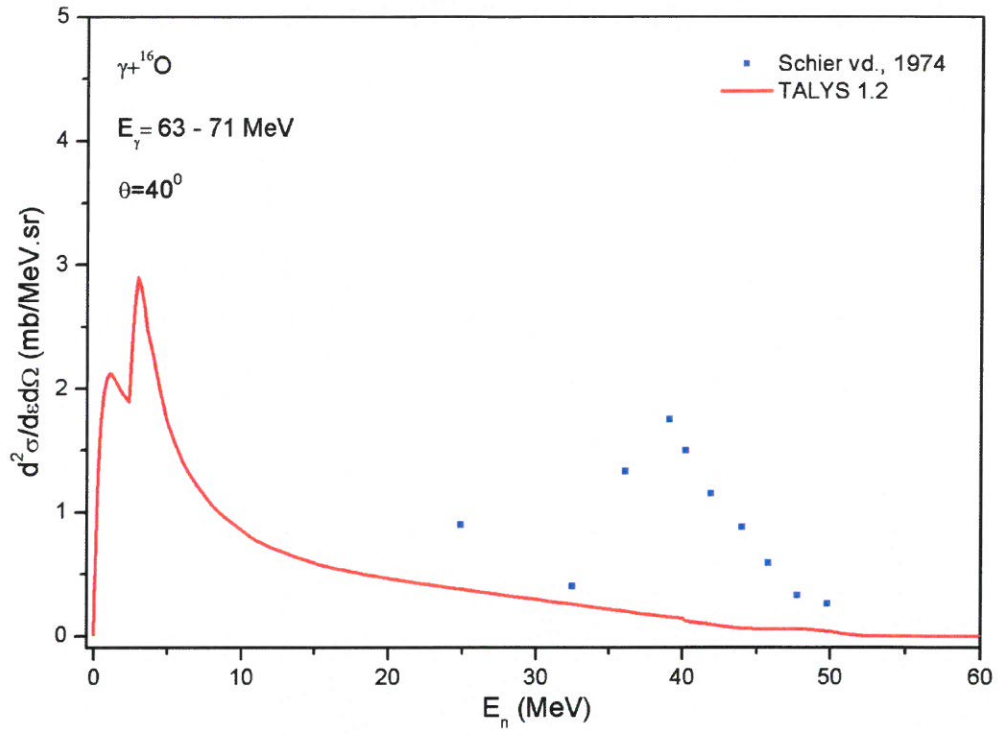
#### 4.2.2 $^{16}\text{O}$ Fotonükleer Reaksiyon Çift Diferansiyel Tesir Kesiti Hesapları

##### 4.2.2.1 $^{16}\text{O}(\gamma,n)^{15}\text{O}$ Reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti hesaplamaları

##### 4.2.2.1.1 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=63\text{-}71$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.2.1.1.1 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40^\circ$ açıda DDX hesaplaması

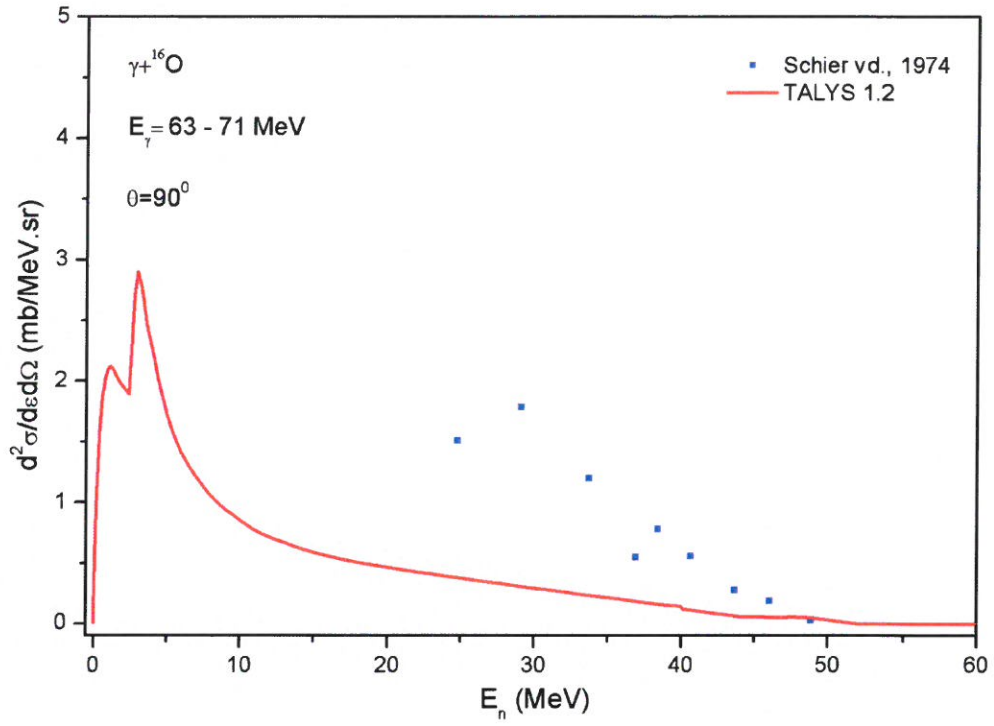
$^{16}\text{O}$  için 63-71 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.51’de verilmiştir. Şekil 4.51’de hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine 63-71 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 1,1 ve 3 MeV enerji değerlerinde 2,12 ve 2,89 mb değerinde iki küçük maksimum pikler oluşmuştur. Bu maksimum noktaları sonrasında artan enerji değeriyle birlikte gözlenen düşüş yaklaşık 45 MeV enerji değerine kadar devam etmektedir. Yaklaşık 25-50 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında uyum, deneyin yapıldığı tarihteki dedektörlerin şuanda kullanılan dedektörlere benzememesinden kaynaklı olarak görülememektedir.



Şekil 4.51.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $40^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.1.2 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

63-71 MeV enerji aralığında  $^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.52'de verilmiştir. Şekil 4.52'de 63-71 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.

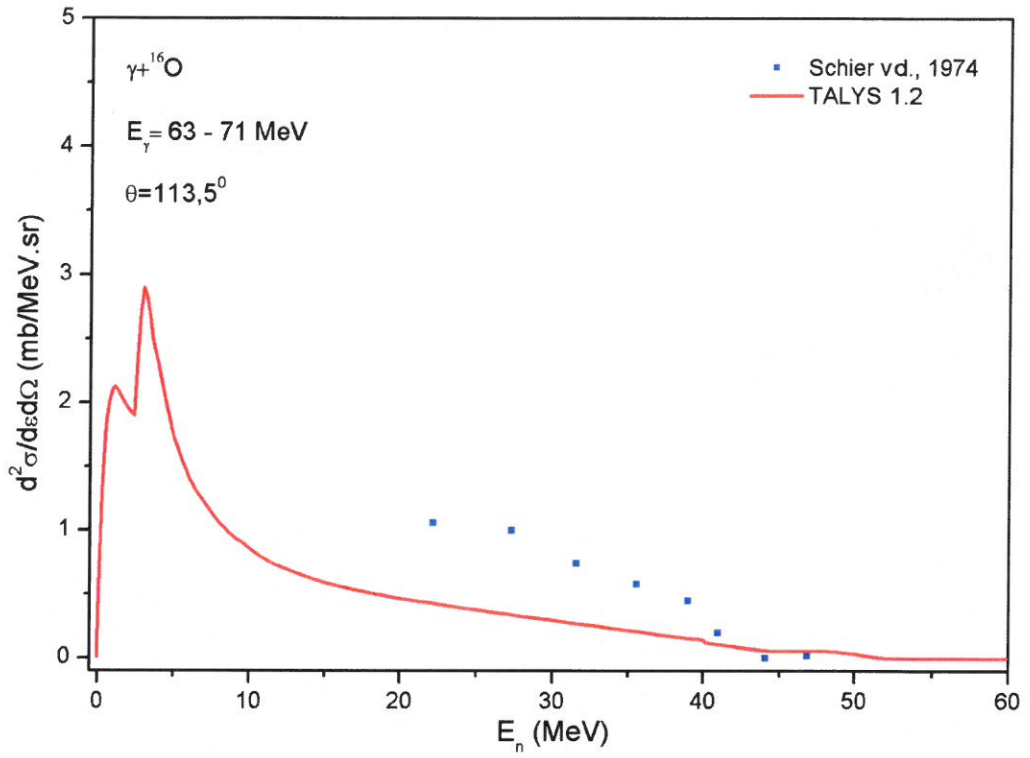


Şekil 4.52.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.1.3 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{16}\text{O}$  için 63-71 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.53'de verilmiştir. Şekil 4.53'de hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine 63-71 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.

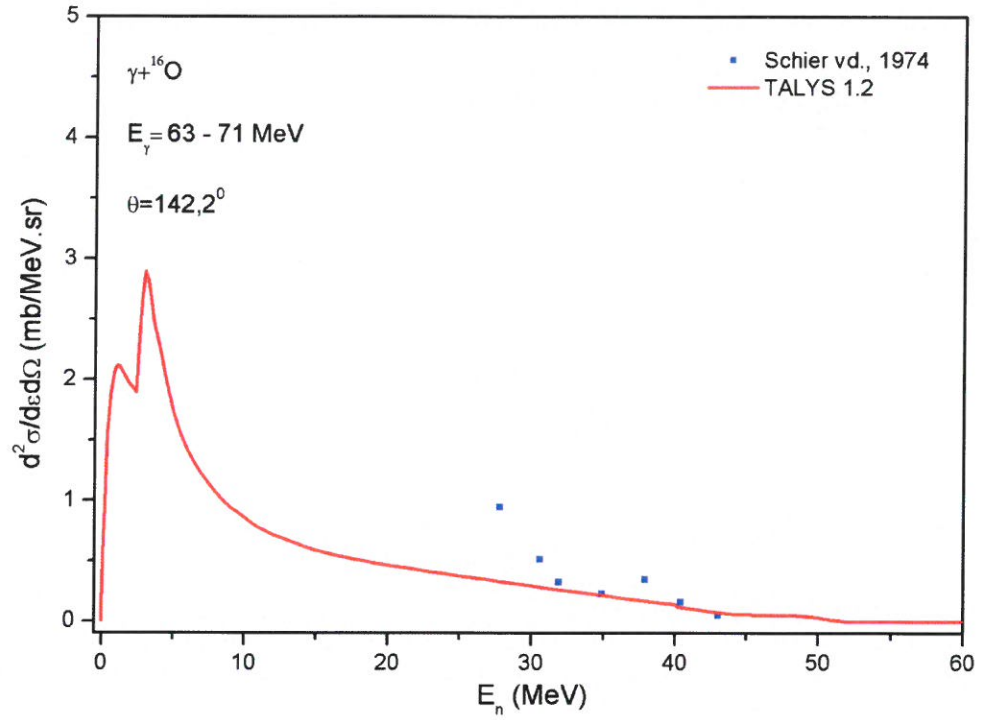




Şekil 4.53.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.1.4 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=142,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

$^{16}\text{O}$  için 63-71 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.54'de verilmiştir. Şekil 4.54'de 63-71 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 30-43 MeV enerji aralığında deneysel verilerin bazıları ile teorik hesaplama sonuçları arasında uyum söz konusudur.

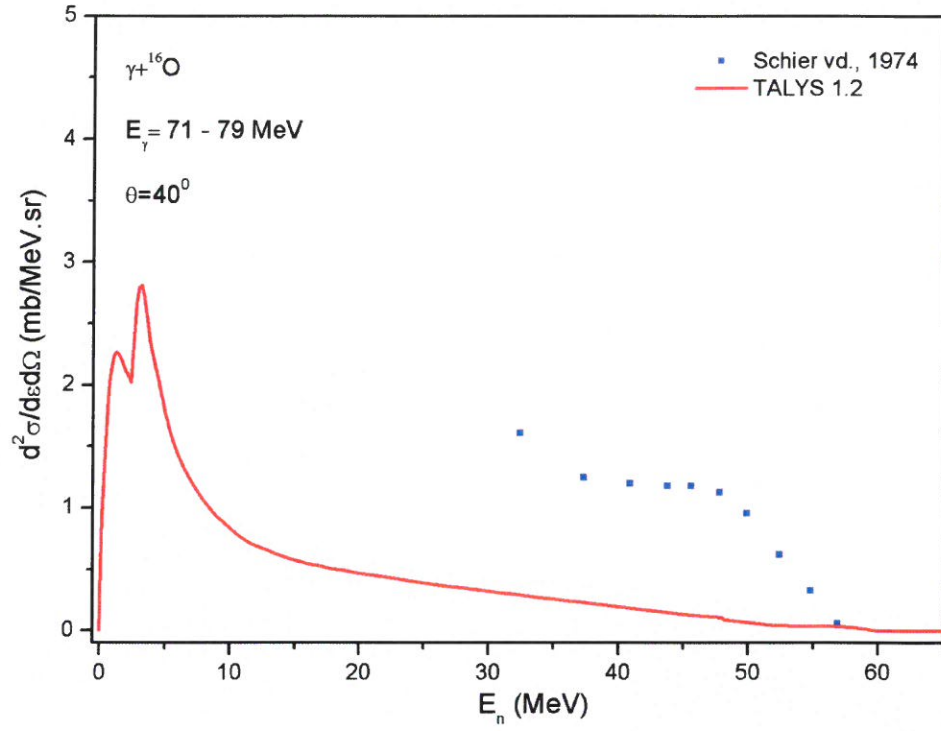


Şekil 4.54.  $^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 63-71 MeV  $142,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.2 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $E_\gamma=71-79$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.2.1.2.1 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=40^\circ$ açıda DDX hesaplaması

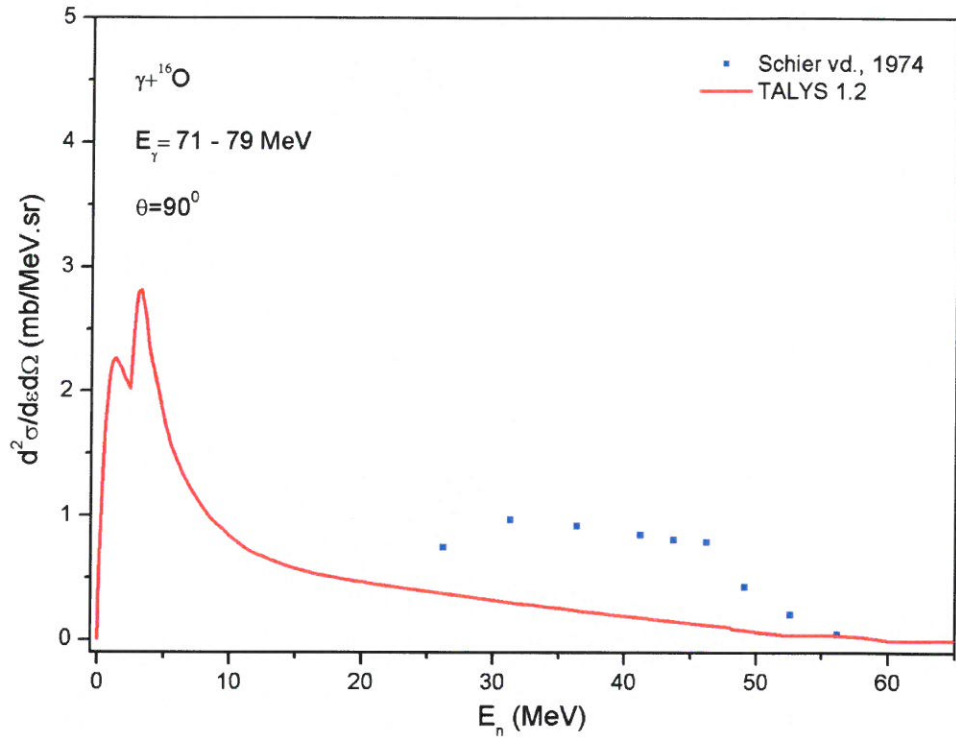
71-79 MeV enerji aralığında  $^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.55'de verilmiştir. Şekil 4.55'de hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında şekilsel uyum dedektör farklılığından dolayı yakalanamamıştır.



Şekil 4.55.  $^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $40^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.2.2 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

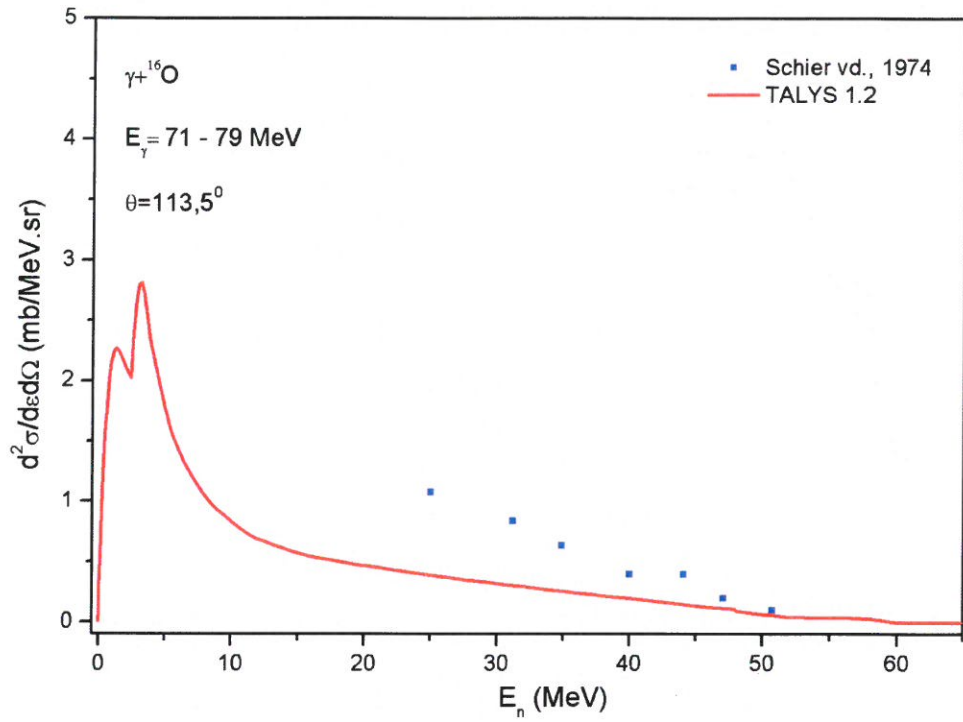
$^{16}\text{O}$  için 71-79 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.56'da verilmiştir. Şekil 4.56'da 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir.



Şekil 4.56.  $^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.2.3 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

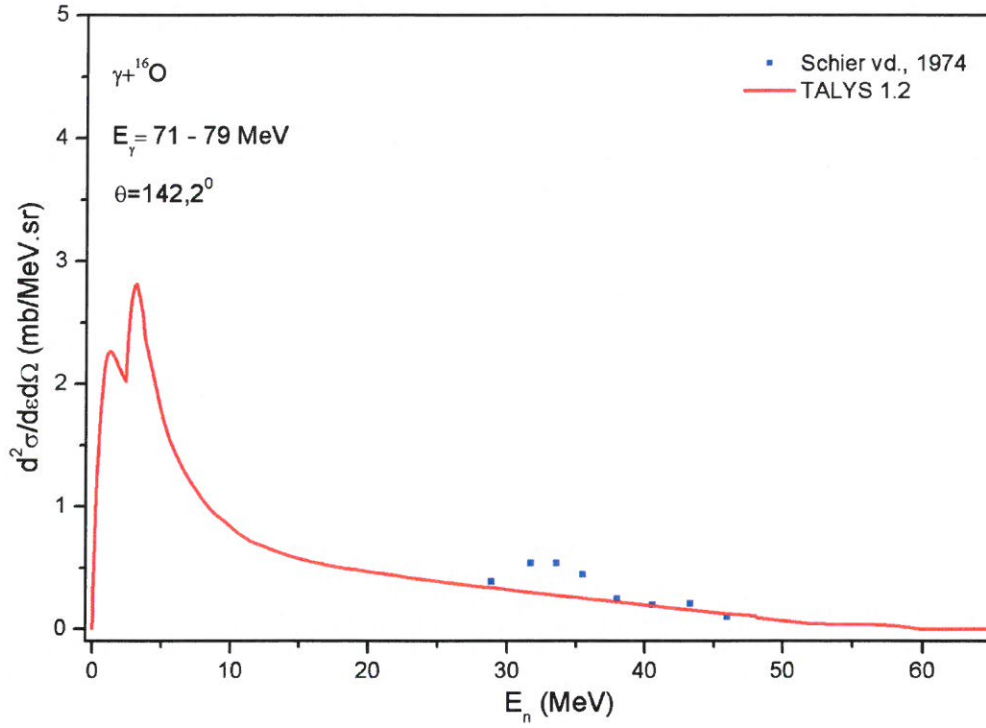
71-79 MeV enerji aralığında  $^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.57'de verilmiştir. Şekil 4.57'de hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 25-51 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.57.  ${}^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.2.4 ${}^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=142,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması

${}^{16}\text{O}$  için 71-79 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.58'de verilmiştir. Şekil 4.58'de 71-79 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  ${}^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 29-46 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum şekilden gözlenmektedir.



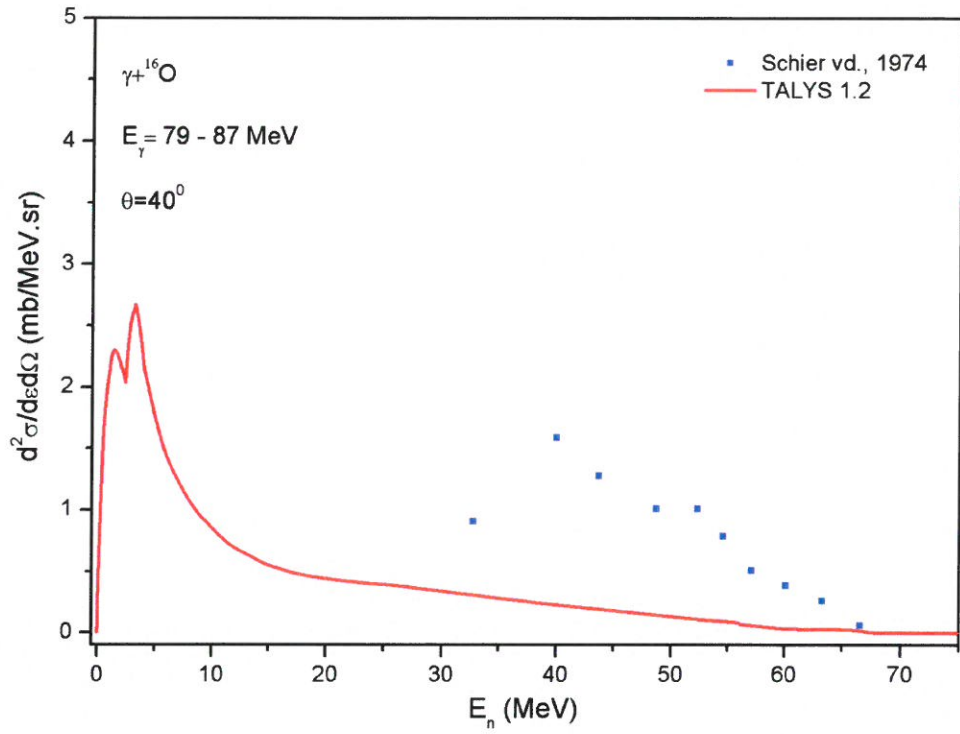
Şekil 4.58.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 71-79 MeV  $142.2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.3 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $E_\gamma = 79-87$ MeV enerji aralığında DDX hesaplaması

##### 4.2.2.1.3.1 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta = 40^\circ$ açıda DDX hesaplaması

79-87 MeV enerji aralığında  $^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.59'da verilmiştir. Şekil 4.59'da hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $40^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 33-67 MeV enerji aralığında mevcut olan deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum dedektör farklılığından dolayı gözlenememektedir.

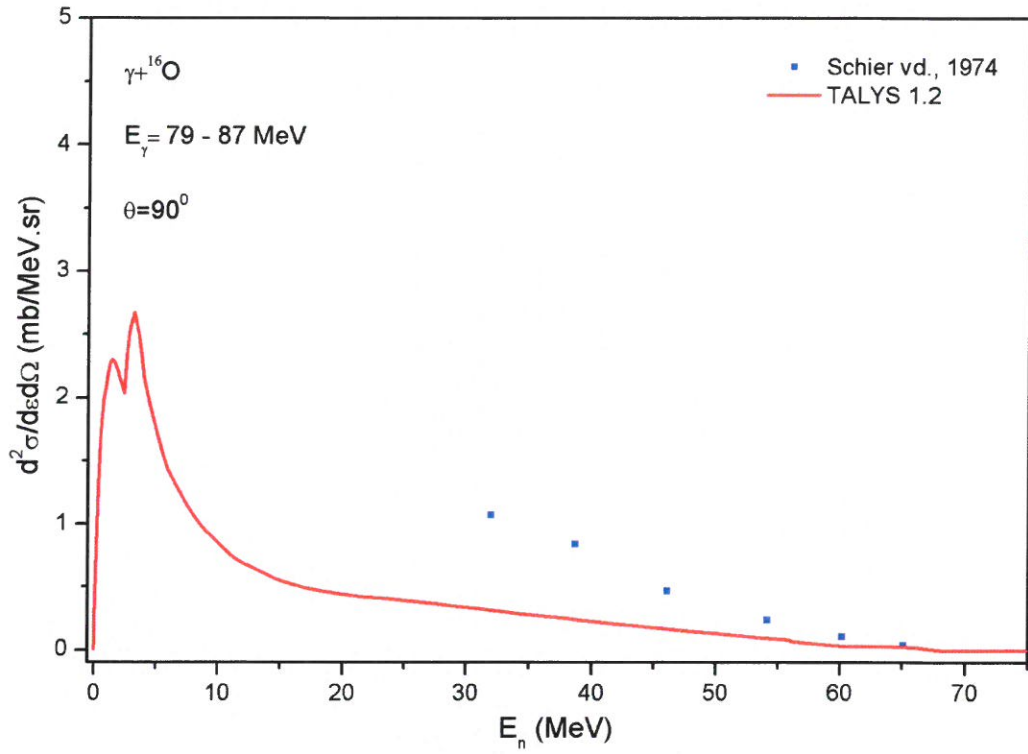




Şekil 4.59.  $^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $40^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.3.2 $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=90^\circ$ açıda DDX hesaplaması

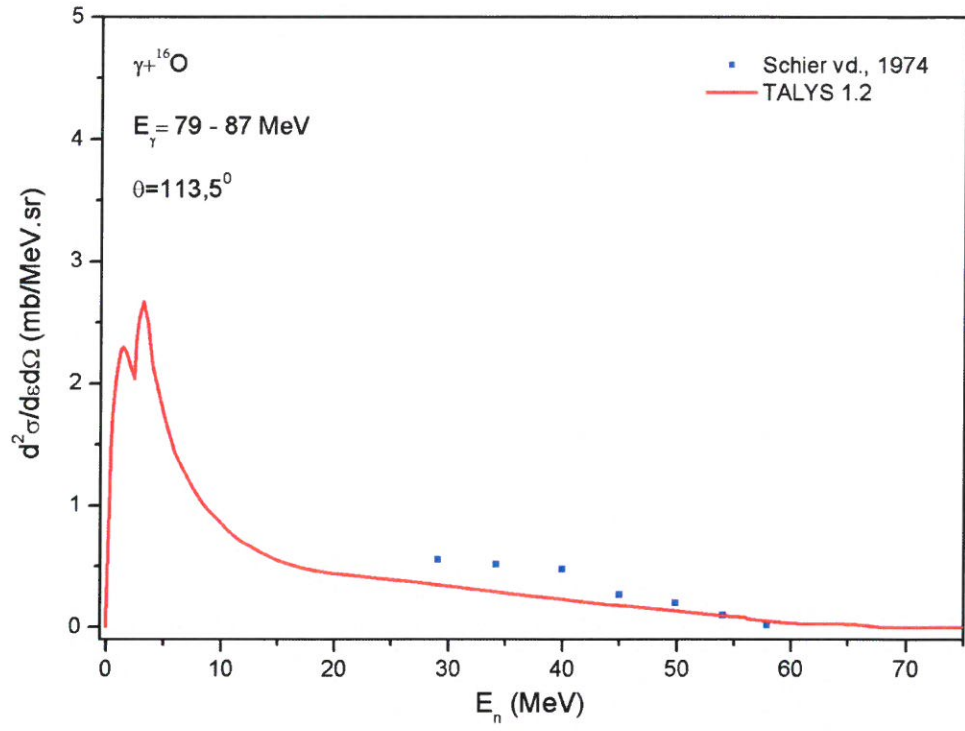
$^{16}\text{O}$  için 79-87 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.60'da verilmiştir. Şekil 4.60'da 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $90^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 32-65 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçlarının uyumu görülmektedir.



Şekil 4.60.  ${}^{16}\text{O}(\gamma,n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $90^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

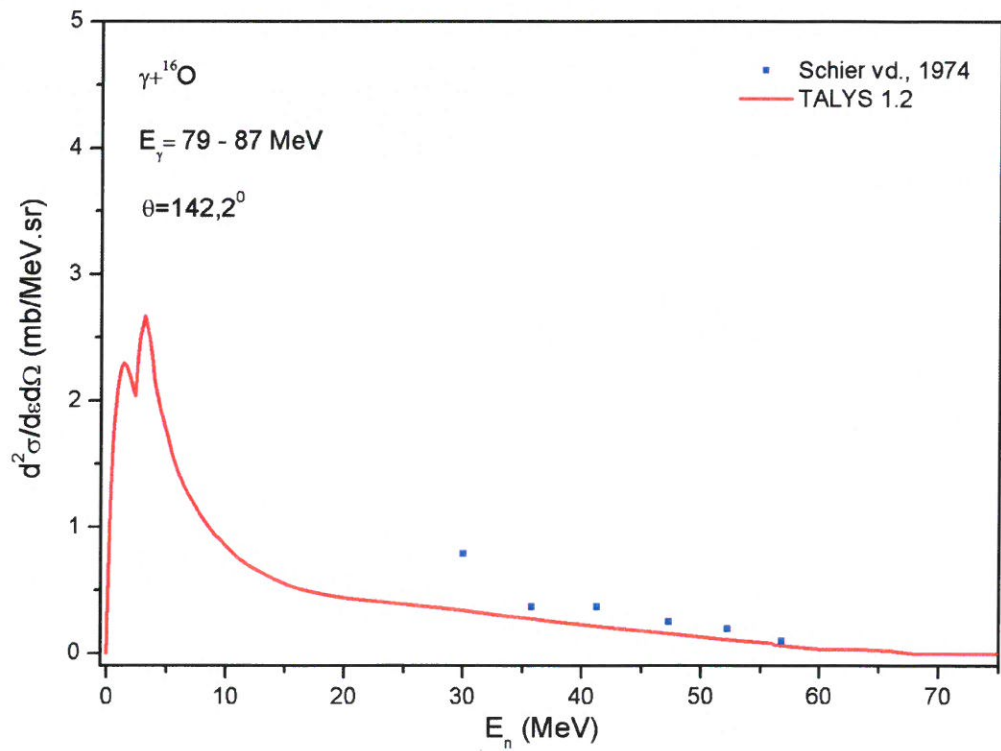
#### 4.2.2.1.3.3 ${}^{16}\text{O}(\gamma,n)$ Reaksiyonu $\theta=113,5^\circ$ açıda DDX hesaplaması

79-87 MeV enerji aralığında  ${}^{16}\text{O}$  için elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.61'de verilmiştir. Şekil 4.61'de hedef  ${}^{16}\text{O}$  çekirdeğine 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı gönderilerek,  $113,5^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma,n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 29-54 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçlarındaki uyum göze çarpmaktadır.



Şekil 4.61.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $113,5^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

#### 4.2.2.1.3.4 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ Reaksiyonu $\theta=142,2^\circ$ açıda DDX hesaplaması



Şekil 4.62.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaksiyonu 79-87 MeV  $142,2^\circ$  de çift diferansiyel tesir kesiti

$^{16}\text{O}$  için 79-87 MeV enerji aralığında elde edilen fotonötron çift diferansiyel tesir kesitleri ve sonucu Şekil 4.62'de verilmiştir. Şekil 4.62'de 79-87 MeV enerji aralığında gama parçacığı hedef  $^{16}\text{O}$  çekirdeğine gönderilerek,  $142,2^\circ$  de saçılan nötronların TALYS 1.2 kodları kullanılarak hesaplanan  $(\gamma, n)$  reaksiyonu çift diferansiyel tesir kesiti verileri incelenmiştir. Yaklaşık 30-57 MeV enerji aralığında deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyum göze çarpmaktadır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinin elde edilmesi nükleer sistemlerde temel çalışmalardır. Genel çerçevede fotonükleer veriler ise radyasyon koruma malzemesinden radyoterapiye, radyoterapiden nükleer alandaki çeşitli uygulamalar için önemlidir.

Ülkemizde kurulum aşamasında olan TARLA'nın bremsstrahlung tesisi bünyesinde gerçekleştirilecek olan fotonükleer reaksiyon çalışmaları öncesi bu teorik çalışma yapılmıştır. Çalışma gama uyarma reaksiyonlarında GDR ( $E_\gamma \leq 30$  MeV) ve QD ( $50 \leq E_\gamma \leq 150$  MeV) enerji bölgesinde seçilen ikisi ha if ( $^{12}\text{C}$ ), ( $^{16}\text{O}$ ), diğeri ağır ( $^{90}\text{Zr}$ ) olmak üzere üç çekirdek için  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, np)$  fotonükleer reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamalarını ve farklı enerji ve açı değerlerinde  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  çekirdekleri için  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  fotonötron ve fotoproton çift diferansiyel tesir kesiti hesaplamalarını içermektedir. Ayrıca yapılan hesaplamaların Uluslar arası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA)'na ait veri tabanları EXFOR ve ENDF kütüphanelerinden alınmış deneysel ve hesaplanmış sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Hesaplanan reaksiyon türlerinden  $(\gamma, n)$  reaksiyon tesir kesitleri incelenecek olursa, belirlenen çekirdekler için JENDL/PD-2004 verilerinin deneysel veriler ile oldukça güzel uyumu göze çarpmaktadır.  $(\gamma, n)$  reaksiyonu temelinde tesir kesiti değerlerini  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  çekirdekleri için değerlendirdiğimizde,  $(\gamma, n)$  tesir kesiti değerleri kütle numarası artışıyla artış göstermektedir. Şöyle ki  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği  $(\gamma, n)$  reaksiyonuna ait tesir kesiti  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  çekirdeği  $(\gamma, n)$  reaksiyonuna ait tesir kesiti değerinden oldukça büyüktür.  $(\gamma, n)$  reaksiyonuna ait olan karakteristik  $90^\circ$ 'lik saçılma, çekirdeklere ait şekillerde görülmektedir. Şekillerde görülen  $90^\circ$ 'lik saçılma  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeğinde tek bir pikte görülürken;  $^{12}\text{C}$  çekirdeğinde birbirinden farklı büyüklüklerdeki iki pikte görülmektedir.  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesitlerinde de  $(\gamma, n)$  reaksiyon tesir kesitlerinde kütle numarası değişimiyle görülen değişime benzer durum söz konusudur.

$(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesiti maksimum değerlerinin çekirdekler için karşılaştırmasını yapacak olursak;  $^{12}\text{C}$  çekirdeği için  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesitinin maksimum değeri  $(\gamma, n)$  reaksiyon tesir kesitinin maksimum değerinden daha fazladır.  $^{16}\text{O}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeğinde ise  $(\gamma, n)$  reaksiyon tesir kesitinin maksimum değeri  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesitinin maksimum değerinden daha fazladır.  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği için  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesiti deneysel veri birimi toplam reaksiyon tesir kesiti biriminde olmadığı için teorik hesaplama sonuçları ile deneysel veriler arasında karşılaştırma yapılamamıştır. Aynı durum  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği için  $(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$  reaksiyon çift diferansiyel tesir kesiti verileri için de geçerlidir. İncelenen şekiller kapsamında 10-35 MeV bölgesinde oluşan önceki paragraflarda pik olarak yorumlanan ikinci veya üçüncü tesir kesiti zirveleri reaksiyonda protonun baskın olduğu noktaları işaret etmektedir. Bu durum yukarıda da bahsedildiği gibi kütle numarası arttıkça tersine dönmektedir. Protonun daha düşük enerji ve hafif çekirdeklerdeki katkısının aksine; katkısının nötrona göre çok çok az olduğu ağır çekirdek olarak seçilen  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeğine ait şekillerde hemen fark edilmektedir.

Bununla birlikte yaklaşık olarak 25 MeV civarında görülen ikinci piklerin nedeni deneylerin yapıldığı tarihlerdeki dedektörlerin şuanda kullanılan dedektörlere benzememesinden kaynaklı olabilir ve diğer bir durum olarak da büyük dipol rezonans (GDR) etkilerinden kaynaklı olabilir.

Belirlenen çekirdekler için elde edilen  $(\gamma, np)$  reaksiyonuna ait tesir kesiti şekilleri incelendiğinde;  $(\gamma, np)$  reaksiyon tesir kesiti maksimum değerlerinin tüm çekirdekler için  $(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$  reaksiyon tesir kesiti maksimum değerlerinden oldukça düşük değerde oldukları söylenebilir.

Nükleer yapı ve nükleer reaksiyonların her ikisinin de anlaşılması için önemli olan gama kuvvet fonksiyonlarının toplam tesir kesiti üzerindeki etkilerinin incelenmesi sonucu genel olarak Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian ve Goriely's hibrit modelin hesaplama sonuçlarının tüm çekirdekler için mevcut bulunan deneysel sonuçlar ile daha iyi uyum gösterdiği görülmüştür. Kopecky-Uhl genelleştirilmiş Lorentzian model büyük dipol rezonans (GDR) etkisini daha



belirginleştirici şekilde olduğu için ve Goriely's hibrit model de bunu desteklediği için uyumlu modeller olarak görülmüştür. Bununla birlikte fotonükleer reaksiyonlara ait tesir kesiti maksimum pik değerleri gama kuvvet fonksiyon modelleri temelinde,  $^{90}\text{Zr}$  çekirdeği için Hartree-Fock-BCS tablo model,  $^{16}\text{O}$  çekirdeği için Hartree-Fock-Bogolyubov tablo model ve  $^{12}\text{C}$  çekirdeği için bu iki modele ek olarak Brink-Axel Lorentzian model olarak gözlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmını oluşturan, farklı gama uyarım enerjilerinde ve farklı açılarda nötron ve proton emisyon çift diferansiyel tesir kesiti hesaplamalarına ait şekiller incelendiğinde, enerjiye ve açığa olan bağımlılık açıkça görülmektedir. Aynı açı değerinde uyarılma enerjisi arttıkça fotonötron ( $\gamma, n$ ) reaksiyon çift diferansiyel tesir kesiti maksimum değerlerinde artış görülürken; fotoproton ( $\gamma, p$ ) reaksiyon çift diferansiyel tesir kesiti maksimum değerlerinde azalma görülmektedir. Uyarım enerjisi artışıyla ilk olarak maksimum tesir kesitine kadar artış gösteren çift diferansiyel tesir kesiti değerlerinde maksimum tesir kesiti değerlerinden sonra azalışı görmek mümkündür.

Çalışılan çekirdeklerin hepsinde de aynı açı değerinde, uyarılma enerjisi arttıkça deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyumun giderek arttığı gözlenmiştir. Ve bu gözlem her iki reaksiyon için de ( $(\gamma, n)$  ve  $(\gamma, p)$ ) doğrulanmaktadır. Bununla birlikte; aynı uyarılma enerjisinde açı değeri arttıkça, deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasındaki uyumun giderek arttığı  $^{12}\text{C}$  ve  $^{16}\text{O}$  çekirdekleri için gözlenmiştir. Deneylerin yapıldığı tarihlerde kullanılan dedektörlerin özelliklerinin günümüzde kullanılan dedektörlerden farklı olmasından dolayı bazı enerji ve açı değerleri için çift diferansiyel tesir kesiti deneysel verileri ve teorik hesaplama sonuçlarımız arasında uyum görülememiştir.

TALYS 1.2 nükleer reaksiyon simülasyon kod programı, tek hedef atoma tek mermi parçacık göndererek, oluşan nükleer reaksiyon sonucu çıkan parçacıkları alıp ayrışımını yaparak sonucu tek parçacık olarak bize sunmaktadır. Dolayısıyla bazı çift diferansiyel tesir kesitlerinde ve reaksiyon toplam tesir kesitlerinde deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçları arasında görülen uyumsuzluğun sebebinin bu olabileceği de düşünülmektedir.

Genellemeler dahilinde reaksiyon tipleri ve uluslar arası veri tabanından alınan veri tiplerindeki çeşitlilik göz önüne alınarak, TALYS 1.2 nükleer kod programının sonuçlarının bazen farklı değerlerde olsa da bu veriler ile olan uyumu ve fotonükleer reaksiyonların karakteristik yapıları gözlenmiştir. Ayrıca medikal fizik alanında ve özellikle kanser tedavilerinde saçılan parçacıkların saçılma açıları ve beraberinde uyarılma enerjileri kavramında önemli bir yere sahip olan çift diferansiyel tesir kesiti çalışmalarında, yapılacak deneysel araştırmalar ve çalışmalar için söz konusu hesaplamalar TALYS 1.2 nükleer kod programı kapsamında gösterilmiştir.

Bu sonuçların ışığında teorik hesaplama literatürü için yapılan bu çalışmada, gama reaksiyonlarının çalışmada kullanılan çeşitleri için yeni yapılacak deneysel çalışmalarda özellikle Türk Hızlandırıcı Merkezi bremsstrahlung deney tesisinde yapılacak deneyler için bir öngörü niteliğinde sayılabilir.

## KAYNAKLAR

- Afanas'ev, S.N., Gorbenko, E.S., Khodyachikh, A.F., 2007. Investigation of the Reaction Mechanism for the Four-Particle Photodisintegration of a Carbon Nucleus. *Physics of Atomic Nuclei*, 70(5), 839-847.
- Ahrens, J., Borchert, H., Czock, K.H., Eppler, H.B., Gimm, H., Gundrum, H., Kröning, M., Riehn, P., Sita Ram, G., Zieger, A., Ziegler, B., 1975. Total Nuclear Photon Absorption Cross Sections for Some Light Elements. *Nuclear Physics A*, 251(3), 479-492.
- Ahrens, J., 1985. *Nuclear Physics*, A446, 229c.
- Akkurt, İ., 1998. The Study of ( $\gamma, n$ ) Reactions in Light Nuclei at Intermediate Photon Energy. Glasgow University, Department of Physics and Astronomy, Ph. D. Thesis, 140p, İskoçya.
- Akkurt, İ., Kaplan, A., Annand, J.R.M., 2001. Hızlandırıcılarla Photonuclear Reaksiyonlar. I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 25-26 Ekim, TAEK-Ankara.
- Akkurt, İ., Annand, J.R.M., 2002. The ( $\gamma, n$ ) Reaction Mechanism at Intermediate Energies. *Chinese Journal of Physics*, 40(3), 277-282.
- Akkurt, İ., 2003. The  $^2\text{H}(\gamma, n)$  Reaction at 10-70 MeV. *Chinese Journal of Physics*, 41(2), 111-115.
- Akkurt, İ., Adler, J.O., Annand, J.R.M., Fasolo, F., Hansen, K., Isaksson, L., Karlsson, M., Lilja, P., Lundin, M., Nilsson, B., Ongaro, C., Reiter, A., Rosner, G., Sandell, A., Schröder, B., Zanini, A., 2003. Photoneutron yields from tungsten in the energy range of the giant dipole resonance. *Physics in Medicine and Biology*, 48, 3345-3352.
- Akkurt, İ., Mavi, B., Akkurt, A., Başıyigit, C., Kılınçarslan, S., Yalın, H.A., 2005. Study on Z Dependence of Partial and Total Mass Attenuation Coefficients. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 94, 379-385.
- Akkurt, İ., Tekin, H.O., Demirci, Z.N., Demir, N., Yegin, G., 2010. TARLA'da Bremsstrahlung Foton Deney Hattı. ADIM Fizik Günleri-I, 21-22 Mayıs, Afyonkarahisar.
- Akkurt, İ., Karpuz, N., Mavi, B., Demir, N., 2014. Activation Cross Sections for the ( $\gamma, n$ ) Reactions on Zirconium Isotopes. *Annals of Nuclear Energy*, 65, 181-183.
- Akyıldırım, H., 2011. Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 102s, Isparta.

- Annand, J.R.M., Crawford, G.I., Harty, P.D., McGeorge, J.C., Miller, G.J., Andersson, B.-E., Adler, J.-O., Bulychjev, S.A., Isaksson, L., Ruijter, H., Schroder, B., 1993. High Resolution Measurements of  $^{12}\text{C}(\gamma, n)$  and the Implications for the  $(\gamma, N)$  Reaction Mechanism at Intermediate Energy. *Physical Review Letters*, 71(17), 2703-2706.
- Annand, J.R.M., Andersson, B.E., Akkurt, İ., Nilsson, B., 1997. An NE213A TOF spectrometer for high resolution  $(\gamma, n)$  reaction measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 400, 344-355.
- Antropov, G.P., Mitrofanov, I.E., Prokof'ev, A.I., Russkikh, B.S., 1969. Photoneutron Cross Sections of  $^{90}\text{Zr}$  and  $^{91}\text{Zr}$ . *Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. Fiz.*, 33, p.700.
- Arıkan, P., 2010. Hızlandırıcıların Kullanım Alanları. UPHDYO-VI (VI. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu), 2-7 Eylül, Bodrum.
- Arya, A.P., 1999. Çekirdek Fiziğinin Esasları. Çev. Şahin, Y., Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Askin, H.J., Allen, J.K.H., Hicks, R., Petty, R.J., Thompson, M.N., 1972. Isotopic Mixing in the Isobaric Analogue States of  $\text{Zr}^{90}$ . *Nuclear Physics A*, 204, p.209.
- Aydın, A., Sarpün, İ.H., Kaplan, A., Tel, E., 2013. Calculations of double-differential deuteron emission cross sections at 62 MeV proton-induced reactions. *Journal of Fusion Energy*, 32(3), 378-381.
- Aydın, A., Sarpün, İ.H., Kaplan, A., 2014. Calculations of double-differential triton emission cross sections at 62 MeV proton-induced reactions. *Physics of Atomic Nuclei*, 77(3), 321-324.
- Axel, P., 1962. Electric Dipole Ground-State Transition Width Strength Function and 7 MeV Photon Interactions. *Phys. Rev.*, 126(2), 671-683.
- Bazhanov, E.B., Komar, A.P., Kulikov, A.V., Ogurtsov, V.I., 1966. Photodisintegration of  $^{12}\text{C}$ . *Yadernaya Fizika*, 3, p.711.
- Beil, H., Bergere, R., Carlos, P., Lepretre, A., Veyssiere, A., Parlag, A., 1971. Giant Dipole Resonance in  $N=82$  Nuclei. *Nuclear Physics A*, 172, 426-436.
- Beljaev, S.N., Semenov, V.A., 1991. Analysis of the intermediate structure in the  $(\gamma, n)$  cross sections on nuclei with  $N=82$ . *Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. Fiz.*, 55, p.953.
- Belyaev, S.N., Kozin, A.B., Nechkin, A.A., Semenov, V.A., Semenko, S.F., 1985. On Photoabsorption cross sections of Pr, Bi and Ta isotopes in the energy region  $E_n\text{-}\gamma < 12$  MeV. *Yadernaya Fizika*, 42, p.1050.

- Berman, B.L., Caldwell, J.T., Harvey, R.R., Kelly, M.A., Bramblett, R.L., Fultz, S.C., 1967. Photoneutron Cross Sections for  $Zr^{90}$ ,  $Zr^{91}$ ,  $Zr^{92}$ ,  $Zr^{94}$  and  $Y^{89}$ . *Physical Review*, 162(4), 1098-1111.
- Berman, B.L., Faul, D.D., Meyer, P., Olson, D.L., 1980. Photoneutron cross sections for  $He^4$ . *Physical Review, Part C, Nuclear Physics*, 22, p.2273.
- Berman, B.L., Jury, J.W., Woodworth, J.G., Pywell, R.E., Mcneill, K.G., Thompson, N.T., 1983. Photoneutron cross sections for  $O^{16}$ . *Physical Review, Part C, Nuclear Physics*, 27, p.1.
- Berman, B.L., Pywell, R.E., Dietrich, S.S., Thompson, M.N., McNeill, K.G., Jury, J.W., 1987. Absolute Photoneutron Cross Sections for the Zr, I, Pr, Au and Pb. *Physical Review C*, 36(4), 1286-1292.
- Bezic, N., Brajnik, D., Jamnik, D., Kernel, G., 1969. Total Photonuclear Cross Sections for  $^{12}C$ ,  $^{14}N$ ,  $^{16}O$  and  $^{19}F$  in the Region of the Giant Resonance. *Nuclear Physics A*, 128(2), 426-432.
- Bozkurt, A., 2013. MCNP ile Radyasyon Taşıma. Erişim Tarihi: 20.09.2013. <http://ahmetbozkurt69.wordpress.com>
- Brajnik, D., Jamnik, D., Kernel, G., Korun, M., Miklavzic, U., Pucelj, B., Stanovnik, A., 1976. Photonuclear Reactions in  $^{90}Zr$ . *Physical Review C*, 13(5), 1852-1863.
- Bramblett, R.L., Caldwell, J.T., Harvey, R.R., Fultz, S.C., 1964. Photoneutron cross sections of  $Tb^{159}$  and  $O^{16}$ . *Physical Review*, 133, p.869.
- Brink, D.M., 1957. Individual Particle and Collective Aspects of the Nuclear Photoeffect. *Nucl. Phys.* 4, 215-220.
- Carchon, R., Van de Vyver, R., Ferdinande, H., Devos, J., Van Camp, E., 1976. Photoproton Cross Section and Angular Distributions for  $^{12}C$  in the Giant Dipole Resonance Region. *Physical Review C*, 14(2), 456-467.
- Carlos, P., Beil, H., Bergere, R., Fagot, J., Lepretre, A., Veyssiere, A., Solodukhov, G.V., 1976. A study of the Photoneutron Contribution to the Giant Dipole Resonance of Nuclei in The 64-Less-Than Over Equal to A Less-Than Over Equal to 86 Mass Region. *Nuclear Physics A*, 258(2), 365-387.
- Carlos, P., Beil, H., Bergere, R., Berman, B.L., Lepretre, A., Veyssiere, A., 1982. Photoneutron cross sections for oxygen from 24-133 MeV. *Nuclear Physics, Section A*, 378, p.317.
- Cohen, L.D., Stephens, W.E., 1959. Gamma-Ray Activation of Carbon. *Physical Review Letters*, 2(6), 263-264.

- Cross, G.E., Macgregor, I.J.D., McGeorge, J.C., Ahrens, J., Anthony, I., Annand, J.R.M., Beck, R., Branford, D., Davinson, T., Grabmay, P., Hall, S.J., Harty, P.D., Hehl, T., Kellie, J.D., Lamparter, T., Machenil, L., Mackenzie, J.A., Miller, G.J., Owens, R.O., Ryckebusch, J., Sauer, M., Schneider, R., Spaeth, K., Vanderhaeghen, M., 1995. Proton Photoproduction from  $^{12}\text{C}$ . Nuclear Physics A, 593, p.463.
- Dancer, S.N., MacGregor, I.J.D., Annand, J.R.M., Anthony, I., Crawford, G.I., Hall, S.J., Kellie, J.D., McGeorge, J.C., Owens, R.O., Wallace, P.A., Branford, D., Springham, S.V., Shotter, A.C., Schoch, B., Vogt, J.M., Beck, R., Liesenfeld, G., 1988. Investigation of the  $^{12}\text{C}(\gamma, \text{pn})$  Reaction Using Tagged Photons. Physical Review Letters, 61(10), 1170-1173.
- Del Bianco, W.E., Stephens, W.E., 1962. Photonuclear Activation by 20.5 MeV Gamma Rays. Physical Review, 126(2), 709-717.
- Dushkov, I.I., Ishkhanov, B.S., Kapitonov, I.M., Yur'ev, B.A., Shevchenko, V.G., 1965. Photoprotons From Zr. Physical Letters, 10, p.310.
- Emma, V., Milone, C., Rubbino, A., 1960. Energy Spectra and Angular Distribution of Photoneutrons from Carbon. Physical Review, 118(5), 1297-1301.
- EXFOR, Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), 2007. <http://www-nds.iaea.org/exfor/>
- Findlay, D.J.S., Owens, R.O., 1977. The  $^{16}\text{O}(\gamma, \text{p})$  reaction at intermediate photon energies. Nuclear Physics, Section A, 279, p.385.
- Fultz, S.C., Caldwell, J.T., Berman, B.L., Bramblett, R.L., Harvey, R.R., 1966. Photoneutron Cross Sections for  $^{12}\text{C}$  and  $^{27}\text{Al}$ . Physical Review, 143(3), 790-796.
- Gabriel, T.A., Alsmiller, R.G., 1969. Photonuclear Disintegration at High Energies (<350 MeV). Physical Review, 182(4), 1035-1050.
- Gilbert, A., Cameron, A.G.W., 1965. A Composite Nuclear-Level Density Formula with Shell Corrections. Can. J. Phys., 43, 1446-1496.
- Harty, P.D., McGeorge, J.C., MacGregor, I.J.D., Owens, R.O., Annand, J.R.M., Anthony, I., Crawford, G.I., Dancer, S.N., Hall, S.J., Kellie, J.D., Miller, G.J., Schoch, B., Beck, R., Schmieden, H., Vogt, J.M., Ryckebusch, J., 1995.  $^{12}\text{C}(\gamma, \text{p})^{11}\text{B}$  cross section from 80 to 157 MeV. Physical Review C, 51(4), 1982-1990.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2000. Handbook on Photonuclear Data for Applications Cross Sections and Spectra. Final Report of a CRP 1996-1999, IAEA-TECDOC-1178.

- Ishkhanov, B.S., Kapitonov, I.M., Lazutin, E.V., Piskarev, I.M., Sopov, V.S., Shevchenko, V.G., 1970. Fine structure of the giant dipole resonance in  $^{16}\text{O}$  nucleus. *Yadernaya Fizika*, 12, p.892.
- Ishkhanov, B.S., Kapitonov, I.M., Shvedunov, V.I., Shumakov, A.V., 1980. A Study of the  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$  Reaction Leading to the Formation of the Final Nucleus in Individual States. *Yadernaya Fizika*, 32, p.305.
- Ishkhanov, B.S., Kapitonov, I.M., Lileeva, E.I., Shirokov, E.V., Erokhova, V.A., Elkin, M.A., Izotova, A.V., 2002. Cross Sections of Photon Absorption by Nuclei with Nucleon Numbers 12-65. Moscow State Univ. Inst. of Nucl. Phys. Reports, p.27.
- Jury, J.W., Berman, B.L., Faul, D.D., Meyer, P., Woodworth, J.G., 1980. Photoneutron cross sections for  $\text{O}^{17}$ . *Physical Review, Part C, Nuclear Physics*, 21, p.503.
- Kanazawa, M., Homma, S., Koike, M., Murata, Y., Okuno, H., Soga, F., Yoshikawa, N., Sasaki, A., 1987. The  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, pn)$  and  $(\gamma, pp)$  Reactions on Light Nuclei in the Delta (1232) Resonance Region. *Physical Review C, Nuclear Physics*, 35, p.1828.
- Kansu, M.E., 2007. Astrofizikteki Nükleer Reaksiyonların Tesir Kesiti Hesaplamaları. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Kütahya.
- Kaplan, A., Özdoğan, H., Aydın, A., Tel, E., 2013. Photo-neutron Cross Section Calculations of Several Structural Fusion Materials. *Journal of Fusion Energy*, 32(3), 344-349.
- Kaplan, A., Özdoğan, H., Aydın, A., Tel, E., 2013.  $(\gamma, 2n)$  Reaction Cross Section Calculations on Several Structural Fusion Materials. *Journal of Fusion Energy*, 32(4), 431-436.
- Kaplan, A., Çapalı, V., 2014. Cross Section Calculations on Several Structural Fusion Materials for  $(\gamma, 3n)$  Reactions in the Photon Energy Range of 20-110 MeV. *Journal of Fusion Energy*, 33(3), 299-303.
- Karaoğlu, B., 1994. Kuantum Mekaniğine Giriş. Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul.
- Katz, L., Cameron, A.G.W., 1951. The solution of x-ray activation curves for photonuclear cross sections. *Canadian Journal of Physics*, 29, p.518.
- Khodyachikh, A.F., Vatset, P.I., Dogyust, I.V., Zolenko, V.A., Kirichenko, V.V., 1980. Correlated np Pairs From p-Shell of the Carbon Nucleus. *Yadernaya Fizika*, 32, p.881.
- Kiremitçioğlu, Ş., 2011. Alkali ve Toprak Alkali Bazı Elementlerin Fotonötron Reaksiyonları  $(\gamma, n)$ ,  $((\gamma, n) + (\gamma, n + p))$  ve  $(\gamma, \text{abs})$  Tesir Kesitlerinin Teorik



Hesaplanması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Afyonkarahisar.

- Kirichenko, V.V., Khodyachikh, A.F., Arkatov, Yu.M., Vatset, P.I., Dogyust, I.M., 1977. Reaction  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$  in the 40-120 MeV Energy Range. *Ukrainskii Fizichnii Zhurnal*, 22, p.959.
- Kirichenko, V.V., Arkatov, Yu.M., Vatset, P.I., Dogyust, I.M., Khodyachikh, A.F., 1978. Reaction  $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$  at  $E_{\gamma\text{-max}}=120$  MeV. *Yadernaya Fizika*, 27, p.588.
- Kneissl, U., Koop, E.A., Kuhl, G., Leister, K.H., Weller, A., 1975. The Quasimonoenergetic Photon Facility at the Giessen 65 MeV Electron Linear Accelerator. *Nuclear Instruments and Methods*, 127(1), 1-10.
- Koning, A.J., Hilaire, S., Duijvestijn, M., 2009. TALYS 1.2 A Nuclear Reaction Program. NRG-Nuclear Research and Consultancy Group, Netherlands.
- Kopecky, J., Uhl, M., 1990. Test of Gamma-ray Strength Functions in Nuclear Reaction Model Calculation. *Phys. Rev. C*, 41(5), 1941-1955.
- Krane, K.S., 2006. *Introductory Nuclear Physics*. Çev. Şarer, B. Palme Yayıncılık, I. Cilt, II. Baskı, Ankara.
- Lepretre, A., Beil, H., Bergere, R., Carlos, P., Veyssiere, A., 1971. The Giant Dipole States in the A=90 Mass Region. *Nuclear Physics A*, 175, 609-628.
- Lochstedt, W.A., Stephens, W.E., 1966.  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  Giant Resonance with Gamma Rays. *Physical Review*, 141(3), 1002-1006.
- McGeorge, J.C., Crawford, G.I., Owens, R.O., 1986. The  $^{12}\text{C}(\gamma, p)$  Reaction at  $E_{\gamma}=60$  and 80 MeV. *Physics Letters B*, 179(3), 212-216.
- McLane, V., 1997. CSISRS Experimental Nuclear Data File. National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory.
- Md. L. Rahman, A.K., Kato, K., Arima, H., Shigyo, N., Ishibashi, K., Hori, J., Nakajima, K., 2010. Study on Effective Average  $(\gamma, n)$  Cross Section for  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  and  $^{133}\text{Cs}$  and  $(\gamma, 3n)$  Cross Section for  $^{99}\text{Tc}$ . *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47(7), p.618.
- Nilsson, B., Adler, J.O., Andersson, B.E., Annand, J.R.M., Akkurt, İ., Boland, M.J., Crawford, G.I., Fissum, K.G., Hansen, K., Harty, P.D., Ireland, D.G., Isaksson, L., Karlsson, M., Lundin, M., McGeorge, J.C., Miller, G.J., Ruijter, H., Sandell, A., Schröder, B., Sims, D.A., Watts, D., 2005. Near-threshold measurement of the  $^4\text{He}(\gamma, n)$  reaction. *Physics Letters B*, 626, 65-71.
- Reiter, Andreas.J.H., 2004. *Differential Photoneutron Cross Sections of Light Nuclei for Neutron Dosimetry*. University of Glasgow, Experimental

Nuclear Physics Group, Department of Physics&Astronomy, Ph. D. Thesis, 149p, İskoçya.

Roalsvig, J.P., Gupta, I.C., Haslam, R.H.H., 1961. Photoneutron Reactions in  $C^{12}$  and  $O^{16}$ . Canadian Journal of Physics, 39(5), 643-656.

Rodrigues, T.E., Martins, M.N., Garcia, C., Arruda-Neto, J.D.T., Mesa, J., Shtejer, K., Garcia, F., 2007. Photon-induced Multiple Particle Emissions of  $^{90}\text{Zr}$  and  $^{nat}\text{Zr}$  from 10 to 140 MeV. Physical Review C, 75(014605), 1-10.

Sarpün, İ.H., Aydın, A., Kaplan, A., Koca, H., Tel, E., 2014. Comparison of fission barrier and level density models for  $(\alpha, f)$  reaction of some heavy nuclei. Annals of Nuclear Energy, 70, 175-179.

Schier, H., Schoch, B., 1974. Investigation of the  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$  and  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  Reactions at Photon Energies Between 150 MeV and 63 MeV. Nuclear Physics A, 229, p.93.

Schwengner, R., Rusey, G., Tsoneva, N., Benouaret, N., Beyer, R., Erhard, M., Grosse, E., Junghans, A.R., Klug, J., Kosev, K., Lenske, H., Nair, C., Schilling, K.D., Wagner, A., 2008. Pygmy Dipole Strength in  $^{90}\text{Zr}$ . Physical Review C, 78(6), p.064314.

Shoda, K., 1961. Reaction  $^{16}\text{O}(\gamma, p)^{15}\text{N}$  by 20,5 MeV polarized. Journal of the Physical Society of Japan, 16(10), p.1841.

Shultis, J.K., Faw, R.E., 2002. Fundamentals of Nuclear Science and Engineering. Marcel Dekker Inc., 519s, Kansas.

Şenyiğit, M., 2011. Nükleer Reaksiyonlar Sonucu Açığa Çıkan Gama Işınları ve Nötronların Germanyum Dedektör Sistemi İle Etkileşmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 126s, Ankara.

Tanyel, B., 1994. Nükleer Fizik. Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova-İzmir.

TAEK, 2014. Hızlandırıcı Fiziği Hızlandırıcı Nedir? Erişim Tarihi: 13.01.2014 [http://www.taek.gov.tr/sik\\_sorulan\\_sorular/](http://www.taek.gov.tr/sik_sorulan_sorular/)

Tavukcu, E., 2002. Level Densities and Radiative Strength Functions in  $^{56}\text{Fe}$  and  $^{57}\text{Fe}$ . North Carolina State University, Department of Physics, Degree of Doctor of Philosophy, Raleigh.

Tel, E., 2000. Denge ve Dengeöncesi Reaksiyon Modelleri Kullanılarak Uyarılma Fonksiyonlarının ve Diferansiyel Tesir Kesitlerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

Terasawa, T., Mory, K., Fujii, Y., Suda, T., Konno, O., Torizuka, Y., Maeda, K., Harty, R., Thompson, M.N., 1983. Photoproton and Photoneutron Studies in the

Intermediate Energy Region Using Tagged Photons. Conf, Symp. on High Energy Photonuclear Reactions, p.311.

THM, 2014. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi Ankara Üniversitesi. Erişim Tarihi: 18.01.2014 <http://thm.ankara.edu.tr/THM>

Ulu, M.O., 2008. Parçacık Dedektörlerinin Tıpta Kullanımı. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, Adana.

Ünal, R., Sarpün, İ.H., Yalın, H.A., 2014. Comparison of Level Density Models in (g,n) Reactions of Some Lanthanide Nuclei. Physics of Atomic Nuclei, 77(3), 310-315.

Van De Vyver, R.E., Ferdinande, H., Knuyt, G., Carchon, R., Devos, J., 1972. Total Photoneutron Cross Sections for  $^{12}\text{C}$  and  $^{19}\text{F}$ . Nuclear Physics A, 198(1), 144-152.

Varlamov, A.V., Varlamov, V.V., Rudenko, D.S., Stepanov, M.E., 1999. Atlas of Giant Dipole Resonance Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections. INDC-Reports, INDC-NDS-0394.

Varlamov, V.V., Stepanov, M.E., Chesnokov, V.V., 2003. New Data on Photoabsorption Reaction Cross Sections. Bull. Russian Academy of Sciences-Physics, 67, p.724.

Varlamov, V.V., Peskov, N.N., Stepanov, M.E.  $^{90}\text{Zr}$  GDR Isospin Splitting New Parameters. Erişim Tarihi: 18.06.2013. <http://www.cdfc.sinp.msu.ru/pdf>

Verbinski, V.V., Courtney, J.C., 1965. Photoneutron Spectra and Cross Sections for  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$ . Nuclear Physics, 73(2), 398-412.

Veyssiere, A., Beil, H., Bergere, R., Carlos, P., Lepretre, A., De Miniac, A., 1974. A study of the photoneutron contribution to the giant dipole resonance of s-d shell nuclei. Nuclear Physics, Section A, 227, p.513.

Yavaş, Ö., 2011. THM Projesi. UPHDYO-VII (VII. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu), 20-26 Ağustos, Bodrum.

Yavaş, Ö., 2013. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi. UPHDYO-IX (Türk Fizik Derneği IX. Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu), 10-15 Eylül, Bodrum.

Yılmaz, M.E., 2012. Orta Enerjili Protonlar İle Uyarılan  $^{116,118,124}\text{Sn}$  Çekirdekleri İçin Çift Diferansiyel Nötron Emisyon Tesir Kesitlerinin Hesaplanması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Afyonkarahisar.

Weisskopf, V., 1970. Three Steps in the Structure in the Matter. Physics Today, 23(8).

Wyckoff, J.M., Ziegler, B., Koch, H.W., Uhlig, R., 1965. Total Photonuclear Cross Sections for Low Atomic Number Elements. *Physical Review*, 137(3B), 576-594.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nurdan KARPUZ  
Doğum Yeri ve Yılı : Afyonkarahisar, 10.07.1982  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : NurdanKarpuz@hotmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Afyon Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi, 2000  
Lisans : AKÜ, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü  
Yüksek Lisans : AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

### Mesleki Deneyim

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| Afyonkarahisar Final Dergisi Dershanesi          | 2007-2009 |
| Afyonkarahisar/Çobanlar Atatürk İlköğretim Okulu | 2010-2011 |
| SDÜ Keçiborlu MYO                                | 2011-2012 |

### Yayınları

- Akkurt, İ., Karpuz, N., Mavi, B., Demir, N., 2014. Activation Cross Sections for the  $(\gamma, n)$  Reactions on Zirconium Isotopes. Annals of Nuclear Energy, 65, 181-183.
- Karpuz, N., Akkurt, İ., Mavi, B., 2013. Activation Cross Section for the  $^{125}\text{Te}(p, xn)$  Reactions in 5.5-100.5 MeV Energy Range. Annals of Nuclear Energy, 60, 341-343.
- Akkurt, İ., Karpuz, N., Mavi, B., 2013. Kurşun İzotoplarının Toplam Fotonükleer Tesir Kesiti. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17-3 Özel Sayı, 20-23.
- Karpuz, N., Boz, M.C., Mavi, B., Öner, F., Akkurt, İ., 2014. Investigation of Production Reaction Cross Section for  $^{137}\text{Cs}$  Used in Radiotherapy. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, 25-29 October, Kemer-Antalya.

- Karpuz, N., Boz, M.C., Mavi, B., Akkurt, İ., 2014. Variation of Photoneutron Cross Section with Mass Number. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, 25-29 October, Kemer-Antalya.
- Karpuz, N., Boz, M.C., Mavi, B., Akkurt, İ., 2014. Cross Sections Calculation of ( $\gamma$ ,N) Reactions for Some Elements. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, 25-29 October, Kemer-Antalya.
- Karpuz, N., Mavi, B., Akkurt, İ., 2014. Calculation of Gamma Strength Functions for Photonucleon Reactions. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, 25-29 October, Kemer-Antalya.
- Karpuz, N., Akkurt, İ., Ünal, R., 2011. Calculations of Total Cross Sections and Excitations Functions of Reactions. Turkish Physical Society 28th International Physics Congre, 6-9 September, Bodrum.
- Demirci, Z.N., Akkurt, İ., Mavi, B., Günoğlu, K., Karpuz, N., 2010. Kurutulmuş Bazı Gıdalarda K-40 Tayini. Türk Fizik Derneği 27. Uluslar arası Fizik Kongresi, 14-17 Eylül, İstanbul.
- Karpuz, N., Erengil, Z.N., Ünal, R., Yalım, H.A., Sarpün, İ.H., Oruncak, B., 2007. Designing and Optimising a TOF (Time Of Flight) Spectrometer. Turkish Physical Society, 24th International Physics Congre, 28-31 Ağustos, Malatya.
- Akkurt, İ., Karpuz, N., Mavi, B., 2013. Kurşun İzotoplarının Toplam Fotonükleer Tesir Kesiti. 7. Ulusal Lüminesans Dozimetri Kongresi, 10-12 Eylül, Eğirdir/Isparta.
- Karpuz, N., Akkurt, İ., 2013. THM-TARLA Bremsstrahlung Foton Tesisi İçin ( $\gamma$ ,n) Reaksiyon Tesir Kesit Hesaplamaları. 7. Ulusal Lüminesans Dozimetri Kongresi, 10-12 Eylül, Eğirdir/Isparta.
- Karpuz, N., Akkurt, İ., Mavi, B., 2012. Zr İzotopları İçin Fotonötron Tesir Kesiti Hesaplamaları. Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü XI. THM YUUP Çalıştayı, 30 Kasım-2 Aralık, Gölbaşı/Ankara.
- Akkurt, İ., Akyıldırım, H., Mavi, B., Günoğlu, K., Karpuz, N., Tekin, H.O., Demirci, Z.N., Ünal, R., Akkurt, A., Yalım, H.A., 2010. Afyon Kaplıcalarında Yüzey Radyasyon Ölçümü. ADIM Fizik Günleri-I, 21-22 Mayıs, Afyonkarahisar.
- Akkurt, İ., Karpuz, N., Mavi, B., Akyıldırım, H., 2010. Afyon Haşhaşında Doğal Radyoaktivite Tayini. ADIM Fizik Günleri-I, 21-22 Mayıs, Afyonkarahisar.