



3 GeV'e kadar enerjiye sahip protonlarla ışınlanan kurşun hedefi için p,d,t, ³He, ve ⁴He üretim tesir kesitlerinin değerlendirilmesi

S. AKÇA^{1,*}, A. Yu. KONOBEYEV², U. FISCHER²

^{1,*}Çukurova üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Adana

²Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü, Nötron Fiziği ve Reaktör Teknoloji Enstitüsü, Karlsruhe, Almanya

Received: 27.10.2014; Accepted: 05.11.2014

Özet. Nükleer model hesaplamaları ve mevcut deneysel dataların analizinden yararlanılarak 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan Pb hedefinin değerlendirilmiş p,d, t, ³He, ve ⁴He üretim tesir kesiti dataları elde edilmiştir. Gaz üretim tesir kesiti hesaplamaları intranükleer cascade model, denge-öncesi exciton model, geometri bağımlı hibrit model, Weisskopf-Ewing model, ve Hauser-Feshbach modelleri kullanan CASCADE, TALYS, ALICE/ASH kodları ile yapılmıştır. Değerlendirme KIT/INR'de geliştirilen BEKED kod paketindeki istatistiksel metodlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz üretimi, tesir-kesiti, değerlendirilmiş data, doğal kurşun

Evaluation of p, d, t, ³He, and ⁴He production cross-sections for lead irradiated with protons at energies up to 3 GeV

Abstract. Evaluated p, d, t, ³He, and ⁴He production cross-section data for Pb irradiated with proton up to 3 GeV were obtained from the analysis of nuclear model calculations and available experimental data. The calculations of gas production cross-sections were performed using the intranuclear cascade model, the pre-equilibrium exciton model, geometry dependent hybrid model, Weisskopf-Ewing model, and the Hauser-Feshbach model with CASCADE, TALYS, and ALICE/ASH codes. The evaluation was carried out using statistical methods implemented in the BEKED code package improved at KIT/INR.

Keywords: Gas production, cross-section, evaluated data, natural lead

1. GİRİŞ

Nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan proton, döteron, triton, ³He, ve ⁴He gibi hafif ürünler yapısal materyallerde gaz olarak birikirler. Bu gaz üretimleri ışınlanan materyallerin özelliklerinde nükleer hasarlara yol açarak önemli değişikliklere neden olabilirler [1-5]. Bazen ise bu durum trityum üretimi gibi arzu edilen bir hal alabilir. Nötron bombardmanı ile lityum trityuma dönüştürülerek füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabilir. Kurşunun nükleer sistemlerde pek çok kullanım alanı mevcuttur. Özellikle radyasyondan koruma amaçlı zırhlama malzemesi olarak, Gen-IV fisyon reaktör çeşitlerinden olan kurşun soğutmalı reaktör (LFR)

* Corresponding author. Email address: sblakca@gmail.com, sakca@cu.edu.tr

lerde soğutucu sıvı metal olarak, füzyon reaktörlerinde lityumla birlikte yine soğutucu olarak, spallasyon nötron kaynaklarında ise su-soğutmalı katı çubuk hedef veya sıvı Bi-Pb ötektik hedefi olarak kullanılmaktadır [6,7].

Değerlendirme işlemi, tesir kesiti gibi deneysel olarak ölçülen fiziksel parametreleri analiz etme, nükleer model hesaplamalarının tahminleriyle onları birleştirme ve parametrelerin doğru değerlerini ortaya çıkarma sürecidir [8]. Bu doğrultuda bu çalışmanın amacı, 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal kurşunun gaz üretim tesir-kesiti datalarının değerlendirilmesidir. Değerlendirme sürecinde öncelikle var olan datalar incelenmiş ve deneysel datalarda düzeltmeler yapılmıştır. CASCADE, ALICE/ASH ve TALYS nükleer kodları kullanılmış, kullanılan nükleer kodlar yardımıyla elde edilen hesaplama sonuçları üzerinde çeşitli analitik işlemler uygulanmış ve gaz üretim tesir kesiti dataları değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Hesaplamalarda Kullanılan Nükleer Kodlar

Gaz üretim tesir kesiti hesaplamaları CASCADE, ALICE/ASH ve TALYS nükleer kod programları ile yapılmıştır. CASCADE kodu, denge-öncesi hesaplamalarda Barashenkov tarafından geliştirilen ve Monte Carlo metoduna dayanan intra-nükleer cascade buharlaşma modelini kullanır [9-11]. Hızlı parçacık yayınlanması esnasında yoğunluk değişimi etkilerinin ve çekirdekdeki realistik nükleon yoğunluk dağılımının simülasyonunu gerçekleştirebilmesi modelin en önemli özelliklerindedir. Hafif demetlerin dengede olmayan yayılımları (d,t,³He,⁴He) koalesans (coalescence) modeli kullanılarak gerçekleştirilir [12,13]. Bu modele göre, hafif demetlerin üretiminin çift diferansiyel tesir kesiti Denklem (1)'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{d^2\sigma_x^{pre}}{d\varepsilon_x d\Omega} = \frac{1}{16} \left(\frac{Z_t+1}{N_t} \right)^2 \left(\frac{(4\pi/3)P_0^3}{\sigma_{non}(2m^3)^{1/2}} \right)^3 \frac{(\varepsilon_n - E_C)^{1/2}}{\varepsilon_n^2} \left(\frac{d^2\sigma_n^{pre}}{d\varepsilon d\Omega} \right)^4 \quad (1)$$

burada Z_t ve N_t hedefteki nötron ve proton sayıları, σ_{non} elastik olmayan (non-elastic) etkileşimlerin tesir kesiti, m nükleon kütlesi, E_C çıkan parçacıklar için Coulomb potansiyeli, $d^2\sigma_n^{pre}/d\varepsilon_n d\Omega$ dengede olmayan nötronların çift diferansiyel tesir kesiti, P_0 deneysel datalarla kıyaslamadan elde edilen koalesans yarıçapıdır.

3 GeV'e kadar enerjiye sahip protonlarla ışınlanan kurşun hedefi

TALYS kodunda ise denge-öncesi parçacık emisyonu iki bileşenli eksiton (exciton) model kullanılarak simüle edilmiştir. Bu model rezidüal etkileşimler için optik model [14] ve eksiton modelden [15] elde edilen enerji bağımlı matrix elemente sahip iç geçiş oranlarını kullanır. Denge emisyonu Hauser-Feshbach buharlaşma modeli kullanılarak simüle edilmiştir [16,17]. İnelastik saçılmada direkt süreçlerin katkıları ise kodun içerisinde mevcut olan ECIS kod kullanılarak hesaplanır. Nükleer seviye yoğunluğu, programda *ldmodel* input değişkeni ile belirtilir. Seviye yoğunluğu, *ldmodel=1* olarak gösterilen 'sabit sıcaklık' modeli ile birleştirilmiş enerji bağımlı seviye yoğunluğu parametrelili Fermi gas modeli kullanılarak hesaplanmıştır [18]. Koning ve ark. tarafından oluşturulan TALYS nükleer reaksiyon programı hakkında detaylı bilgi Ref. [19]'dan bulunabilir.

ALICE/ASH kodu [20], Blann tarafından oluşturulan ALICE kodunun modifiye edilmiş ve geliştirilmiş versiyonudur. Denge öncesi parçacık emisyonlarının tanımlanması için geometri bağımlı hibrit model (GDH) [21] kullanılır. GDH modelde yayınlanan parçacıkların enerji dağılımı Denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{d\sigma_v(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \pi \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l P_v(l, \varepsilon) \quad (2)$$

burada λ merminin de Broglie dalgaboyu, T_l l .ci dalga için iletim katsayısıdır.

Intranükleer geçiş oranları nükleer maddede nükleon-nükleon etkileşimlerinin efektif tesir kesiti kullanılarak hesaplanır. Nükleer bölgelerdeki etkilerin davranışı için GDH yaklaşımına düzeltmeler yapılır. Eksiton durum yoğunluğu, çiftlenim düzeltmeleri, Pauli prensibi düzeltmeleri ve eksiton durumu için nükleer potansiyel duvarının final derinliğini hesaba katarak hesaplanır. Başlangıç eksiton durumu için proton ve nötronların sayısı çekirdekdeki realistik nükleon-nükleon etkileşimi kullanılarak hesaplanır. Parçacıkların denge parçacık emisyonu açısız momentumun ihmal edildiği Weisskopf-Ewing model kullanılarak tanımlanır.

2.2 Deneysel Datalar ve Dataların Düzeltilmesi

Deneysel datalar, Brookhaven Ulusal Data Merkezinin Deneysel Nükleer Reaksiyon [22] kütüphanelerinden alınmış ve orijinal kaynaklar detaylı olarak incelenmiştir. Herbach ve ark. [23] tarafından ölçülen datalar 100 MeV'in altında yayınlanan parçacıkların enerji bölgesini

kapsayan kısmi tesir kesitleri olup toplam tesir kesitlerini elde etmek için düzeltmeler yapılmıştır.

Herbach ve arkadaşlarının deneysel verileri kullanılarak 1.2 GeV'lik proton enerjisinde gaz üretim tesir kesitlerini tahmin etmek için CASCADE kodu içinde mevcut olan intranükleer cascade buharlaşma modeli kullanılmıştır. 100 MeV'in altında enerjilerde çıkan parçacıkların tesir kesitlerinin hesaplanan ve ölçülen denge-öncesi kısımları arasındaki uyumu elde etmek için döteron, triton, ^3He ve ^4He parçacıklarının dengede olmayan yayınlanmalarının simülasyonu için uygulanan yüksek enerjili birleşim modelinin input parametreleri değiştirilmiştir. 1.2 GeV'lik proton gelme enerjisinde CASCADE kodu ile hesaplanan tesir kesitinin 100 MeV'in altındaki değeri koddaki enerji spektrası bilgileri kullanılarak 100 MeV'in altında ölçülen değere normalize edilmiştir. 100 MeV'in üzerindeki enerjilerde ölçülen üretim tesir kesitini tahmin etmek için 100 MeV'in üzerindeki hesaplanan tesir kesiti bulunan normalizasyon katsayısı ile çarpılmıştır. Elde edilen bu tesir kesiti 100 MeV'in altındaki ölçülen data değerine eklenerek hidrojen ve helyum izotopları için toplam deneysel üretim tesir kesitleri elde edilmiştir. Herbach ve ark. tarafından yapılan ölçüm sonuçları şekillerde düzeltilmiş haliyle verilmiştir.

2.3 Gaz Üretim Tesir-kesiti Datalarının Değerlendirilmesi

Gaz üretim tesir kesitlerinin değerlendirme süreci; ölçülen dataların seçimini, analizini ve düzeltilmesini, çeşitli kodlar kullanılarak yapılan hesaplamaları, ağırlıklama, toplama, yumuşatma ve fitleme (weighting, summing, smoothing, fitting) gibi çeşitli prosedürleri kapsamaktadır.

Farklı modellerin kullanımı tesir kesiti hesaplamalarında istatistiksel olarak farklı sonuçlara dolayısıyla da tesir kesitlerinde belirsizliğe yol açar. Tahmin edilen tesir kesitlerinin belirsizliğini azaltmak için aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$\sigma(E) = \sum_{i=1}^M w_i \sigma_i(E) \left(\sum_{i=1}^M w_i \right)^{-1} \quad (3)$$

burada σ_i i 'nci nükleer model kullanılarak hesaplanan tesir kesiti, w_i kullanılan kodların istatistiksel ağırlığı, M incelenen tesir kesitlerinin hesaplamaları için uygulanan farklı kodların

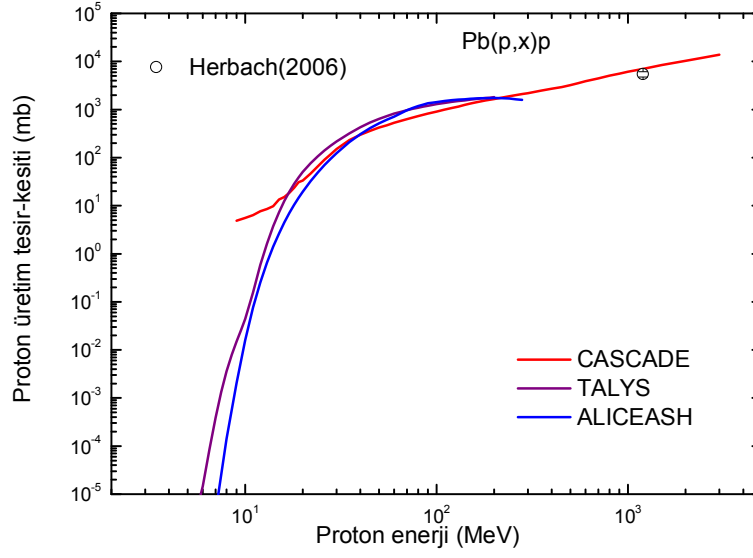
3 GeV'e kadar enerjiye sahip protonlarla ışınlanan kurşun hedefi

toplam sayıdır. w_i temsil ettiği nükleer model kodunun tahminlerinin kalitesini ifade eder. Weighting (ağırlıklama) süreci ile ilgili bilgiler Konobeyev ve ark. [24-27] tarafından yapılan çalışmalarda detaylı olarak bulunabilir.

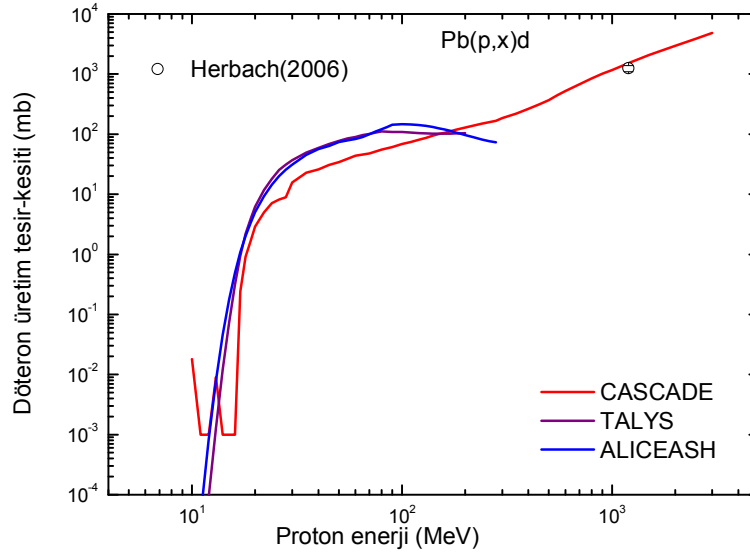
Denklem (3) uygulanarak dört kodun hesaplama sonuçları her üretim tesir kesiti için tek bir sonuca dolayısıyla tek bir eğriye dönüştürülmüştür. Elde edilen bu tesir kesiti sonuçları irdelendiğinde dört kodun sonuçlarının kullanıldığı bölgedeki tesir kesiti değerlerinin sadece CASCADE kodunun kullanıldığı bölgelerdeki değerlerden daha güvenilir olduğu söylenebilir. Tek bir koda ait hesaplanan üretim tesir kesiti sonuçlarının güvenilirliğini artırmak için 3 GeV'e kadar exponansiyel bir fonksiyon önerilmiştir. Önerilen bu fonksiyon yardımıyla toplama (summing) süreci gerçekleştirilerek daha güvenilir tesir kesiti sonuçları elde edilmiştir. KIT/INR'de oluşturulan BEKED kod paketi içindeki özel bir kod kullanılarak smoothing (yumuşatma) işlemleri yapılmış ve elde edilen yeni datalar mevcut deneysel datalara fitlenmiştir [28].

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Protonlarla ışınlanan doğal kurşun için CASCADE, ALICE/ASH ve TALYS nükleer kod programları kullanılarak proton, döteron, triton, ^3He ve ^4He üretim tesir kesitleri hesaplanmıştır. Nükleer model kodları ve deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilen hesaplama sonuçları Şekil 1-5'de verilmiştir. Farklı kodlar kullanılarak yapılan hesaplama sonuçlarının aynı enerji değerlerinde birbirinden farklı olduğu görünmektedir. Düzeltilmiş deneysel tesir kesiti dataları, mevcut datalar, hesaplama sonuçları ve analitik yöntemler kullanılarak gaz üretim tesir kesitleri değerlendirilmiştir. Yeni değerlendirilmiş gaz üretim tesir kesiti verileri Şekil 6-10'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, düşük enerjilerde TALYS hesaplama sonuçlarının değerlendirmeye katkısı daha belirginken yüksek enerjilerde CASCADE hesaplama sonuçlarının katkıları daha belirgindir.

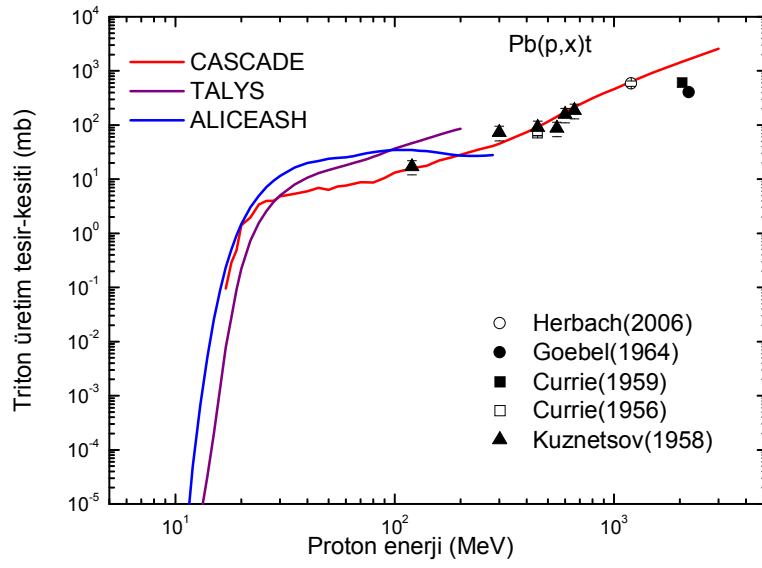


Şekil 1. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için çeşitli kodlar kullanılarak hesaplanan proton üretim tesir kesitleri

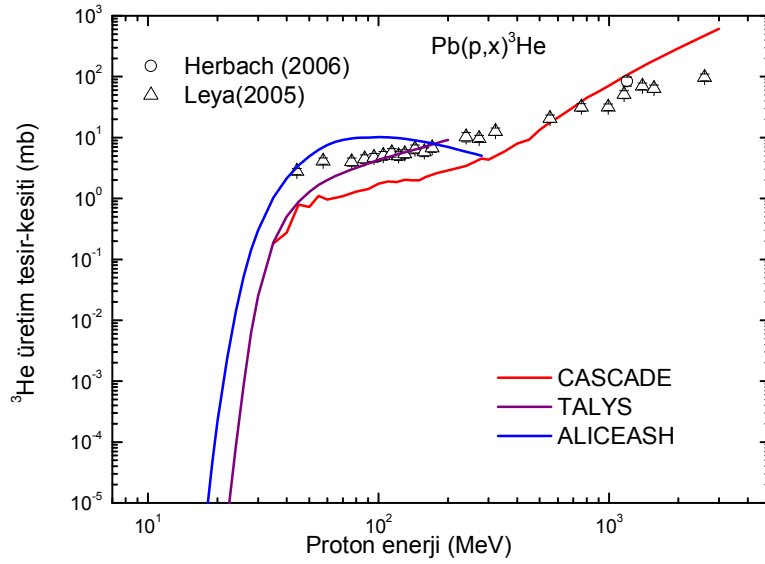


Şekil 2. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için çeşitli kodlar kullanılarak hesaplanan döteron üretim tesir kesitleri

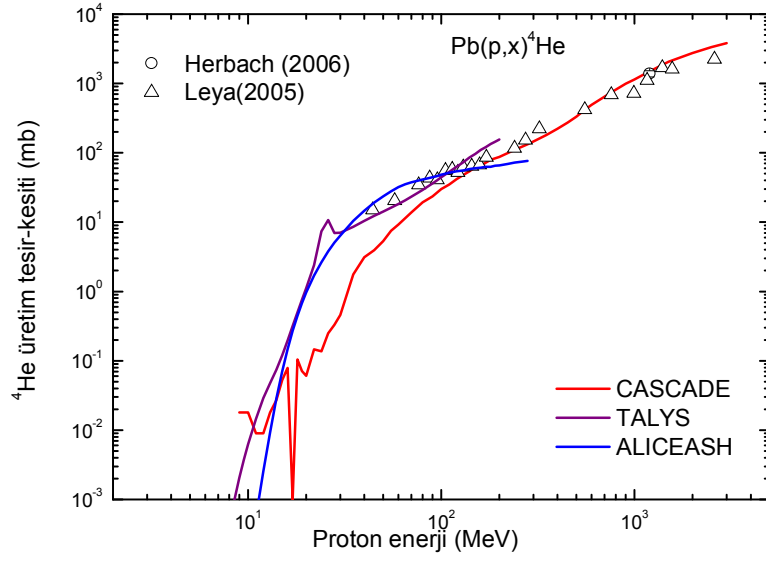
3 GeV'e kadar enerjiye sahip protonlarla ışınlanan kurşun hedefi



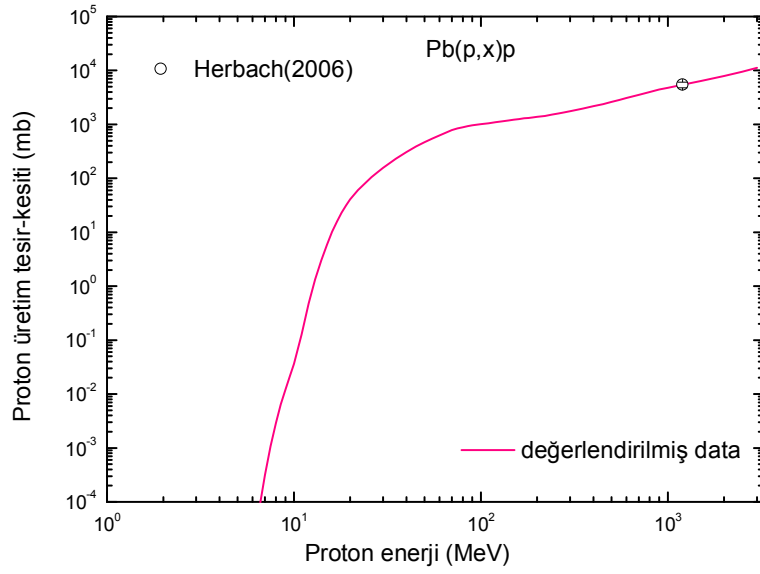
Şekil 3. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için çeşitli kodlar kullanılarak hesaplanan triton üretim tesir kesitleri



Şekil 4. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için çeşitli kodlar kullanılarak hesaplanan 3He üretim tesir kesitleri

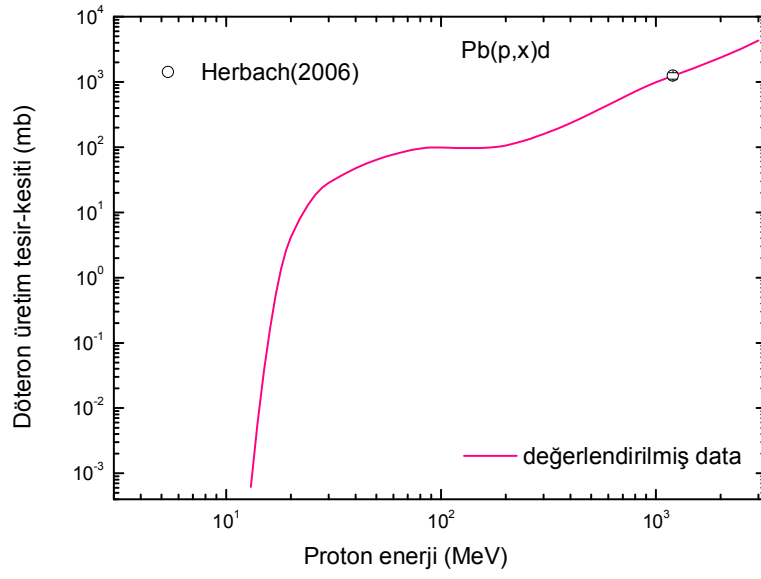


Şekil 5. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için çeşitli kodlar kullanılarak hesaplanan ⁴He üretim tesir kesitleri

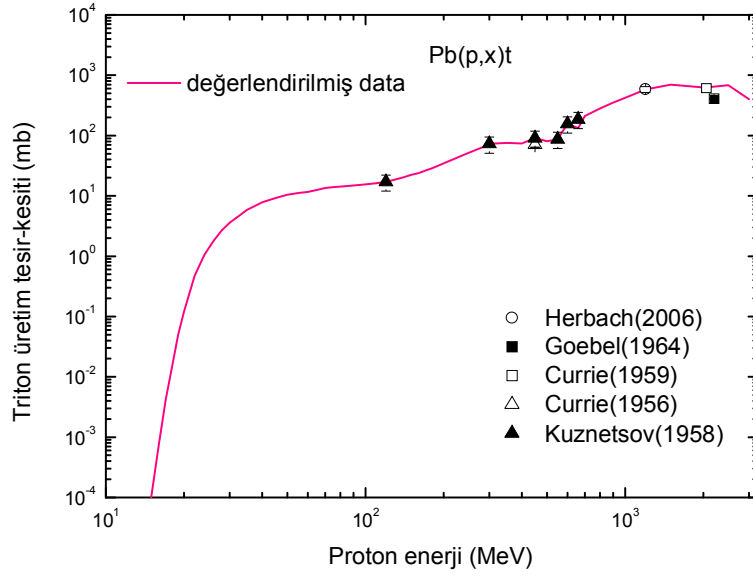


Şekil 6. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için yeni değerlendirilen proton üretim tesir kesitleri

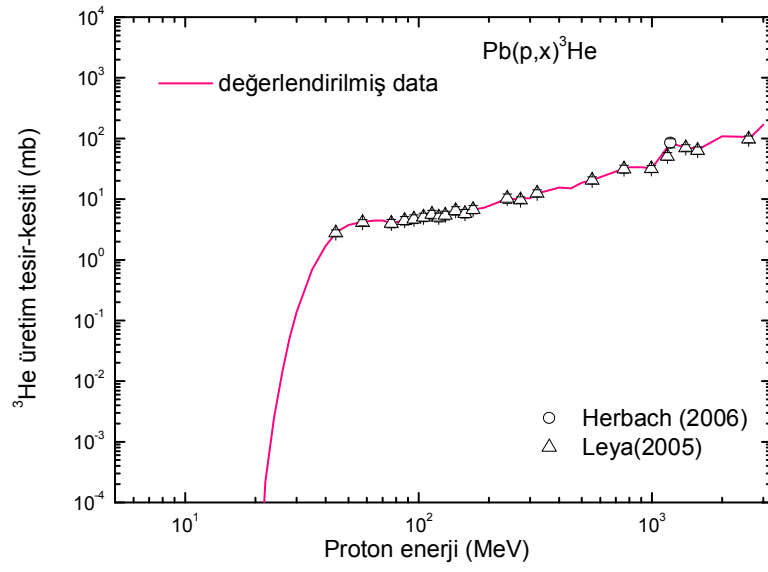
3 GeV'e kadar enerjiye sahip protonlarla ışınlanan kurşun hedefi



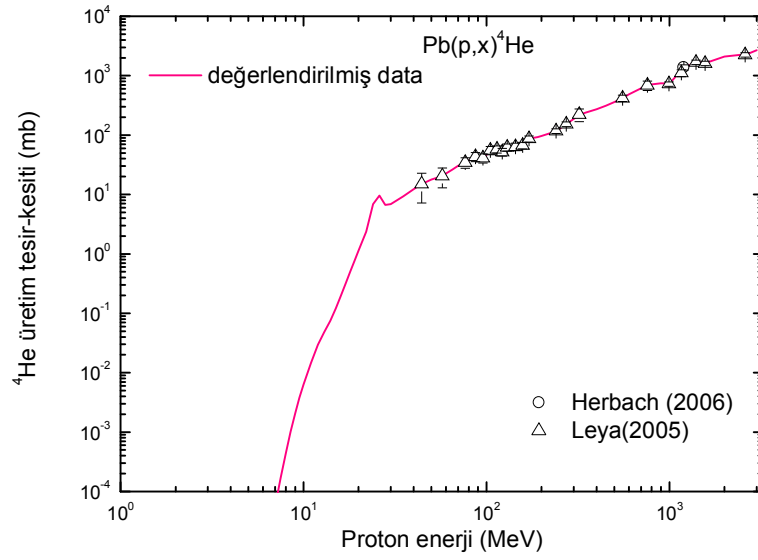
Şekil 7. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için yeni değerlendirilen döteron üretim tesir kesitleri



Şekil 8. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için yeni değerlendirilen triton üretim tesir kesitleri



Şekil 9. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için yeni değerlendirilen ³He üretim tesir kesitleri



Şekil 10. 3 GeV'e kadar protonlarla ışınlanan doğal Pb için yeni değerlendirilen ⁴He üretim tesir kesitleri

KAYNAKLAR

- [1] Şahin S., Übeyli M. Modified APEX reactor as a fusion breeder. *Energy Conversion and Management* 2004; 45: 1497-1512.
- [2] Şahin S., Übeyli M. Radiation damage studies on the first wall of a HYLIFE-II type fusion breeder. *Energy Conversion and Management* 2005; 46: 3185–3201.
- [3] Tel E. Study on Some Structural Fusion Materials for (n,p) Reactions up to 30 MeV Energy. *J. Fusion Energ.* 2010; 29: 332-336.
- [4] Tel E., Akca S., Kara A., Yiğit M., Aydın A. (p,a) Reaction Cross Sections Calculations of Fe and Ni Target Nuclei Using New Developed Semi-empirical Formula. *J. Fusion Energ.* 2013; 32: 531–535.
- [5] Akça S., Konobeyev A.Yu., Fischer U. Evaluated gas production cross-section data for natural titanium irradiated with protons at energies up to 3 GeV. *Kerntechnik* 2014; 79 (6): 1–6. DOI 10.3139/124.110436.
- [6] Mansur L.K., Rowcliffe A.F., Nanstad R.K., Zinkle S.J., Corwin W.R., Stoller R.E. Materials needs for fusion, Generation IV fission reactors and spallation neutron sources – similarities and differences. *Journal of Nuclear Materials* 2004; 329–333:166–172.
- [7] Murty K.L, Charit I. Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: Challenges and opportunities. *Journal of Nuclear Materials* 2008; 383:189–195.
- [8] ENDF-6 FORMATS MANUAL, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII, Written by the Members of the Cross Sections Evaluation Working Group, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory Upton, NY 11973-5000, www.nndc.bnl.gov
- [9] Barashenkov V.S., Toneev V.D. Interaction of High Energy Particles and Nuclei with Atomic Nuclei, Atomizdat 1972, Moscow.
- [10] Barashenkov V.S., Kostenko B.F., Zadorogny A.M. Time-dependent intranuclear cascade model. *Nucl. Phys. A* 1980; 338:413-420.
- [11] Barashenkov V.S. Monte Carlo simulation of ionization and nuclear processes initiated by hadron and ion beams in media. *Comp. Phys. Comm.* 2000; 126:28-31.
- [12] Awes T.C., Saini S., Poggi G., Gelbke C.K., Cha D., Legrain R., Westfall G.D. Light particle emission in ^{16}O -induced reactions at 140, 215, and 310 MeV. *Phys. Rev. C* 1982; 25:2361
- [13] Kozłowski M., Müller H.H., Wagner R. Analyzing power and cross section of the ^{58}Ni , ^{90}Zr , ^{209}Bi (\vec{P} , $^{3,4}\text{He}$ X) reactions in the continuum described by the coalescence model. *Nucl. Phys. A* 1984; 420: 1.
- [14] Koning A.J., Delaroche J.P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. *Nucl. Phys. A* 2003; 713:231-310.
- [15] Koning A.J., Duijvestijn M.C. A global pre-equilibrium analysis from 7 to 200 MeV based on the optical model potential. *Nucl. Phys. A* 2004; 744:15-76.

- [16] Hauser W., Feshbach H. The inelastic scattering of neutrons. *Phys. Rev.* 1952; 87: 366-373.
- [17] Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. TALYS-1.0, Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007, Nice, France, EDP Sciences 2008; p. 211-214.
- [18] Ignatyuk A.V., Smirenkin G.N., Tishin A.S. Phenomenological description of the energy dependence of the level density parameter. *Sov. J. Nucl. Phys.* 1975; 21:255-257.
- [19] Koning A., Hilaire S., Goriely S. TALYS 1.4, A nuclear reaction program, Nuclear Research and Consultancy Group (NRG), User Manual, 2011.
- [20] Broeders C.H.M., Konobeyev A.Yu., Korovin A.Yu., Lunev V.P. Blann, M.: ALICE /ASH- Pre-compound and evaporation model code system for calculation of excitation functions, energy and angular distributions of emitted particles in nuclear reactions at intermediate energies. FZKA 7183 2006; <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7183.pdf>.
- [21] Blann M., Vonach H.K. Global test of modified pre-compound decay models. *Phys. Rev. C* 1983; 28:1475-1492.
- [22] EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data). Database Version of 2014, Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, (<https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>).
- [23] Herbach C.M., Hilscher D., Jahnke U., Tishchenko V.G., Galin J., Letourneau A., Péghaire A., Filges D., Goldenbaum F., Pienkowski L., Schröder W.U., Töke J. Charged-particle evaporation and pre-equilibrium emission in 1.2 GeV proton-induced spallation reactions. *Nucl Phys. A* 2006; 765:426-463.
- [24] Konobeyev A.Yu., Fischer U., Pereslavytsev P.E. Computational Approach for Evaluation of Nuclear Data Including Covariance Information. *J. Kor. Phys. Soc.* 2011; 59: 923-926.
- [25] Konobeyev A.Yu., Fischer U., Pereslavytsev P.E., Capote R. Improved Data Evaluation Methodology for Energy Ranges with Missing Experimental Data, Second Int. Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation, Ma'ale Hachamisha, Judean Hills, Israel, May 15-19, 2011.
- [26] Konobeyev A.Yu., Fischer U., Koning A.J., Leeb H., Leray S., Yariv Y. "What Can We Expect from the Use of Nuclear Models Implemented in MCNPX at Projectile Energies Below 150 MeV? Detailed Comparison with Experimental Data". *J. Kor. Phys. Soc.* 2011; 59:927.
- [27] Konobeyev A.Yu., Fischer U., Pereslavytsev P.E., Ene D. Evaluated activation cross section data for proton induced nuclear reactions on W up to 3 GeV incidence energy. KIT Scientific Reports 7628, 2012. <http://www.ksp.kit.edu/9783866449244>.
- [28] Akça S., Konobeyev A.Yu., Fischer U. Evaluation of p, d, t, ^3He , and ^4He production cross-sections for lead irradiated with protons at energies up to 3 GeV. VII. International Workshop on Nuclear Structure Properties, 27-29 October 2014, Sinop, TURKEY.