

1-20 MeV Enerji Aralığında ^{230,232}Th ve ^{236,238,239,240,241,242,244}Pu Çekirdeklerinin Nötronlarla Oluşturulan Fisyon Tesir Kesitlerinin Hesaplanması

Mustafa Yiğit^{1,*}, Mehmet Emin Korkmaz¹, Mehtap Günay², Başar Şarer¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Teknik Okullar, Ankara, TÜRKİYE

²İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 44280, Malatya, TÜRKİYE

*yazışılan yazar e-posta: mustayigit@gmail.com

Alınış: 08 Temmuz 2009, Kabul: 12 Ocak 2010

Özet: Bu çalışmada, ^{230,232}Th ve ^{236,238,239,240,241,242,244}Pu çekirdeklerinin fisyon tesir kesitleri 1-20 MeV gelme enerjili nötronlar için hesaplandı. Hesaplamalar, tesir kesiti hesaplamalarını farklı modellerle ele alan ALICE-ASH ve CEM95 bilgisayar programları ile yapıldı. CEM95 ile yapılan hesaplamalarda seviye yoğunluğu parametresinin (IFAM) tüm sistematikleri kullanıldı. ALICE-ASH ile yapılan hesaplamalarda RFRM (*Rotation-Finite-Range Model*) ve RLDM (*Rotation-liquid-Drop Model*) modelleri kullanıldı. Hesaplanan fisyon tesir kesitleri Deneysel Nükleer Reaksiyon Veri (*Experimental Nuclear Reaction Data-EXFOR*) kütüphanesinden elde edilen deneysel değerlerle karşılaştırıldı.

Anahtar kelimeler: Seviye yoğunluğu parametresi, fisyon tesir kesiti, fisyon engeli

The Calculation of the Neutron-Induced Fission Cross Sections of ^{230,232}th and ^{236,238,239,240,241,242,244}Pu Nuclei in the Energy Range 1-20 MeV

Abstract: In this study, fission cross section of ^{230,232}Th ve ^{236,238,239,240,241,242,244}Pu nuclei have been carried out in the 1-20 MeV incident energy neutrons. ALICE-ASH and CEM95 computer programs was used for calculations. In CEM95 calculations, all systematics of level density parameters (IFAM) was used. In ALICE-ASH calculations, RFRM (*Rotation-Finite-Range Model*) and RLDM (*Rotation-liquid-Drop Model*) was used. The calculated fission cross section was compared with the experimental data taken from the Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR).

Key words: Level density parameter, fission cross section, fission barrier

1. Giriş

Fisyon tesir kesitleri, nükleer uygulamalar ve nükleer yapının anlaşılabilmesi için gereklidir. Özellikle fisyon tesir kesitleri, fisyon ve füzyon-fisyon (hibrid) reaktörlerinin zırhlanmasında, hızlandırıcı güdümlü atık dönüşüm sistemlerinde (ATW) ve hızlandırıcıya dayalı enerji üretim sistemlerinde (ADEP) çok önemlidir. Bu tesir kesitlerini ölçmek için yapılan deneyler oldukça masraflıdır ve bu ölçümlerin yapılabilmesi için gerekli olan laboratuvarlar sınırlı sayıdadır. Sonuç olarak nükleer fisyon tesir kesitlerini elde etmek için teorik hesaplamaların yapılabilirdiği modellere ihtiyaç duyulur. Gelme enerjisi 20 MeV'e kadar olan nötronların oluşturduğu reaksiyonlarda, fisyon tesir kesitlerinin hesaplanabilmesi için birçok güvenilir bilgisayar programı vardır. Bu çalışmada ALICE-ASH [1] ve CEM95 [2] bilgisayar programları kullanıldı.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çığ Eksiton Modeli

Nükleer reaksiyonların denge öncesi anlayışının gelişimi, nükleer yapının anlaşılmasına ve parçacık yayınlanma mekanizmasının açıklanmasına olanak verir. Yüksek enerjilerde nükleer reaksiyonların birçok özellikleri, nükleer seviyelerde ardarda geçiş işlemi (çığ) dikkate alınarak gayet iyi bir şekilde incelenebilir. Çığ Eksiton Model (CEM), reaksiyonların üç safhada meydana geldiğini kabul eder. İlk safha bir nükleer seviyelerdeki geçiştir. İkinci safha denge öncesine, üçüncü safha ise denge durumuna karşılık gelir. Bu üç bileşen deneysel olarak ölçülen değerlere katkıda bulunur. Buna göre parçacık spektrumu için aşağıdaki eşitlik yazılır [3-5].

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} [N^{cas}(p) + N^{prq}(p) + N^{eq}(p)] dp \quad (1)$$

Burada $N^{cas}(p)$ çığ, $N^{prq}(p)$ denge öncesi ve $N^{eq}(p)$ denge durumlarındaki etkileşmeleri ifade eder. İnelastik tesir kesiti $\sigma_{in} = \sigma_{geom} N_{in} / (N_{in} + N_{el})$ eşitliğiyle hesaplanır. σ_{in} inelastik tesir kesiti, σ_{geom} hedef çekirdeğin geometrik tesir kesiti, N_{in} inelastik ve N_{el} elastik etkileşmelerin toplam sayısıdır. Bu parametreler çığ modelinin içinde Monte Carlo yöntemiyle hesaplanır. R hedef çekirdeğin yarıçapı olmak üzere geometrik tesir kesiti $\sigma_{geom} = \pi R^2$ ile verilir. Çığ modeli hızlı parçacıkların kinematik karakteristikleri hakkında bütün bilgileri içinde bulunduran reaksiyon geometrisini hesaba katar, fakat çığ parçacıkları arasındaki etkileşmeleri ihmal eder. Çığ modelin şartları parçacığın kinetik enerjisi nükleonun bağlanma enerjisini aştığı yüksek enerjilerde daha iyi yerine getirilir. CEM95'de fisyon olasılığı Γ_f / Γ_{tot} şeklinde ifade edilir. Burada Γ_f kısmi fisyon genişliği ve Γ_{tot} toplam bozunma genişliğidir. Γ_{tot} toplam bozunma genişliği, Γ_j kısmi yayınlanma genişliği olmak üzere $\Gamma_{tot} = \Gamma_f + \sum_j \Gamma_j$ ifadesiyle verilir. CEM95 fisyon hesaplamalarında Γ_j kısmi yayınlama genişliğini Weisskopf istatistik teorisine göre ve Γ_f fisyon kısmi genişliğini Bohr-Wheeler teorisine göre hesap eder. CEM95'de fisyon engeli bir makroskobik ve bir mikroskobik fisyon terimlerinin toplamı olarak düşünülür. Bu makroskobik ve mikroskobik durumda açısız momentumun fisyon engeli üzerine etkisi ilk etapta dikkate alınmaz. Hesaplamalarda makroskobik fisyon engel için Barashenkov ve arkadaşlarının sistematikleri [6] kullanıldı. Uyarılma enerjisinin değişimi, atomik çekirdeklerin özelliklerini değiştirdiğinden dolayı nükleer fisyon üzerine güçlü bir etkiye sahiptir. Uyarılma enerjisi fisyon engeliyle doğrudan ilişkilidir ki uyarılma enerjisinin artışı ile fisyon engelini yüksekliği azalmaktadır. Bu 50 MeV üzerindeki uyarılma enerjileri ile hafif çekirdekler ve orta ağırlıktaki çekirdekler için daha fark edildir. Hesaplamalarda fisyon engelini uyarılma enerjisine bağımlılığını ifade etmek için Barashenkov ve arkadaşlarının yaklaşımları [6] kullanıldı. Ayrıca fisyon hesaplamalarında tek hörgüçlü fisyon engeli kullanıldı. İstatistiksel denge ve denge öncesi modellerde en önemli nicelik seviye yoğunluğu parametresidir. CEM95'de seviye yoğunluğu parametresi (IFAM) için farklı sistematikler seçilebilir. Bu hesaplamalarda seviye yoğunluğu parametresinin 10 farklı sistematigi kullanıldı.

2.2. Alice-Ash

ALICE bilgisayar programı Blann tarafından oluşturulmuştur [7-10]. ALICE-ASH kodu ALICE kodunun geliştirilmiş ve düzeltilmiş versiyonudur. ALICE-ASH nükleonların denge öncesi durumunu hibrid veya geometrik bağımlı hibrid model ve denge durumunu Weisskopf-Ewing model [11] kullanarak tanımlanır. ALICE-ASH kodunda fisyon olasılığının hesaplanması için Bohr-Wheeler yaklaşımı kullanılır. Denge öncesi bozunma için Hibrid model [8]

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

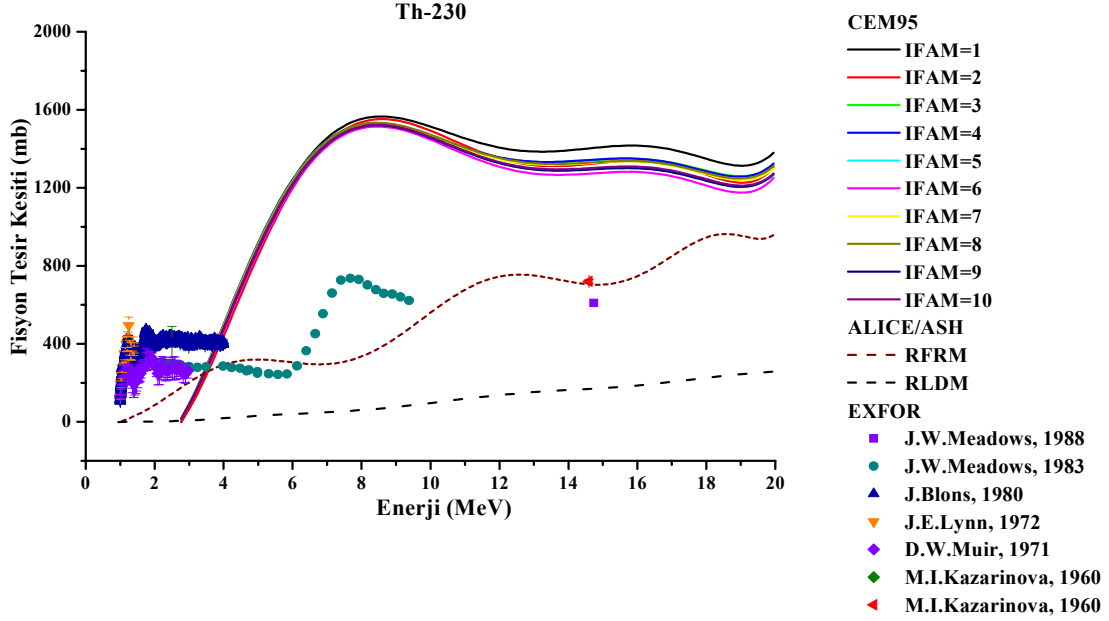
$$\frac{d\sigma_v(\delta)}{d\delta} = \sigma_R P_v(\varepsilon) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; $P_v(\varepsilon)d\varepsilon$ enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında olan ve sürekli bölgeye yayınlanan ν tipi parçacıkların (nötron ve proton) sayısı, \bar{n} denge konumundaki (en muhtemel) eksiton sayısı, ${}_n X_v$ bir n eksiton durumundaki ν türündeki parçacıkların sayısı, E bileşik sistemin uyarılma enerjisi, $N(\varepsilon, U)$ bir eksiton ε kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin $U = E - B_v - \varepsilon$ uyarılma enerjisinin diğer $n-1$ eksitonları arasında paylaşılacak şekilde n eksitonunun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı, $N_n(\varepsilon)$ E uyarılma enerjisinde n parçacık artı deşik toplam birleştirim sayısı, $\lambda_c(\varepsilon)$ bir parçacığın (ε) kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızı, $\lambda_+(\varepsilon)$, ε enerjili bir parçacığın sürekli bölgeye yayınlanmış olduğu zamanki çekirdek içi geçiş hızı, D_n bir n eksiton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti, σ_R reaksiyon tesir kesiti ve g tek-parçacık düzey yoğunluğudur. Eşitlik (2)'deki köşeli parantez içindeki nicelik sürekli bölgede enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında olan parçacık sayısını verir. İkinci parantez içindeki ifade ise sürekli bölgeye geçiş hızının toplam geçiş hızına oranıdır. ALICE-ASH kodunda fisyon engel hesaplamaları için iki seçenek vardır. Bu fisyon engelleri programda IFIS parametresi ile gösterilir. IFIS=0 durumu RFRM (*Rotation-Finite-Range Model*) modeline [12] ve IFIS>0 durumu RLDM (*Rotation-liquid-Drop Model*) modeline [13] karşılık gelir. RLDM, fisyon engelini dönen bir çekirdeğin açısal momentumunun bir fonksiyonu şeklinde tanımlar. Mustafa ve arkadaşları, RLDM'nin doğruluğu hakkındaki sorulardan dolayı bir model geliştirdiler. Mustafa ve arkadaşlarının modeli, sonlu-aralık nükleer kuvvet etkilerini ve dağılmış nükleer yüzey etkilerini içerir [14]. Ayrıca bu model yüzey, dönme ve Coulomb enerjilerinin hesaplanması ile de RLDM'den farklıdır. RFRM modeli Mustafa ve arkadaşlarının modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur. RFRM modeli Sierk tarafından daha iyi parametreler ve bilgisayar teknikleri kullanarak oldukça iyi bir şekilde geliştirildi. Yapılan hesaplamalarda bu iki fisyon engel seçeneğini de kullanıldı.

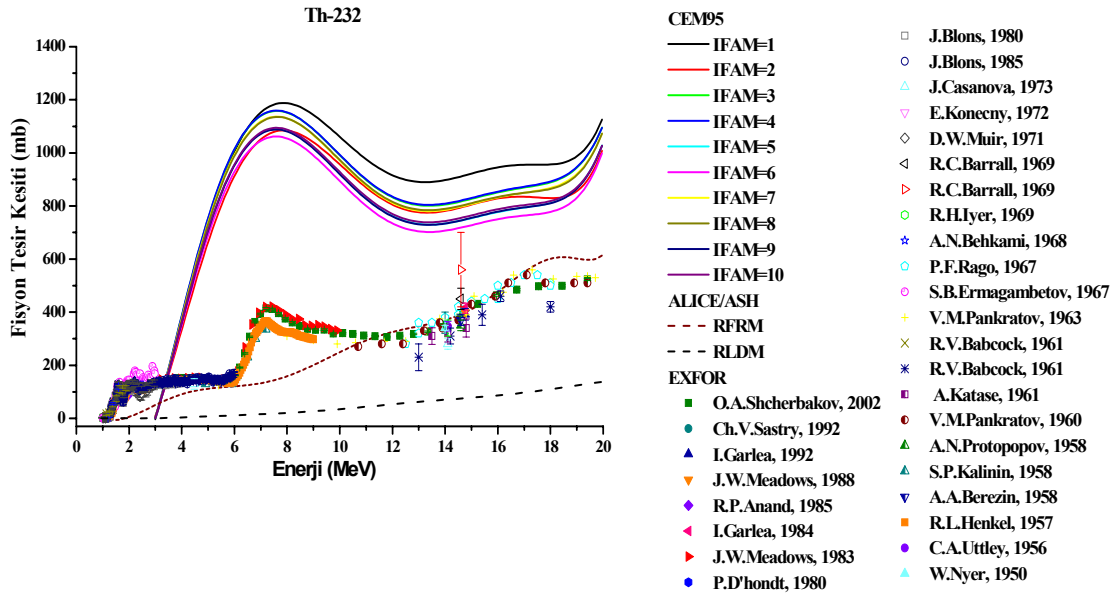
3. Hesaplama ve Sonuçlar

Bu çalışmada gelme enerjileri 1-20 MeV arasında olan hızlı nötronlar kullanılarak ${}^{230,232}\text{Th}$ ve ${}^{236,238,239,240,241,242,244}\text{Pu}$ izotoplarının fisyon tesir kesitleri hesaplandı.

Hesaplanan fisyon tesir kesitleri ve deneysel değerler [15] Şekil 1-9’da karşılaştırıldı. Hesaplamalarda CEM95 ve ALICE-ASH bilgisayar programları kullanıldı. Hesaplamalar ALICE-ASH programında RLDM ve RFRM modellerine göre incelendi. Aynı zamanda CEM95 hesaplamalarında çekirdeğin seviye yoğunlukları için farklı sistematikler kullanıldı.

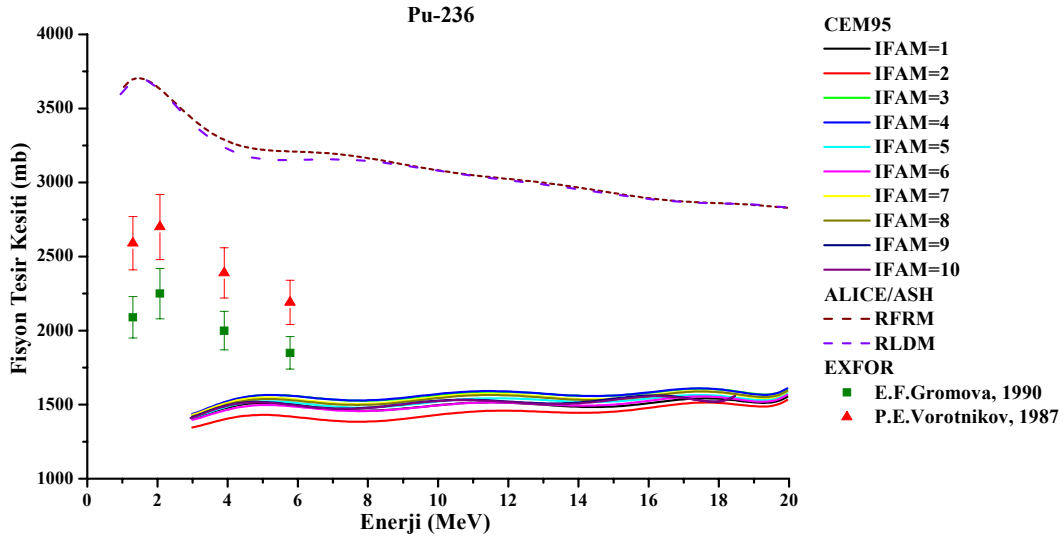


Şekil 1. ^{230}Th çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

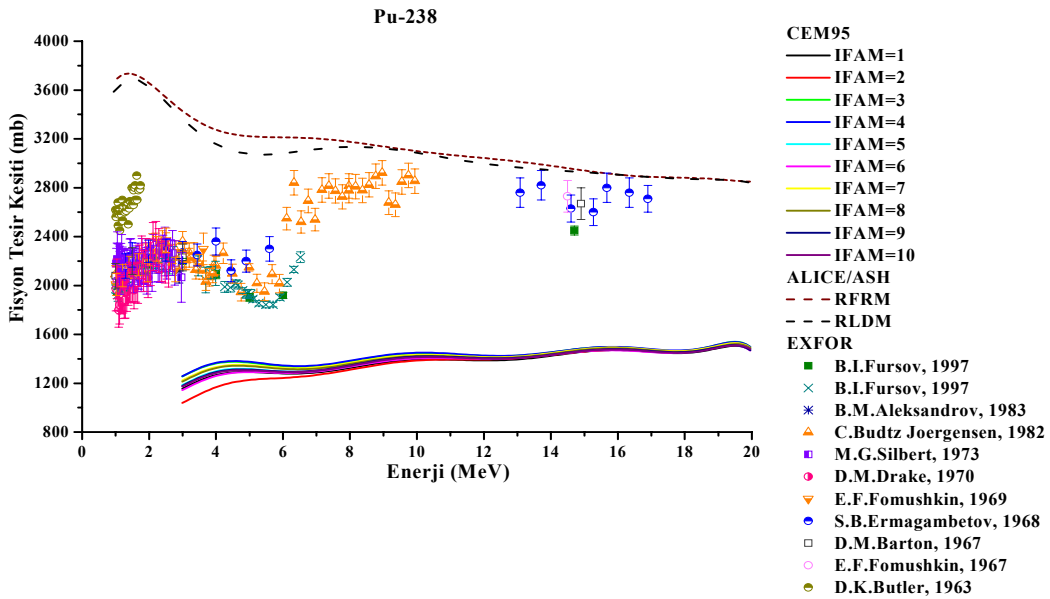


Şekil 2. ^{232}Th çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

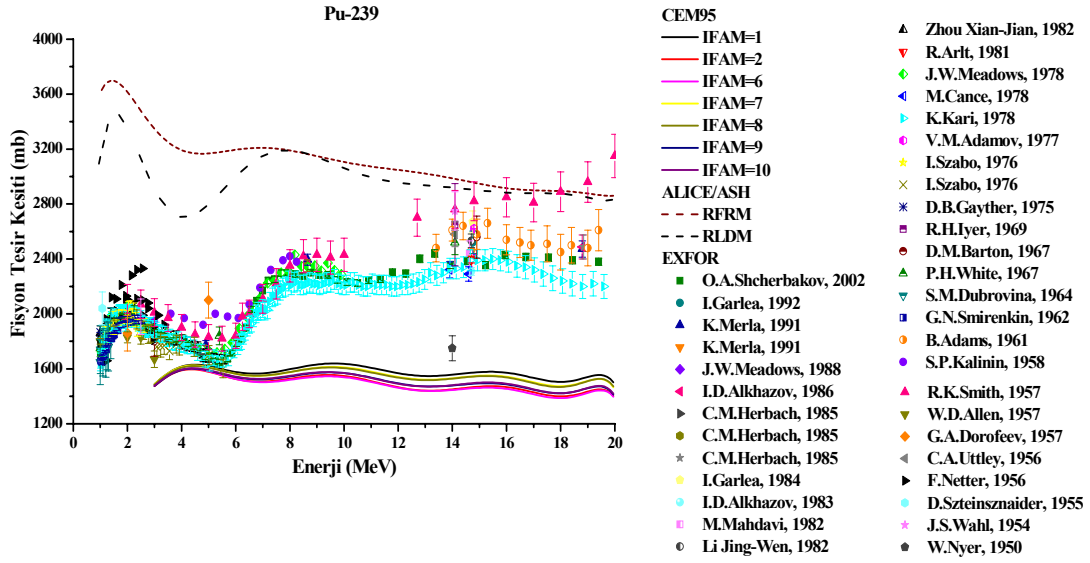
^{230}Th için yapılan hesaplamalar ve deneysel değerler Şekil 1’de karşılaştırılmıştır. 1-6 MeV aralığında CEM95 kullanılarak hesaplanan fisyon tesir kesitleri deneye uymamaktadır. 6-20 MeV aralığında CEM95 hesaplamaları ile deneysel değerler arasında biçim olarak benzerlik olmasına rağmen CEM95 hesaplamaları deneyin çok üzerinde yer almaktadır. RFRM modeli ile yapılan hesaplamalar, RLDM modeli ile yapılan hesaplamalara göre büyüklük olarak deneysel değerlere daha yakındır. Fakat her iki modelde biçim olarak deneye benzememektedir. ^{232}Th için yapılan hesaplamalar ve deneysel değerler Şekil 2’de karşılaştırılmıştır. Genel olarak ^{230}Th ve ^{232}Th için yapılan hesaplamalar benzer bir spektruma sahiptir. Ancak, ^{232}Th için RFRM modeli ile yapılan hesaplamalar 11-17 MeV aralığında deneyle benzer büyüklük ve yapıya sahiptir.



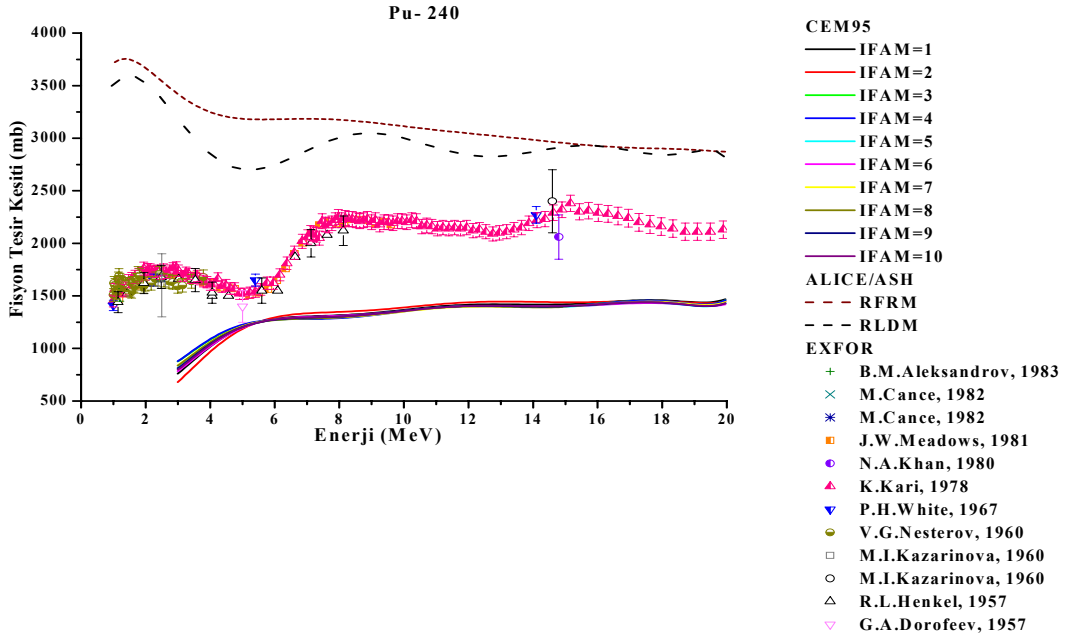
Şekil 3. ^{236}Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 4. ^{238}Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.



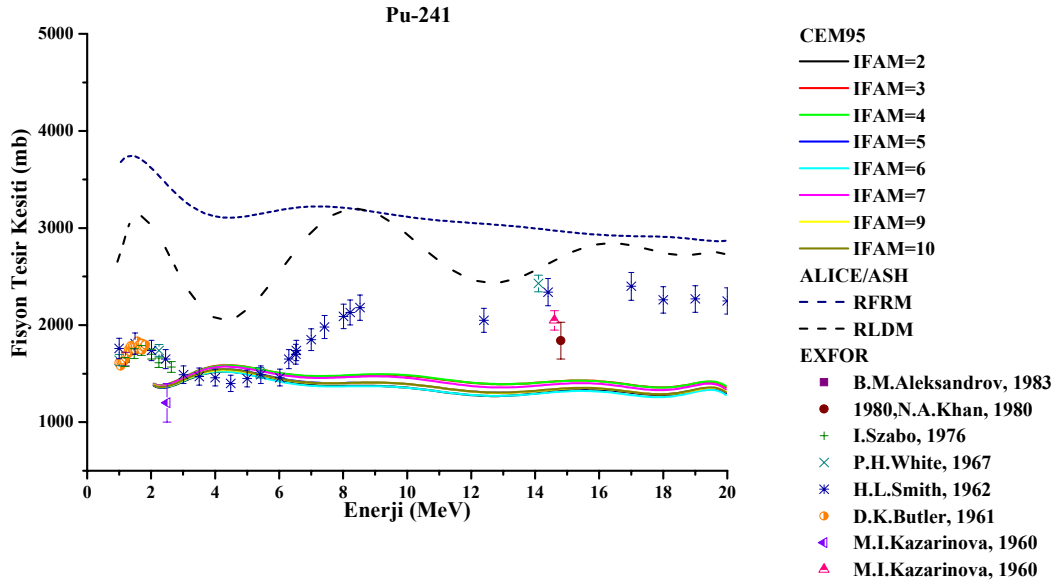
Şekil 5. ^{239}Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.



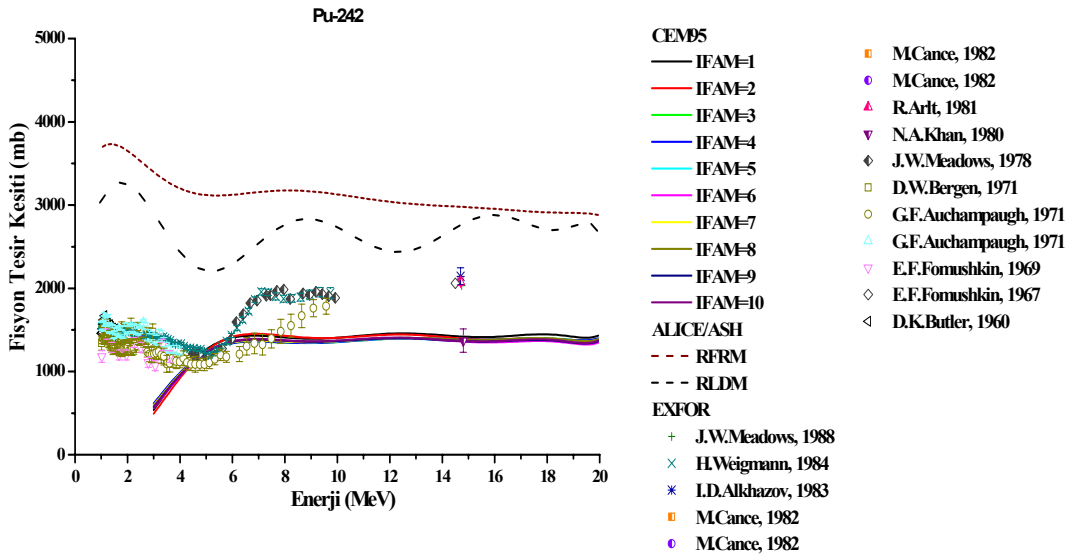
Şekil 6. ^{240}Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

^{236}Pu , ^{238}Pu , ^{239}Pu ve ^{240}Pu için yapılan hesaplamalar ve deneysel değerler Şekil 3-6'da gösterilmiştir. Deneysel değerler ALICE-ASH ve CEM95 ile yapılan hesaplamaların arasında yer almaktadır. RFRM ve RLDM modeli ile yapılan hesaplamalar hem biçim hem de büyüklük olarak birbirine benzerdir. Özellikle bu benzerlik ^{236}Pu ve ^{238}Pu için

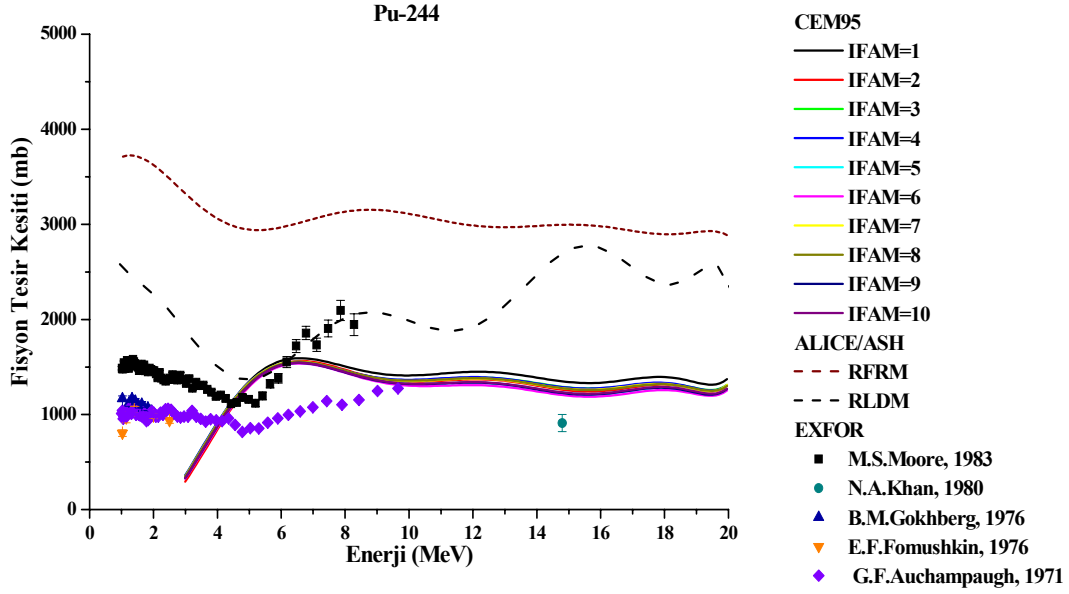
çok belirgindir. Bu modellerle yapılan hesaplamalar deneyle biçim olarak uyumludurlar. CEM95 hesaplamalarında seviye yoğunluğu parametresi için kullanılan sistematikler arasında hem biçim hem de büyüklük olarak büyük benzerlikler vardır. Ancak hesaplamalarda kullanılan bu sistematikler hem biçim hem de bölge olarak deneyden tamamen farklıdır.



Şekil 7. ²⁴¹Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 8. ²⁴²Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.



Şekil 9. ^{244}Pu çekirdeğinin hesaplanan (n, f) tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması.

^{241}Pu , ^{242}Pu ve ^{244}Pu için yapılan hesaplamalar ve deneysel değerler Şekil 7-9'da gösterilmiştir. RLDM modeli ile yapılan hesaplamalar deneysel değerlerin üzerinde yer almakta ancak biçim olarak benzemektedir. CEM95 hesaplamalarında seviye yoğunluğu parametresi için kullanılan sistematikler arasında hem biçim hem de büyüklük olarak büyük benzerlikler vardır. CEM95 hesaplamaları 3-8 MeV aralığında büyüklük olarak deneyle uyumlu ancak biçim olarak uyumsuzdur. Genel olarak bakıldığında tüm çekirdekler için ALICE-ASH hesaplamalarının CEM95 hesaplamalarına göre biçim olarak deneye daha benzer olduğu görülmektedir. Sonuç olarak fisyon olayının daha fazla anlaşılabilmesi için deneysel olarak daha fazla fisyon tesir kesitinin ölçülmesi ve teorik hesaplamalar için yeni formüllerin geliştirilmesi gereklidir.

Teşekkür

Yazarlar 05/2007-14 kod numarası ile bu çalışmaya maddi destek veren Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Broeders C.H.M., Konobeyev A.Y., Korovin A.Y., Lunev V.P., Blann M., 2006. ALICE/ASH-Precompound 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, p. 230.
- [2] Mashnik S.G., 1980. CODE CEM95, Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow, p. 14.

- [3] Barashenkov V.S., Toneev V.D., 1972. Interaction of High Energy Particle and Nuclei with Atomic Nuclei, *Atomizdat*, Moscow, p.640.
- [4] Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D., 1983. Cascade-exciton model of nuclear reactions, *Nuclear Physics*, 401: 329-361.
- [5] Barashenkov V.S, Gudima K.K., Toneev V.D., 1969. JINR Report No. P2-4065, 1968; JINR Report No. P2-4066, 1968, *Acta Physica Polonica*, 36: 4-15.
- [6] Barashenkov V.S., Gereghi F.G., Iljinov A.S., Toneev V.D., 1974. Inelastic interactions of high energy nucleons with heavy nuclei, *Nuclear Physics*, 222: 204-220.
- [7] Blann M., Bisplinghoff J., 1982. CODE ALICE/LIVERMORE 82, UCID-19614.
- [8] Blann M., Vonach H.K., 1983. Global test of modified pre-compound decay models, *Physical Review*, 28: 1475-1492.
- [9] Blann M., 1988. International Center for Theoretical Physics Workshop on Applied Nuclear theory and Nuclear Model Calculations for Nuclear Technology Applications.
- [10] Blann M., 1988. ALICE 87 (Livermore) Precompound Nuclear Model Code, Report IAEA NDS-93 REV.O.
- [11] Weisskopf V.F., Ewing D.H., 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements, *Physical Review*, 57: 472-485.
- [12] Sierk A.J., 1986. Macroscopic model of rotating nuclei, *Physical Review C*, 33: 2039-2053.
- [13] Cohen S., Plasil F., Swiatecki W.J., 1974. Equilibrium configurations of rotating charged or gravitating liquid masses with surface tension, *Annals of Physics*, 82: 557-596.
- [14] Mustafa M.G., Baisden P.A., Chandra H., 1982. Equilibrium shapes and fission barriers of rotating nuclei with a macroscopic two center model, *Physical Review C*, 25: 2524-2533.
- [15] <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.html> (2009).

Mehmet Emin Korkmaz e-posta: mkorkmaz@kmu.edu.tr

Mehtap Günay e-postal: mgunay@inonu.edu.tr

Başar Şarer e-posta: sarer@gazi.edu.tr