

Nükleer Fizik'te Benzetim Programları Üzerine Değerlendirme

Ramazan Uyar¹, Şevki Kiremitçioglu², M. Erman Yılmaz², Ufuk Akcaalan²

¹ Akdeniz Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Antalya

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar

ruyar@akdeniz.edu.tr, sevkikiremitcioglu@gmail.com, m.erman.yilmaz@gmail.com, ufuk.akcaalan@gmail.com

Özet: Nükleer fizik, teknolojik yeniliklerin ortaya çıkması ya da çıkarılması anlamında önemli bilim alanıdır ve geniş uygulama alanına sahiptir. Bu alanlardan biri olan nükleer tıp, hem teşhis hem de tedavi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Nükleer fizik sayesinde yapılan hızlandırıcılarla, vücuttaki dokular, kemikler ve organlar test edilmekte ve teşhislerde yardımcı olmaktadır. Bunların dışında nükleer reaksiyonların daha iyi anlaşılabilmesi ve nükleer teorilerin düzeltilebilmesi de önemlidir. Bunun için gereken deneysel verinin azlığı, deneylerin maliyetli ve zor gözlemlenebilir olması nükleer fizikçileri benzetim programlarına yönlendirmiştir. Bu programlar sayesinde reaksiyonların doğası gereği hesaplanması zor ve karmaşık olan hesaplamalar yapılabilmektedir. Böylece deneyler yapılmadan önce olası sonuçların ihtimalleri hesaplanabilmekte ve deney daha kontrollü bir şekilde yapılabilmektedir. Böylece daha kesin sonuçlar daha az maliyetli hale gelmektedir. Bu açıdan benzetim programları nükleer fizik alanı için önemli bir yer tutmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Nükleer Fizik, Benzetim Programları, Talys Talys 1.2, Geant4, Empire II, Alice/ASH, PCross-03, Cem95.

Assesment on Simulation Programs on Nuclear Physics

Abstract: Nuclear physics is a very important science field in means of new technological innovations to emerge and it has wide application fields. Nuclear medicine; as one of these fields, is used both for diagnosis and treatment purposes. With the accelerators made through Nuclear Physics; tissues, bones, organs in the body are being examined and lend assistance to diagnosis. Other than these, it is important to straighten the nuclear theories and bring a better understanding to nuclear reactions. There for Physicists are channeled to simulation programs, as result of the minority of experimental data, the high cost and the difficulty in observation of the experiments. Thanks to these programs, the calculations, which are very difficult because of the nature of reactions; can be made. In this manner, the probabilities of potential results of an experiment can be calculated and the experiments can be made more controlled. Thus more certain results become less costly. In that respect Nuclear simulation programs book a great place for Nuclear Physics

Keywords: Nuclear Physics, Simulation Programs, Talys 1.2, Geant4, Empire II, Alice/ASH, PCross-03, Cem95.

1.Giriş

Nükleer fizikteki deneysel ve teorik çalışmalar, 20. Yüzyıl fiziğinin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin nükleer fizik laboratuvarlarındaki deneysel sonuçlar neticesinde;

- Kuarkların etkileşmesinden oluşan çeşitli problemlerin açığa kavuşturulması,
- Big Bang'den hemen sonra evrenin ilk oluşumu esnasında meydana gelen işlemlerin anlaşılması,

gibi bir çok inanılmaz problemin çözülmesine katkı sağlamaktadır.[1]

Nükleer fizik, teknolojik yeniliklerin ortaya çıkması ya da çıkarılması anlamında önemli bir bilim alanıdır ve günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Bu alanlardan biri olan nükleer tıp, hem teşhis hem de tedavi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Nükleer fizik sayesinde yapılan hızlandırıcılarla, vücuttaki dokular, kemikler ve organlar test edilmekte ve teşhislerde yardımcı olmaktadır. Nükleer reaksiyonlar açısından bakacak olursak; elde edilen deneysel sonuçlar, temel

çekirdek fiziğinin anlaşılabilmesi bakımından önem kazanmaktadır. Nükleer reaksiyonların enerji bağımlılığı detaylı olarak bilinmediği için çok sayıdaki enerji değeri için tesir kesitlerinin ve spektral yayınlanma şekillerinin incelenmesi gerekmektedir. Reaktörlerde üretilen geçici çekirdekler, genellikle kısa yarı ömürlüdür. Bu çekirdeklerin tesir kesitlerin ve yayınlanma spektrumlarının doğrudan ölçülmesi pek mümkün değildir. Bu anlamda, zaman kazanılması açısından yapılacaklar konusunda ilk olarak, bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanması gereklidir.

Diğer bir kullanım alanı da temel bilimler içindedir. Fizikte; katıların elektron yapısı, yüzeylerin ve ara yüzeylerin incelenmesi amacıyla nükleer fizikten yararlanılır.

Kimyada; polimerik yapıların incelenmesi, iz elementi analizi alanlarında ve biyolojide ise; radyografi, akışkan yüzeylerde kompleks biyomoleküllerin yapısının incelenmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır.[2] Dünyada nükleer enerji için yapılmış ve yapılmakta olan nükleer güç santralleri de

nükleer fiziğin yararlı alanlarından bir diğeridir. Bu güç santrallerinde gama parçacığı kullanılarak yapılan reaksiyonlar, santrallerin güvenliği, malzemelerin radyasyondan kaynaklanan yapısal bozulmalarının ölçülmesi gibi noktalarda uygulanmaktadır. Nötron üretimi için kullanılan pek çok nükleer reaksiyon türü mevcuttur. Ancak, nötronların üretiminde protonların kullanımı, nötron üretimi açısından en uygun yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak durumun bu olmasına rağmen, fotonötronlar ile uyarılan çekirdek reaksiyonları, fisyon ve füzyon enerji reaktörlerinin tasarımında ve güvenlik testlerinde önemli yer tutar. Bu tür reaksiyonların oluşturulması sırasında, kullanılan malzemelerin yapısal dayanıklılığını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Bu nedenle, problemlerin öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için teorik hesaplamaların yapılabilmesi gerekmektedir. Bahsedilen teorik hesaplamaların yapılabilmesi konusunda benzetim programlarının rolü çok büyüktür. Bu programlar sayesinde analitik çözümün zor ya da imkansız olduğu matematik problemlerinin çözümü yapılabilmektedir.

2. Benzetim Programları Neden Gerekli?

Nükleer fizik ve nükleer fiziğin gelişimiyle oluşan diğer alanlarda karşılaşılan en büyük sorunlardan birideneylerin maliyetli olmasıdır. Bu durum ister istemez yapılacak deneylerin verimlerinin yüksek olmalarını gerektirmektedir. Maliyetin dışında örneğin bir malzeme yada hızlandırıcı tasarımında, bu tasarımı yapmadan önce gerekli tüm hesaplamaların yapılması ve gerekiyorsa ona göre önlemler alınması şarttır. Ayrıca nükleer tıp alanında bu hesaplamalar hayati öneme sahiptir. Ayrıca şu anda var olan gerçekleşen olayların anlaşılması için oluşturulan teorik çalışmaların geliştirilmesi içinde bu hesaplamalara ihtiyaç vardır. Bu hesaplamaların yapılması konusunda benzetim programları bizim için büyük kolaylık teşkil eder. Bu sayede istenilen hedefe odaklı sağlıklı ve verimli deneyler yapabilmek için gerekli hesaplamalar kolaylıkla yapılabilmektedir. Kısacası benzetim programı ihtiyaçlarımızı;

1. Kurulacak deneysel sistemlere karar verebilmek için,
 2. Deneysel sonuçlarla, simülasyon sonuçlarını karşılaştırıp hata oranlarını ya da analizin doğruluğunu bulabilmek için,
 3. Teoriden gelen simülasyon verileri ile deneysel sonuçları karşılaştırıp teoriyi test edebilmek için,
- şeklinde üç ana başlıkta toplayabiliriz. [3]

3. Benzetim Programları

3.1. Talys 1.2

TALYS, Linux işletim sisteminde çalışan ve fortran programlama diline sahip, nükleer reaksiyonların

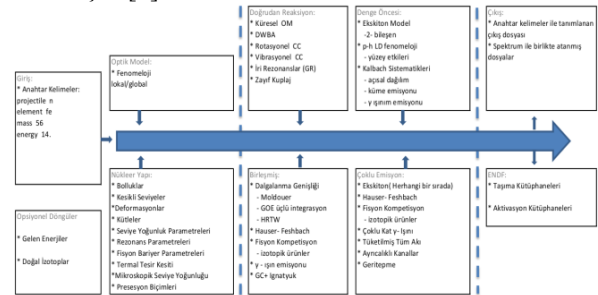
analizi ve tahmini için oluşturulmuş bir bilgisayar kod programıdır. Simülasyon reaksiyonlarda, nötron, proton, döteryum, trityum, 3-He, α parçacıkları ve gama ışınları 1 keV – 250 MeV enerji bölgesinde çalışılabilir. Hedef çekirdek kütleleri için $12 < A \leq 339$ durumuna geliştirilmiştir [4] Nükleer model ve süreçlerin veri tabanı ile kombinasyonlarda, optik model, birleşik çekirdek istatistiksel teori, doğrudan reaksiyonlar (elastik ve elastik olmayan saçılmalar) ve denge öncesi süreçler teorik analiz tabanında yapılabilmektedir [5].

TALYS çıktı dosyalarında,

- Esnek, esnek olmayan ve toplam tesir kesiti,
- Elastik saçılma açısal dağılımlar,
- Kesikli seviyelerde açısal dağılımlar,
- İzomerik ve taban durum tesir kesiti,
- Toplam parçacık (n,xn), (n,xp) v.b enerji ve çift diferansiyel tesir kesitleri,
- Tekli ya da çoklu emisyon tesir kesitleri,
- Ürün çekirdeklerin oluşum tesir kesiti sonuçları

gibi veriler elde edilebilir.

Talys 1.2 çalışma mantığı Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapılmak istenen çalışma yukarıdaki şemaya göre şekillendirilip, hesaba katılması istenen ekstra durumlar var ise belirlenen parametreler eklenerek daha detaylı sonuçlar alınabilmesi mümkündür. Örnek olarak doğal Ce çekirdeği üzerine yollanan bir gama mermisi ile gerçekleştirilen (g,n)+(g,n+p) reaksiyonunun GDR parametreleri kullanılarak TALYS 1.2 programına ait girdi dosyası, çıktı dosyası ve sonuçların literatürle karşılaştırılması aşağıda verilmiştir. [6]



Şekil 29 Talys 1.2 Reaksiyon Mekanizmaları ve Nükleer Modelleri

```
projectile g
element ce
mass 0
energy 15.04
channel 3
abundance z058
egr 58 140 15.04 E1
sgr 58 140 383 E1
grg 58 140 4.41 E1
```

Şekil 2 Örnek girdi dosyası

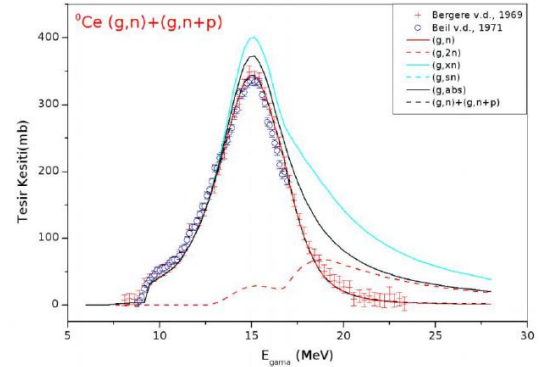
```
xs.100000.tot
# g + nat-Ce
#
#
## energies = 64
# E xs
6.000E+00 0.00000E+00
7.000E+00 0.00000E+00
7.500E+00 1.72973E+00
8.080E+00 2.76542E+00
8.350E+00 3.05462E+00
8.620E+00 3.36333E+00
8.890E+00 3.70474E+00
9.160E+00 4.09623E+00
9.440E+00 3.08246E+01
9.710E+00 3.66940E+01
9.980E+00 4.13461E+01
1.025E+01 4.61738E+01
1.052E+01 5.13545E+01
1.080E+01 5.74843E+01
1.107E+01 6.55291E+01
1.134E+01 7.64769E+01
1.161E+01 8.87281E+01
1.216E+01 1.19722E+02
1.243E+01 1.38667E+02
1.270E+01 1.60025E+02
1.297E+01 1.82801E+02
1.322E+01 2.06090E+02
1.352E+01 2.36061E+02
1.379E+01 2.63951E+02
1.406E+01 2.90868E+02
1.433E+01 3.15245E+02
1.460E+01 3.33511E+02
1.488E+01 3.43915E+02
1.515E+01 3.44062E+02
1.542E+01 3.34774E+02
1.569E+01 3.17806E+02
1.596E+01 2.95765E+02
1.624E+01 2.70292E+02
1.651E+01 2.45257E+02
1.678E+01 2.17237E+02
1.705E+01 1.82814E+02
1.732E+01 1.51824E+02
1.760E+01 1.23412E+02
1.787E+01 1.01166E+02
1.814E+01 8.16763E+01
1.841E+01 6.56194E+01
1.868E+01 5.26600E+01
1.896E+01 4.22520E+01
1.923E+01 3.45880E+01
1.950E+01 2.87269E+01
1.977E+01 2.41210E+01
2.004E+01 2.04050E+01
2.032E+01 1.71591E+01
2.056E+01 1.48381E+01
2.086E+01 1.24621E+01
2.113E+01 1.06935E+01
2.140E+01 9.23135E+00
2.168E+01 7.99253E+00
2.195E+01 6.98487E+00
2.222E+01 6.19422E+00
2.249E+01 5.49172E+00
2.276E+01 4.93239E+00
2.304E+01 4.43729E+00
2.331E+01 4.04480E+00
2.400E+01 3.27518E+00
2.500E+01 2.55207E+00
2.600E+01 2.08367E+00
2.700E+01 1.74786E+00
2.800E+01 1.49783E+00
```

Şekil 3 Örnek çıktı dosyası

3.2. Giant 4

Geant3 CERN'de Fortran dili kullanılarak geliştirildi. (1982-1994). Geant4 ise (C++) dili kullanılarak Geant3'ün modifiye edilmiş halidir. Geant4 SLAC' da BaBar deneyinde 2000 yılından itibaren kullanılmaktadır. "GEANT4, maddeden geçen ve etkileşen parçacıkların simülasyonunu yapabilen yazılımdır (<http://www.cern.ch/geant4>). Geant4

ATLAS, CMS, LHCb deney merkezlerinde 2004' den itibaren Monte Carlo Simulasyon programı olarak kullanılmaktadır.[7] Geant4 (GEometry ANd Tracking) programı Monte Carlo metodu aracılığıyla temel parçacıkların madde içerisinde geçişinin simülasyonunu yapar. Başlangıçta, yüksek enerji fiziği deneyleri için tasarlanmıştır, ancak günümüzde nükleer fizik, hızlandırıcı fiziği, medikal ve uzay bilimi gibi diğer birçok alan da kullanıma sahiptir. Parçacık sıfır kinetik enerjiye ulaşıncaya kadar veya bir etkileşme sonucu yok oluncaya kadar, parçacığın madde ve dış elektromanyetik alanlarla etkileşmelerini dikkate alarak adım adım parçacığın taşınımını yapar. Taşınımın başında, sonunda taşınımındaki her bir adımın bitiminde, parçacık, detektörün duyar hacmine girdiği durumda, kullanıcının taşınım sürecine erişmesine ve simülasyon sonuçlarını almasına olanak sağlar. Bunlar "Kullanıcı Eylemleri (User Actions) " olarak adlandırılır.



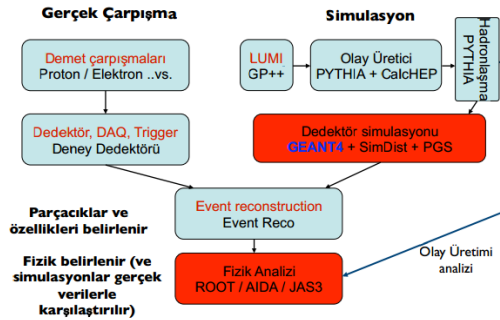
Şekil 4 Örnek girdi dosyasına ait olarak elde edilen örnek reaksiyon grafiği.

Geant4 Parçacık madde etkileşmeleri için çok sayıda fizik modeli sağlar. Bunlar Elektromanyetik Süreçler, Hadronik Süreçler, Foton/lepton-hadron Süreçleri, Optik Foton Süreçleri, Bozunum Süreçleri, Sağanak Parametrizasyonu ve bunun gibi daha birçok sürecin hesaplanmasında kullanılabilir. Geant4 te Linux standart bir çalışma çevresidir, bu nedenle Unix komutunun nasıl kullanılacağına ve bir C++ kodunun nasıl derleneceğine dair az bir bilgi yeterlidir. Nesne Yönelimli Teknoloji (Object Oriented Technology) kullanır. Sadece karmaşık uygulamaların geliştirilmesinde derin bilgi gerekir. Simülasyonun temel yapısı ilk olarak, kullanılacak demet elemanlarının (mıknatıslar, RF kaviti vb.) geometrilerini, yapıldıkları maddeleri ve lokal alanlarını tanımlamak ve sonra bu elemanları world'e (tüm geometriyi saran hacime) yerleştirmektir. Her bir eleman, konuma, rotasyona ve kendisine ait bir alan değerine sahip olabilir. Bu elemanlar için parametreler bir ASCII (American Standard Code for Information Interchange) input dosyasında veya komut satırında bulunabilir.

Simülasyon tüm ayrıntılarıyla bir ASCII input dosyasında yer alır:

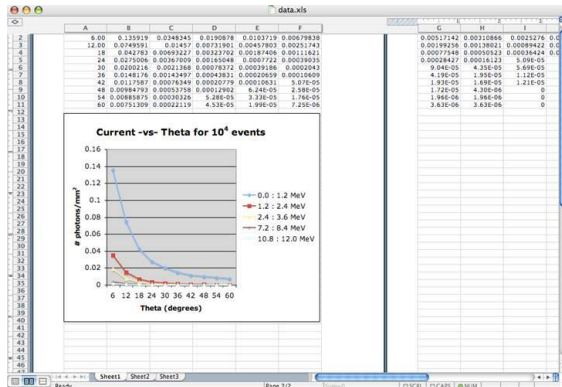
- Geometri
- Giriş demeti (Input Beam)
- Fizik süreçleri
- Program kontrol parametreleri
- Çıkış Ntuple'ların üretilmesi

Input dosyası argümanlarıyla birlikte bir komutlar dizisinden oluşur. Her bir komut kendi argüman listesine sahiptir. Komut ve argümanlar ayrıntılı olarak yazılır, yani input diğer bir şahıs tarafından kolaylıkla anlaşılabilen bir simülasyon kaydı olur. [8]



Şekil 5 Geant4 için örnek analiz şeması

Aşağıda örnek bir çalışma sonucu gösterilmiştir. [9]



Şekil 6 Geant4 örnek çıktı grafiği

3.3. Kullanılan Diğer Benzetim programları

Bahsi geçen programlar dışında amaca göre farklı daha bir çok benzetim yazılımı bulmak mümkündür. Amaçlanan hedefin gereksinimlerine göre bu programlarda özelleşmektedir. Bazıları aynı reaksiyonların hesaplamalarını gerçekleştirebilse de bazı özel reaksiyonlar için daha üstün simülasyon programları gerekmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.3.1. Empire II

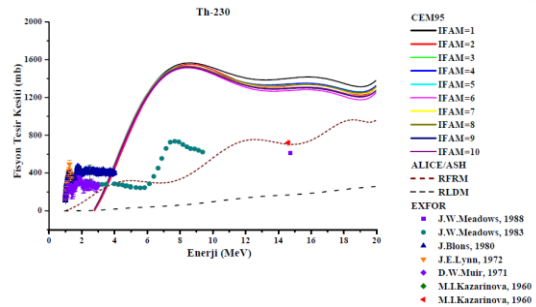
EMPIRE çeşitli nükleer modeller içeren, nükleer reaksiyon kodlarının modüler bir sistem olup, enerjileri ve olay parçacıkları geniş bir aralığı üzerinde hesaplamalar için tasarlanmıştır. Bir mermi, bir nötron, proton, herhangi bir iyon (ağır iyonları dahil) veya foton olabilir. Enerji aralığı nötron bağlı reaksiyonlar (~ keV) için çözülmemiş rezonans bölgesi başından uzanan ve ağır iyon kaynaklı reaksiyonlar için birkaç yüz MeV kadar gider. Kodu doğrudan, ön-denge ve bileşik çekirdek olanlar dahil büyük nükleer tepkime mekanizmaları, oluşturmaktadır.

Doğrudan reaksiyonlar genelleştirilmiş bir optik modeli (ECIS03) veya basitleştirilmiş birleştiğinde kanalları yaklaşım (CCFUS) tarafından açıklanmıştır. Ön denge mekanizma bir NVWY çok adımlı bir bileşimi ile ya da bir küme emisyonu (PCROSS) ile ya da bir ön denge uyarım modeli ile veya başka bir göre, bir deformasyon bağımlı çok adımlı bir direk (ORION + TRISTAN) modeli ile düzeltilebilir.

A <5 mermiler için küresel optik modeli iletim katsayıları kullanılarak füzyon kesiti hesaplar. Ağır İyon oluşan reaksiyonlar söz konusu füzyon kesiti basitleştirilmiş çiftli kanal yöntem (kod CCFUS) dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar kullanılarak saptanabilir. Yarı-Denge emisyon kuantum mekaniksel teorileri (TUL-MSD ve NVWY-MS) açısından ele alınır. Gama ışınması MSC katkısı dikkate alınır. Bu hesaplamalar sonraki partikül emisyonu keyfi bir sayı ile istatistiksel bozunma tarafından takip edilmektedir. [10]

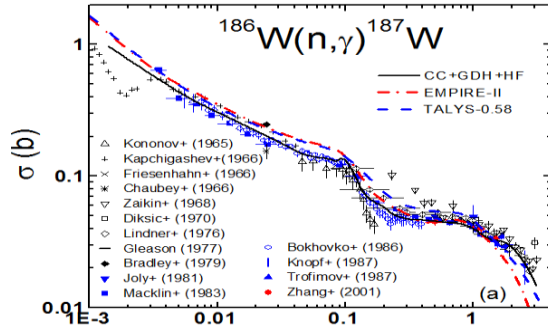
3.3.2. Alice-ASH

ALICE/ASH [11] program kodu, ALICE91 [12] program kodunun biraz değiştirilmiş ve geliştirilmiş bir sürümüdür. ALICE/ASH program kodu 300 MeV'lik gelme enerjisine kadar; uyarılma fonksiyonu, ikincil parçacıkların açısız dağılımı, tesir kesiti hesapları ve yayılma spektrumu için uygulanabilir.



Şekil 7 Empire II ve Talys programları ile hesaplatılmış çalışma örneği. []

Başlangıç uyarılma sayısı $n_0=3$ (proton, nötron ve deşik sayıları toplamı) olarak alınır. Ayrıca; proton girişli reaksiyonlar için hesaplamalardaki uyarılma sayısı da sistematiksel hesaplama yöntemi ile bulunur.



Şekil 8 Alice/Ash ve Cem95 programları ile hesaplatılmış çalışma örneği. [13]

3.3.2. CEM95

Cascade Exciton Model hesaplamalarını CEM95[14] bilgisayar kodu ile yapar. Bu kod, CEM92M [15] modelinin gelişmiş versiyonudur. Nükleer reaksiyonların hesabı için Monte Carlo hesaplamasını kullanır. Bu yöntem, seviye yoğunlukları üzerinde, bütün bilinen verilerin içerildiği sistematiksel bir hesaplama türüdür. Yüksek bir enerjide seviye yoğunluk parametresinin asimtotik Fermi Gas değeri ile $a(Z, N, E^*)$ 'nin seviye yoğunluk parametresininin fonksiyonel oluşumunu kullanır.

4.Sonuç

Benzetim programları, nükleer fizik ve bu alanla ilişkili yan alanların geliştirilmesi açısından kilit rol oynamaktadır. Bu sayede zamandan ve özellikle maddi olarak azımsanamayacak avantajlar sağlamakla beraber teknoloji ve bilim adına yeniliklerin öncüsü olmuştur. Ayrıca nükleer tıp alanında hastaların en az zarar ile tedavi olmaları için gereken hesaplamalar bakımından benzetim programları hayati önem arz eder.

Şu anda yaygın kullanım alanına sahip bu programlar gittikçe gelişmekte ve anlaşılmasını doğa olaylarına yeni yaklaşımlar getirmek için kullanılmaktadır. Bu konuda hala eksikleri bulunmasına rağmen şu anda geldiği konum gelecek için umut vericidir.

Bu çalışmada nükleer fizik hesaplamaları için kullanılan bazı benzetim programlarının kullanım nedenleri ve amaçları anlatılmıştır. Gelişen bilişim sektörünün nükleer fiziğe olan olumlu etkisi ve sonuçları hakkında bilgi verilmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Krane, K. S. (2006), Introductory Nuclear Physics, (Çeviri Editörü: B.Şarer), Nükleer Fizik 1. Cilt ,II. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [2] Bayrak, O., 2009, Nükleer Reaksiyonların Yarı-Klasik Yöntemler Kullanarak Analizi, Kayseri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Kayseri
- [3] http://p409a.physics.metu.edu.tr:8080/hupp-files/28_08_12_files/Geant4_v2.pdf
- [4] Koning, A. J., Hilaire, S. and Duijvestijn, M. (2009), TALYS 1.2 A Nuclear Reaction Program, NRG – Nuclear Research and Consultancy Group, Netherlands.
- [5] Koning, A. J. and Duijvestijn, M. C. (2006), New nuclear data evaluations for Ge isotopes, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research Sec. B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 248, Iss. 2, pp. 197 – 224
- [6] Uyar, R., 2011, Bazı Doğal Elementlerin Fotonötron Tesir Kesitlerinin Teorik Hesaplanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar
- [7] http://thm.ankara.edu.tr/tac/YAZOKULU/yazokulu7/dersler/EPilicer_Geant4.pdf
- [8] http://thm.ankara.edu.tr/uphuk/3/presentations/uphuk3_adnankilic.ppt
- [9] <http://geant4.slac.stanford.edu/tutorial/mcgill06/HandsOn3/HandsOn3.htm>
- [10] M Herman, R Capote, BV Carlson, P Obložinský, M Sin, A Trkov, H Wienke, V Zerkin (2007), EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation, Nuclear Data Sheets, 108 (12), 2655-2715
- [11] Broeders C.H.M., Konobeyev A.Y., Korovin A.Y., Lunev V.P., Blann M., 2006. ALICE/ASH-Precompoundand Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions at Intermediate Energies, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wissenschaftliche Berichte, p. 230.
- [12] Blann, M., 1991. ALICE-91, Report PSR-146, LLNL/IAEA/NEA Data Bank, France.

- [13] Yaşar, G., 2010, Tıbbi Uygulamalarda Kullanılan Bazı Radyoizotopların Reaksiyon Tesir Kesitlerinin Ve Nötron Yayınlanma Spektrumlarının İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta
- [14] Mashnik S.G., 1980. CODE CEM95, Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow, p. 14.
- [15] Gudima, K. K., Mashnik, S. G., Toneev, V. D., 1983. Cascade-exciton model of nuclear reactions. Nucl. Phys. A 401, 329–361.