

## <sup>197</sup>Au için Reaksiyon Tesir Kesiti Hesaplamaları

Hasan Özdoğan<sup>1,\*</sup>, Abdullah Kaplan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Doğu Yerleşkesi, 32260, Isparta, Türkiye

\*Yazışılan yazar e-posta: hasan\_ozdogan@windowslive.com

Alınış: 26 Mart 2013, Kabul: 11 Nisan 2013

**Özet:** Bu çalışmada, <sup>197</sup>Au izotopunun nötron üretim tesir kesitleri denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Denge durumu hesaplamaları için; Weisskopf-Ewing model, denge-öncesi hesaplamalar için ise; Hibrit, Geometri Bağımlı Hibrit ve İki Bileşenli Eksiton model kullanılmıştır. Weisskopf-Ewing, Hibrit ve Geometri Bağımlı Hibrit modelleri için ALICE/ASH; İki Bileşenli Eksiton modeli için TALYS 1.2 bilgisayar programları kullanılmıştır. Hesaplanan tesir kesitleri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Tesir kesiti, denge ve denge-öncesi reaksiyonlar, TALYS 1.2 ve ALICE/ASH.

## Reaction Cross Section Calculations for <sup>197</sup>Au

**Abstract:** In this study neutron production cross sections of <sup>197</sup>Au have been calculated using equilibrium and pre-equilibrium nuclear reaction models. While Weisskopf-Ewing model has been used for the equilibrium process in the calculations, two component exciton, hybrid and geometry dependent hybrid nuclear reaction models have been used for the pre-equilibrium process. For Weisskopf-Ewing, Hybrid and Geometry Dependent Hybrid Model calculations ALICE/ASH, for two component exciton model calculations TALYS 1.2 codes have been used. The calculated results have been discussed and compared with the experimental data.

**Key words:** Cross section, equilibrium and pre-equilibrium reactions, TALYS 1.2 and ALICE/ASH

### 1. Giriş

Altın ilk çağlardan bu yana insanoğlu için oldukça cazip bir nesne olmuştur. Kolayca dövülerek şekil verilebilir. Altın kararlı bir elementtir kolay kolay reaksiyona girmez. Doğada saf şekilde bulunur. En yaygın izotopu <sup>197</sup>Au'dur. Tarih boyunca insanlar altın uğruna savaşmışlardır. Altının geniş bir kullanım alanı vardır. Kuyumculuk, diş hekimliği, elektrik-elektronik, resmi para basımı ve uzay sanayi bunlardan başlıcalarıdır.

Nükleer reaksiyonlar yönetildiği mekanizmaya göre; bileşik çekirdek reaksiyonları, direkt reaksiyonlar ve bu ikisi arasındaki durum olan denge-öncesi ya da rezonans reaksiyonları olarak sınıflandırılabilir. Denge-öncesi reaksiyon modelleri; 10-60 MeV enerjili proton, nötron ve alfa parçacıkları ile oluşturulan reaksiyonlarda enerji spektrumunun yüksek enerji bölgesini açıklamakta çok başarılıdır. Fakat, yine de bu modeller yayınlanan parçacıkların açılal dağılımlarını kestirmede çok başarılı değildir. Özellikle, 10 MeV'in üzerindeki gelme enerjilerinde denge-öncesi bileşeni nükleer reaksiyonlara ihmal edilmeyecek katkıda bulunur. Denge-öncesi modeller 200 MeV'in altındaki nükleer tesir kesitlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller çıkan parçacık spektrumunun yüksek enerji bölgesindeki (kesikli durumlar ile

buharlaşıma tepe noktası arasındaki bölge) durumunu yeterince açıklamayı sağlamıştır [1, 2].

Günümüzde deneysel çalışmalara teorik çalışmaların da katkısı ile bilim hızla ilerlemektedir. Ayrıca, teorik çalışmaların deneysel çalışmalarla birebir uyum sağlaması bu çalışmaların hızla gelişmesinde önemli olmuştur. Reaktörlerde üretilen geçici çekirdekler genellikle kısa yarı ömürlüdür. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin tesir kesitlerinin ve parçacıkların yayınlanma spektrumlarının doğrudan ölçülmesi pek mümkün olmamaktadır. Zaman kazanılması açısından yapılacakların en önemlisi, bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar için çeşitli bilgisayar kodları geliştirilmiştir [3].

Bu çalışmada kullanılan ALICE/ASH [4] ve TALYS 1.2 [5, 6] kodları, kullanım kolaylığı ve hesaplamalardaki başarıları yüzünden yaygın olarak kabul gören kodlardır. ALICE/ASH programı ALICE kodlarının geliştirilmiş ve değiştirilmiş bir sürümüdür. ALICE/ASH-2006 programı, 300 MeV'lik gelme enerjisine kadar, uyarılma fonksiyonu, ikincil parçacıkların açısal dağılımı ve enerjisi hesaplamaları için uygulanabilir. Başlangıç exciton sayısı  $n_0 = 3$  olarak alınır.

TALYS Linux tabanında çalışan; nükleer reaksiyonların analizi ve tahmini için kullanılan bilgisayar programıdır. Nötron, proton, döteryum, trityum,  $^3\text{He}$ , alfa ve gama girişli reaksiyonlarda 1 keV-250 MeV enerji aralığında hesaplama yapabilir. Hedef çekirdek kütleleri için 12 ve daha ağır olma şartı TALYS 1.2 sürümü ile  $5 < A \leq 339$  olarak değiştirilmiştir. TALYS 1.2; 250 MeV enerjisine kadar esnek-esnek olmayan saçılma tesir kesiti ve toplam tesir kesiti hesaplamaları; optik model, bileşik, direk ve denge-öncesi reaksiyon hesaplamaları yapabilmektedir [7]. Gama kuvvet fonksiyonu için Kopecky ve Uhl [8], seviye yoğunluğu için ise, Fermi Gaz Modeli [9] kullanılır. Kompozit parçacıklar nedeniyle oluşan direk etkiler, Kalbach'ın fenomenolojik modeli [10] ile hesaplanır. Varsayılan optik model potansiyeli Koning and Delaroche [11]'den derlenmiştir.

Bu çalışmada,  $^{197}\text{Au}$  hedef çekirdeğini kullanarak nötron üretim tesir kesitleri;  $(\alpha, 2n)$ ,  $(\alpha, 3n)$ ,  $(\alpha, 5n)$ ,  $(d, 2n)$ ,  $(d, 4n)$ ,  $(d, 6n)$  ve  $(d, 7n)$  reaksiyonları için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar, Uluslararası Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR/CSISRS) [12] kütüphanesinden elde edilen, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Weisskopf-Ewing Model

Reaksiyonun denge bileşenine ait hesaplamalar Weisskopf-Ewing Modeli [13] göre açısal momentum ihmal edilerek yapılmıştır. Buharlaşımda temel parametreler; bağlanma enerjisi, ters reaksiyon tesir kesiti, çiftlenim ve seviye yoğunluğu parametreleridir. Bu modele göre; a ve b sırasıyla gelen ve çıkan kanal olmak üzere reaksiyon tesir kesiti,

$$\sigma_{ab}^{WE} = \sigma_{ab}(E_{inc}) \frac{\Gamma_b}{\sum_{b'} \Gamma_{b'}} \quad (1)$$

olarak verilir. Burada  $E_{inc}$  gelme enerjisi olup,  $\Gamma_b$  ise şu şekilde ifade edilir;

$$\Gamma_b = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^2} \mu_b \int d\varepsilon \sigma_b^{inv}(\varepsilon) \varepsilon \frac{\omega_1(U)}{\omega_1(E)} \quad (2)$$

Burada;  $U$ ,  $\mu_b$ ,  $s_b$ ,  $\sigma_b^{inv}$  sırasıyla; residual çekirdeğin uyarılma enerjisi, indirgenmiş kütle, spin ve ters reaksiyon tesir kesitidir.  $\omega_1(E)$  ise, tek parçacık yoğunluğudur [14-18].

## 2.2. Hibrit Model

Hibrit modeli, Fermi-gaz-denge modeli ile Griffin (Exciton) modellerinin temel özelliklerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Hibrit model, Griffin modelinde olduğu gibi tek parçacık durumlarını eşit aralıklı bir yerleşim olarak kabul eder. Çekirdek durumlarını, uyarılmış parçacık ve deşikleri içerecek şekilde sınıflandırır [19, 20].

$\sigma_R$ ; reaksiyon tesir kesiti,  ${}_n X_v$ ;  $n$  exciton durumundaki  $v$  tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısı,  $P_v(\varepsilon_v) d\varepsilon_v$ ; enerjisi  $\varepsilon$  ile  $\varepsilon + d\varepsilon$  arasında sürekli bölgeye yayınlanan  $v$  tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısını göstermek üzere tesir kesiti şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma(\varepsilon_v) d\varepsilon_v = \sigma_R P_v(\varepsilon_v) d\varepsilon_v \quad (3)$$

$P_v(\varepsilon_v) d\varepsilon_v$  ise,

$$P_v(\varepsilon_v) d\varepsilon_v = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} [{}_n X_v N_n(\varepsilon, U) / N_n(E)] g d\varepsilon_v \left( \frac{\lambda_v(\varepsilon)}{\lambda_v(\varepsilon) + \lambda_{1p}(\varepsilon)} \right) D_n^h \quad (4)$$

Ayrıca;  $E$  bileşik sisteminin uyarılma enerjisi ve  $U$  kalan çekirdek uyarılma enerjisi olmak üzere,  $N_n(\varepsilon, U)$ ;  $\varepsilon = \varepsilon_v + E_B$  enerjili yayınlanan bir parçacık ve  $U = E - \varepsilon_v - E_B$  enerjili kalan  $n-1$  exciton durumları sayısı,  $N_n(E)$ ;  $E$  toplam uyarılma enerjisindeki  $n$  exciton durumlarının toplam sayısıdır.  $D_n^h$  (azaltma faktörü); bir  $n$ - exciton zincirindeki başlangıç popülasyon kesiti,  $g$ ; tek-parçacık durum yoğunluğudur [3].

## 2.3. Geometri Bağımlı Hibrit (GBH) Modeli

Denge-öncesi modellerden olan GBH Model, nükleer oluşumun içerisinde çekirdek-çekirdek saçılımının tanımı ile çalışan exciton denkleminin bir versiyonudur. Bu modelin matematiksel hesaplamaları; Blann ve Vonach [21] tarafından,

$$\frac{d\sigma_v(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \sigma_R P_v(\varepsilon) \quad (5)$$

ve

$$P_v(\varepsilon)d\varepsilon = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} \left[ {}_n\chi_v N_n(\varepsilon, U) / N_n(E) \right] g d\varepsilon \left[ \lambda_c(\varepsilon) / (\lambda_c(\varepsilon) + \lambda_+(\varepsilon)) \right] D_n \quad (6)$$

olarak verilmiştir. Denklem (5) ve (6)'da kullanılan,  $\sigma_R$ ; reaksiyon tesir kesiti,  ${}_n\chi_v$ ;  $n$  exciton durumundaki  $v$  tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısı,  $P_v(\varepsilon)d\varepsilon$ ; enerjisi  $\varepsilon$  ile  $\varepsilon + d\varepsilon$  arasında sürekli bölgeye yayınlanan  $v$  tipli parçacıkların (proton veya nötron) sayısını gösterir. Ayrıca;  $\lambda_c(\varepsilon)$  bir parçacığın  $\varepsilon$  kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızını gösterirken,  $\lambda_+(\varepsilon)$  ise;  $\varepsilon$  enerjili bir parçacığın çekirdek içi geçiş hızı,  $D_n$ ; bir  $n$ -exciton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti,  $g$ ; tek-parçacık düzey yoğunluğunu göstermektedir. Böylece; Denklem 6'daki köşeli parantezdeki nicelik, enerjisi  $\varepsilon$  ile  $\varepsilon + d\varepsilon$  arasında olan parçacık sayısını verirken; ikinci parantezdeki ifade ise, reaksiyon bölgesine parçacıkların geçiş hızınının, toplam parçacık geçiş hızına oranıdır [18].

#### 2.4. İki Bileşenli Exciton Modeli

Denge-öncesi sürecin ilk başarılı teorisi, verilen parçacık ve enerji ile oluşan tüm reaksiyonların açı integralli tesir kesitleri ve yayınlanan parçacık enerji dağılımını oldukça iyi hesaplayabilen exciton modelidir [22]. Bu yarı klasik model, yayınlanan parçacığın açısız dağılımının ana hatlarını da tahmin edebilmektedir ancak; açısız dağılımın daha kesin tahminleri için kuantum mekanik teorisi kullanılması gerekmektedir [23].

$p_\pi(p_\nu)$  parçacık sayısı ve  $h_\pi(h_\nu)$  deşik sayısı olmak üzere tesir kesiti ifadesi şu şekilde verilir;

$$\frac{d\sigma_k^{EM}}{dE_k} = \sigma^{CF} \sum_{p_\pi=p_\pi^0}^{p_\pi^{eq}} \sum_{p_\nu=p_\nu^0}^{p_\nu^{eq}} \omega_k(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu, E_k) \times S_{pre}(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) \quad (7)$$

Mermi parçacık  $k$  için emisyon oranı; görelî kütle  $\mu_k$  ve spin  $s_k$  olmak üzere,

$$W_k(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu, E_k) = \frac{2s_k + 1}{\pi^2 h^3} \mu_k E_k \sigma_{k,inv}(E_k) \frac{\omega(p_\pi - Z_k, p_\nu - N_k, h_\nu, E^{tot} - E_k)}{\omega(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu, E^{tot})} \quad (8)$$

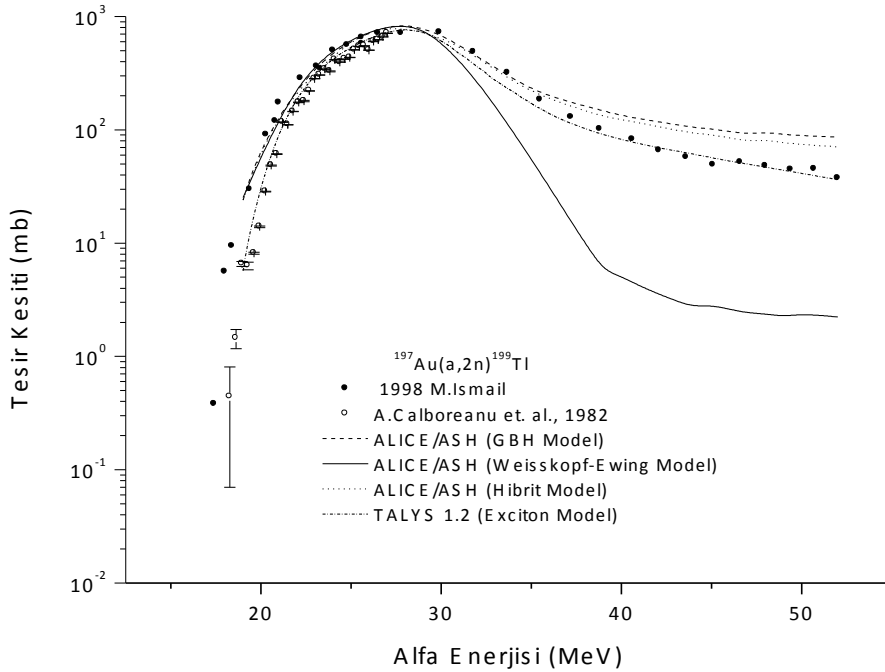
olarak verilir.  $\sigma_{k,inv}(E_k)$  ters reaksiyon tesir kesiti,  $Z_k(N_k)$  mermi parçacığın yük sayısı ve  $E^{tot}$  kompozit sistemin toplam enerjisidir [24].

### 3. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada,  $^{197}\text{Au}$  hedef çekirdeği ile oluşturulan reaksiyonlar için nötron üretim tesir kesitleri hesaplanmıştır. Gelme enerjisine karşılık elde edilen uyarılma fonksiyonunun grafikleri çizilmiştir. Hesaplamalar, denge ve denge-öncesi reaksiyon modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Denge durumu reaksiyon süreci için Weisskopf-Ewing modeli kullanılırken, denge-öncesi reaksiyon süreci için; İki bileşenli Exciton, Hibrit ve GBH

Modelleri kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar, Uluslararası Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR/CSISRS) kütüphanesinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Şekil 1’de  $^{197}\text{Au}(\alpha,2n)$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. GBH ve Hibrit model hesaplamaları 35 MeV alfa gelme enerjisine kadar deneysel verilerle uyum göstermiş, bu değerden sonra deneysel verilerden yüksek sonuç vermiştir. TALYS 1.2 kodu ile yapılan Exciton Model hesaplamalarının bu reaksiyon için en uyumlu olduğu gözlenmiştir. Weisskopf-Ewing Model hesaplamaları ise, 30 MeV alfa gelme enerjisine kadar deneysel verileri yakalamış, bu enerji değerinden sonra deneysel verilerden düşük sonuç vermiştir.



Şekil 1.  $^{197}\text{Au}(\alpha,2n)^{199}\text{Tl}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

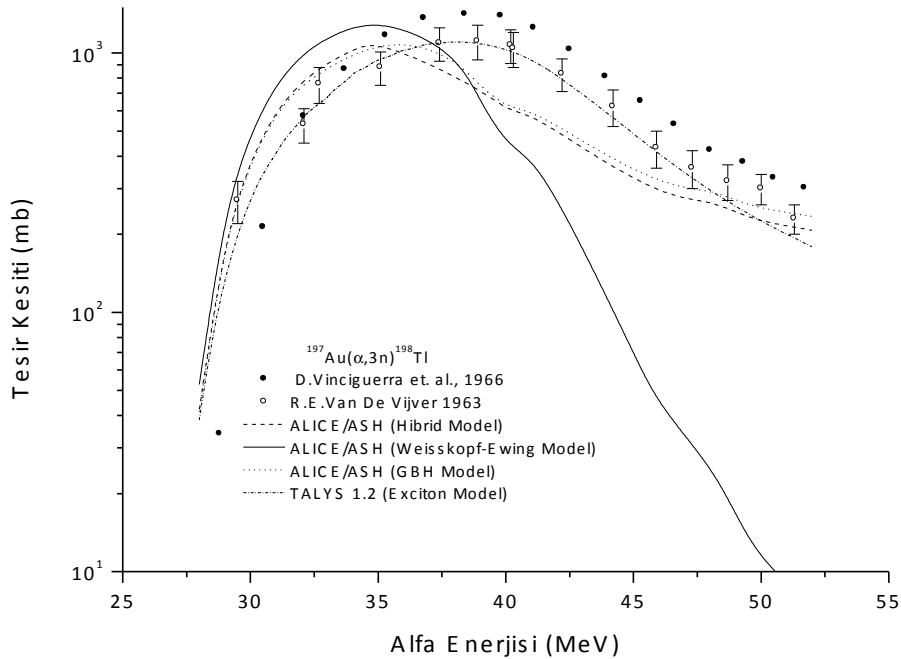
Şekil 3’te  $^{197}\text{Au}(\alpha,5n)^{196}\text{Tl}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle uyumu incelendiğinde, Exciton Modelin deneysel verilerle en uyumlu model olduğu gözlenmiştir. Diğer denge-öncesi hesaplamaları olan; GBH ve Hibrit Model hesaplamalarının da 48 MeV alfa gelme enerji değerinden sonra deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Weisskopf-Ewing Model hesaplamaları ise; deneysel verileri 66 MeV alfa gelme enerjisine kadar yukarıdan takip etmiş, bu değerden sonra deneysel verilerle olan uyumunu yitirmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde, ALICE/ASH kodu ile yapılan Weisskopf-Ewing, Hibrit ve GBH Model hesaplamalarının deneysel verilerle uyum sağladığı görülmüştür. Exciton Model hesaplamaları ise; deneysel verilerle şekil olarak uyum göstermesine rağmen, deneysel verilerden daha düşük değerler vermiştir.

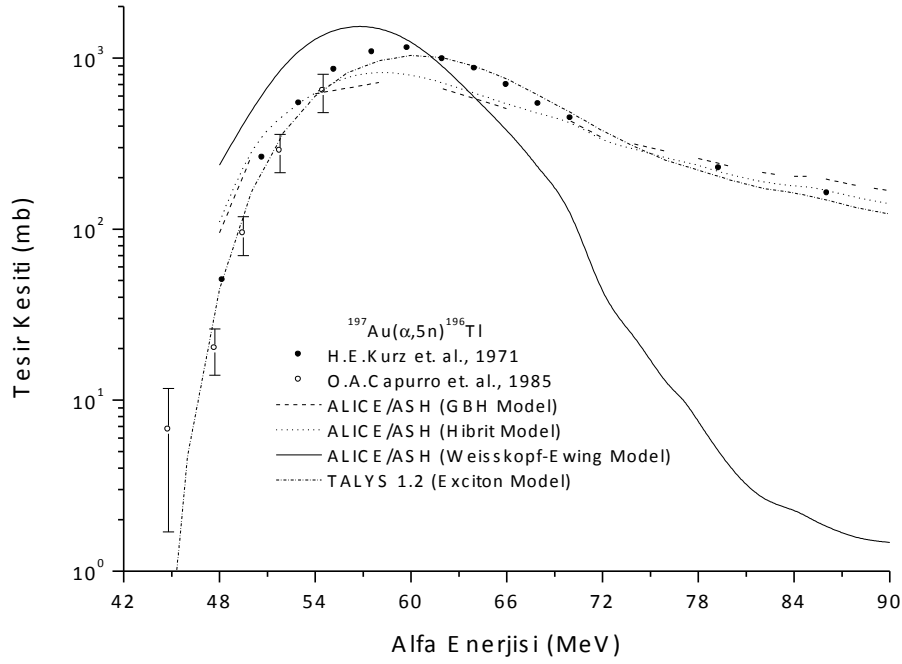
Şekil 5'te  $^{197}\text{Au}(d,4n)^{195}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle uyumu incelendiğinde; GBH ve Hibrit Model hesaplamalarının deneysel verilerle 50 MeV döteryum gelme enerjisine kadar uyum sağladığı, bu değerden sonra deneysel verilerden yüksek sonuçlar vermelerine rağmen paralellik gösterdikleri gözlenmiştir. Weisskopf-Ewing Model ise, deneysel verilerle uyum göstermemiştir. Exciton Modeli de genel olarak deneysel verilerden yüksek sonuçlar vermiştir.

Şekil 6 incelendiğinde, Hibrit Modelin en uyumlu model olduğu görülmüştür. GBH Model hesaplamaları ise, deneysel verilere yakın sonuçlar vermiştir. 70 MeV döteryum gelme enerjisine kadar deneysel verilerden düşük sonuçlar veren Exciton Modeli, deneysel verilerin geometrisini yakalamıştır. Weisskopf-Ewing Modeli 65 MeV döteryum gelme enerjisine kadar deneysel verileri yukarıdan takip etmiş, bu değerden sonra ise, uyumunu yitirmiştir.

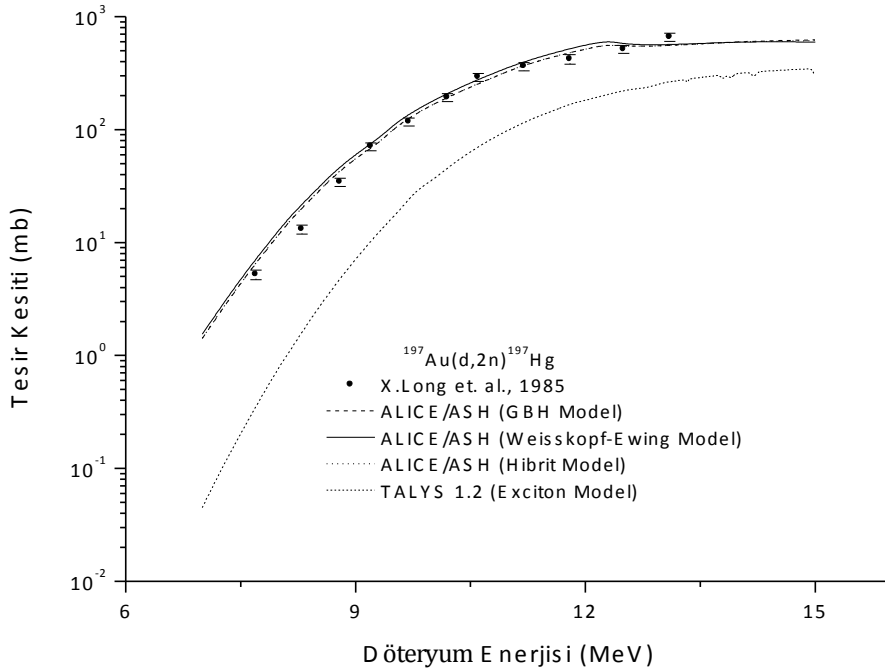
Şekil 7'de  $^{197}\text{Au}(d,7n)^{192}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle uyumu incelendiğinde, GBH model hesaplamalarının yaklaşık olarak 65-78 MeV döteryum enerjisi gelme aralığında deneysel verilerden düşük değerler vermesine rağmen, diğer enerji aralıklarında deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Hibrit Modeli ise, deneysel verilere yakın sonuçlar vermiş ve paralellik sergilemiştir. Exciton Modeli; deneysel verilerden düşük değerler vermesine rağmen, deneyin geometrisini yakalamıştır. Weisskopf-Ewing Modeli ise, deneysel verilerden yüksek sonuçlar vermiştir.



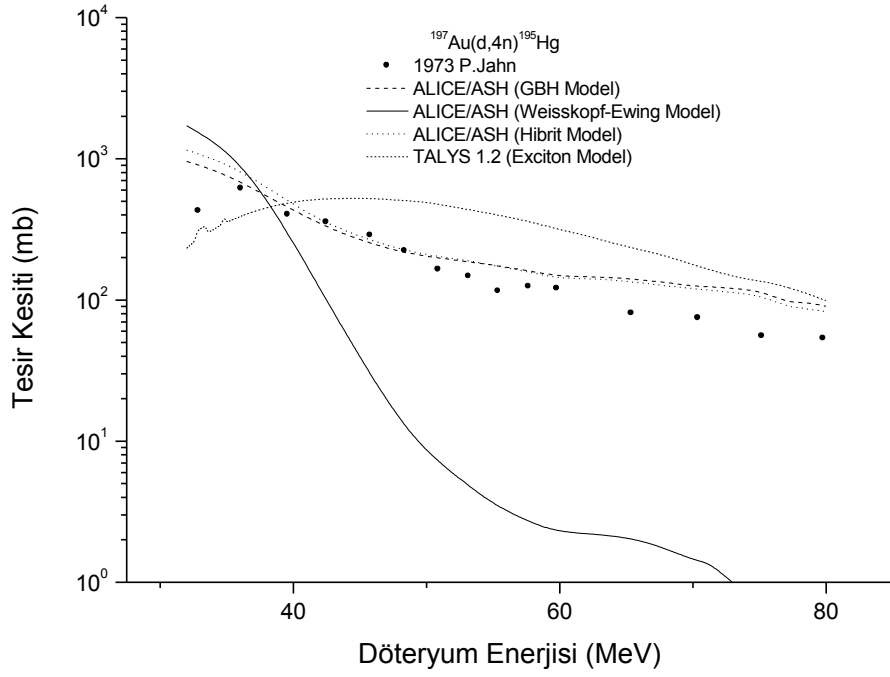
Şekil 2.  $^{197}\text{Au}(\alpha,3n)^{198}\text{Tl}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması



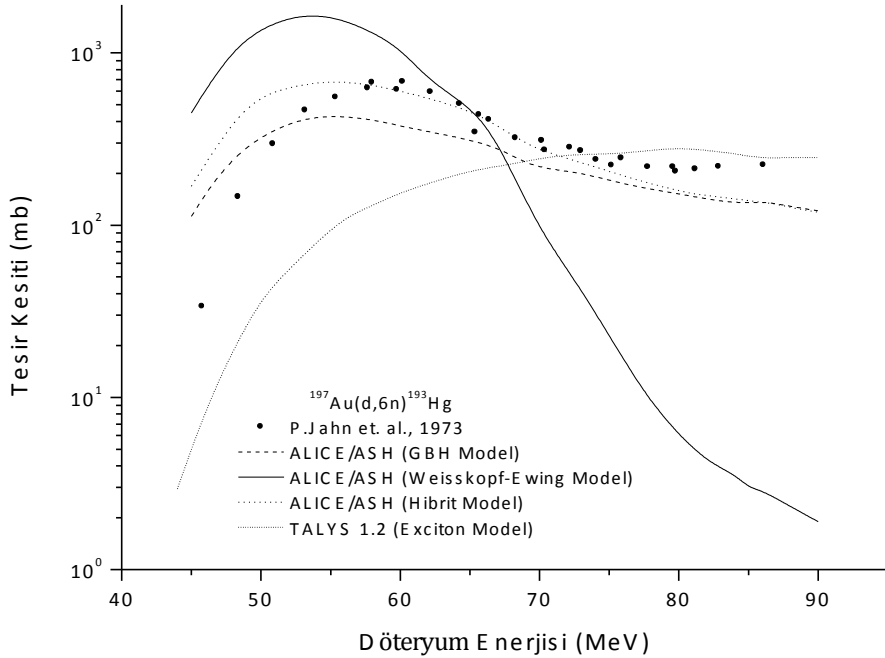
Şekil 3.  $^{197}\text{Au}(\alpha,5n)^{196}\text{Tl}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 4.  $^{197}\text{Au}(d,2n)^{197}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

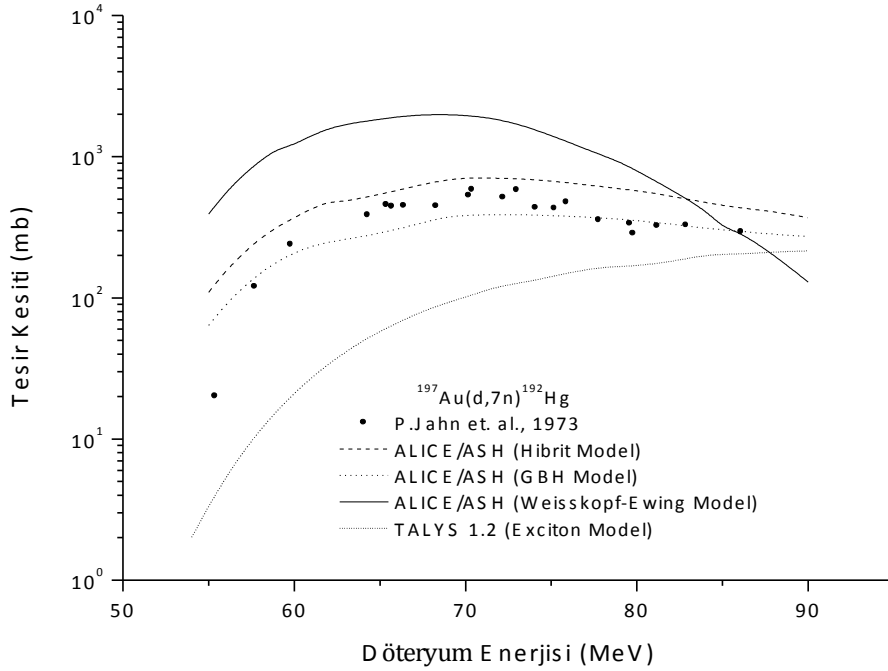


Şekil 5.  $^{197}\text{Au}(d,4n)^{195}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 6.  $^{197}\text{Au}(d,2n)^{193}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması





Şekil 7.  $^{197}\text{Au}(d,7n)^{192}\text{Hg}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

Sonuç olarak; Exciton Modeli alfa girişli reaksiyonlarda en uyumlu model olmasına rağmen, döteryum girişli reaksiyonlarda deneysel verilerin geometrisini yakalasa da, deneysel verilerden düşük değerler almıştır. GBH ve Hibrit model hesaplamaları genel olarak deneysel verilerle uyum sağlamıştır. Hibrit Modelinin, alfa girişli reaksiyonlar için en uyumlu model olduğu gözlenmiştir. Weisskopf-Ewing Modeli başlangıçta deneysel verilerle paralellik gösterse de, mermi parçacığın enerjisi arttıkça uyumunu yitirmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Blann M., Gruppelaar H., Nagel P., and Rodens J., International code and model intercomparison for intermediate energy nuclear data, NEA Data Bank, OECD, Paris, (1994).
- [2] Michel R. and Nagel P., NSC/DOC(97)-1, NEA Data Bank, OECD, Paris (1997).
- [3] Büyüksulu H., 2010. Nükleon girişli reaksiyonlarda deforme olan ve deforme olmayan hedef çekirdekler için denge ve denge-öncesi etkilerin incelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, s. 171.
- [4] Broeders C.H.M., Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A., Lunev V.P., Blann, M., 2006. 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. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft Wissenschaftliche Berichte FZKA 7183.
- [5] Koning A. J., Hilaire, S. M., Duijvestijn, M. C., TALYS-1.2 A Nuclear Reaction Program, User Manual (NRG, The Netherlands) (2009).
- [6] Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C., 2005. TALYS: comprehensive nuclear reaction modeling. In: Haight RC, Chadwick MB, Kawano T, Talou P (eds) Proceedings of the international conference on nuclear data for science and technology-ND 2004, AIP Vol. 769. Santa Fe, USA, pp 1154–1159.

- [7] Koning, A. J. and Duijvestijn, M. C., 2006. New nuclear data evaluations for Ge isotopes Nuclear *Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 248 (2): 197-224.
- [8] Kopecky J. and Uhl M., 1990. Test of gamma-ray strength functions in nuclear reaction model calculations *Physical Review C*, 41 (5): 1941-1955.
- [9] Ericson T., 1960. A theory of fluctuations in nuclear cross sections, *Annals of Physics*, 23: 390-413.
- [10] Kalbach C., 2005. Preequilibrium reactions with complex particle channels *Physical Review C* 71,034606.
- [11] Koning, A.J. and Delaroche, J.P., 2003. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV, *Nuclear Physics A*, 713 (231): 231-310.
- [12] Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File). (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/>) 26 Şubat 2013.
- [13] Weisskopf, V.F., Ewing, D.H., 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements, *Phys. Review* 57 (6): 472-486.
- [14] Aydın E.G., Tel E., Kaplan A., Aydın A., 2008. Equilibrium and pre-equilibrium calculations of neutron production in medium-heavy targets irradiated by protons up to 100 MeV, *Annals of Nuclear Energy*, 35: 2306-2312.
- [15] Büyüksulu H., Kaplan A., Tel E., Aydın A., Yıldırım G., Bölükdemir M. H., 2010. Theoretical cross sections of  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  on deuteron-induced reactions, *Annals of Nuclear Energy*, 37: 534-539.
- [16] Kaplan A., Büyüksulu H., Aydın A., Tel E., Yıldırım G., Bölükdemir M. H., 2010. Excitation functions of some neutron production targets on (d,2n) reactions, *Journal of Fusion Energy*, 29: 181-187.
- [17] Kaplan A., Aydın A., Tel E., Şarer B., 2009. Equilibrium and pre-equilibrium emissions in proton-induced reactions on  $^{203,205}\text{Tl}$ , *Pramana Journal of Physics*, 72, (2): 343-353
- [18] Kaplan A., Tel E., Aydın A., 2009. The equilibrium and preequilibrium neutron emission spectra of some structural fusion materials for (n,xn) reactions up to 16 MeV energy, *Physics of Atomic Nuclei*, 72, (6): 903-910.
- [19] Blann M., 1971. Hybrid model for pre-equilibrium decay in nuclear reactions, *Physical Review Letter* 27, (6): 337-340.
- [20] Cline C.K., 1972. The Pauli exclusion principle in pre-equilibrium decay, *Nuclear Physics A*, 195: 353-360.
- [21] Blann M., Vonach H.K., 1983. Global test of modified precompound decay models. *Physical Review C*, 28 (4), 1475-1492.
- [22] Griffin, J.J., 1966. Statistical Model of Intermediate Structure. *Physical Review Letters*, 17, 478-481.
- [23] Hodgson P.E., Gadioli E., 2003. Introductory nuclear physics. Oxford University Press, ISBN 0-19-851897-8, 723p. New York.
- [24] Koning, A.J., Duijvestijn, M.C., 2004. A global pre-equilibrium analysis from 7 to 200 MeV based on the optical model potential, *Nuclear Physics A* 744 : 15-76.

Abdullah Kaplan e-posta: [abdullahkaplan@sdu.edu.tr](mailto:abdullahkaplan@sdu.edu.tr)