

## Tiroid Sintigrafisinde Kullanılan $^{94,99,99m}\text{Tc}$ ve $^{131}\text{I}$ Radyonüklidlerinin Üretim Tesir Kesiti Hesaplamaları

Yıldız Ergün<sup>1,\*</sup>, Abdullah Kaplan<sup>1</sup>

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

\*Yazışılan yazar e-posta: [yildizergun@yandex.com](mailto:yildizergun@yandex.com)

Alınış: 10 Ocak 2014, Kabul: 08 Nisan 2014

**Özet:** Bu çalışmada, tiroid kanser metastazlarının görüntülenmesinde ve tedavisinde kullanılan  $^{94,99,99m}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{I}$  radyonüklidlerinin üretim tesir kesiti incelenmiştir. Hesaplamalar,  $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94}\text{Tc}$ ,  $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99}\text{Tc}$ ,  $^{98}\text{Mo}(d,n)^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{99}\text{Ru}(n,p)^{99m}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reaksiyonları için 50 MeV parçacık gelme enerjisine kadar denge ve denge öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denge öncesi reaksiyonlar için; Full Exciton Model, Hibrit Model, Geometri Bağımlı Hibrit Model ve Cascade Exciton Model, denge reaksiyonları için ise; Weisskopf-Ewing Model kullanılmıştır. Ayrıca;  $^{94,99,99m}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{I}$  üretimi için optimum enerji aralıkları ve bu enerjilerdeki ortalama tesir kesitleri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Denge ve denge-öncesi reaksiyonlar, nükleer reaksiyon modelleri, tesir kesiti, radyonüklid

## Production Cross Section Calculations of $^{94,99,99m}\text{Tc}$ and $^{131}\text{I}$ Radionuclides Used in Thyroid Scintigraphy

**Abstract:** In this study, the production cross sections of  $^{94,99,99m}\text{Tc}$  and  $^{131}\text{I}$  radionuclides used in imaging and treatment of thyroid cancer metastasis have been investigated. The calculations for  $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94}\text{Tc}$ ,  $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99}\text{Tc}$ ,  $^{98}\text{Mo}(d,n)^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{99}\text{Ru}(n,p)^{99m}\text{Tc}$  and  $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reactions have been carried out up to 50 MeV incident particle energies by using the equilibrium and pre-equilibrium nuclear reaction models. Full Exciton Model, Hybrid Model, Geometry Dependent Hybrid Model, Cascade Exciton Model for the pre-equilibrium reactions and Weisskopf-Ewing Model for the equilibrium reactions have been used. Also, the optimum energy ranges and average cross sections in these energies for  $^{94,99,99m}\text{Tc}$  and  $^{131}\text{I}$  production have been determined.

**Key Words:** Equilibrium and pre-equilibrium reactions, nuclear reaction models, cross section, radionuclide

### 1. Giriş

Radyoizotopların yaklaşık %95 'i teşhis, %5'i tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Radyoaktif elementlerin tedavide kullanılmasında temel prensip; hedef hücrelerde radyasyon etkisine bağlı sitotoksik etki (hücre ölümü) oluşturulurken, hedef hücreleri çevreleyen dokularda hücre hasarını mümkün olan en az seviyede tutmak ve vücudun geri kalan kısımlarını radyasyonun zararlı etkilerinden korumaktır. Radyoaktif maddeler ışına yaparak belli bir yarı ömür kuralı uyarınca sürekli azalma gösterirler. Ayrıca, vücuttan idrarla ve bağırsaklar yoluyla da atılmaktadırlar. Her radyoaktif maddenin farklı bir yarı ömrü olduğundan, bunların vücuttan atılma süreleri de farklı farklıdır. Nükleer tıpta tanı amacıyla en sık kullanılan radyoaktif çekirdek Teknesyum olup, fiziksel yarı ömrü 6 saattir. Genellikle intravenöz (damar içi) enjeksiyonla verilen Teknesyum'un tamamı yaklaşık olarak 24 saatte vücuttan atılır. Eğer  $^{131}\text{I}$  kullanılırsa, vücuttan tamamen temizlenmesi için yaklaşık 1 ay geçmelidir [1].

Radyonüklid tedavi uygulamaları içerisinde “Radyoaktif İyot Tedavisi” nükleer tıp tedavi uygulamaları arasında en eski ve en yaygın olanıdır. Tiroid kanser metastazlarının görüntülenmesinde ve tedavisinde  $^{131}\text{I}$  (Radyoiyot) kullanılır. Bu tedavi şekli; normal organların korunması sağlanarak, yeterli dozda (50-200 mCi)  $^{131}\text{I}$ 'in sadece tümör dokusuna verilerek beta partikülleri aracılığı ile dokunun tahrip edilmesi esasına dayanır. Tedavi sırasında önemli yan etkiler görülmez. Radyoiyot tedavisi tiroid bezi (guatr) hastalıklarının tedavisinde 50 yıldan beri başarıyla uygulanmaktadır. Radyoaktif iyot hastaya kapsül şeklinde veya suya eklenerek oral yolla verilir. İçerken, bir damla sıvının bile yere dökülmemesi için özen gösterilmelidir. Hasta tedavi öncesi 4-6 saat ve  $^{131}\text{I}$  çözeltisini içtikten sonra 2 saat hiçbir şey yememeli ve içmemelidir [2].

İçerisinde iyot olan tüm yiyecek, içecek ve ilaçlar radyoiyot tedaviden önce kesilmelidir. Çünkü iyot içeren bazı ilaçlar ve bileşikler ile bazı gıdalar tiroid dokusunda radyoaktif iyot ve teknesyum tutulumunu engeller. Hasta, sintigrafi veya uptake testi öncesinde iyot içeren bu gıdaları aldığı anda tiroid bezi bu maddelerdeki fazla miktarda iyot tarafından doyurulur. Bunun sonucunda uptake veya sintigrafi için verilen radyonüklid (İyot-131, Teknesyum-99m) tiroid hücreleri tarafından tutulmaz. Uptake testinde yanlış, negatif olarak çok düşük değerler elde edilir (% 2-3 gibi). Sintigrafide ise, tiroid bezinde aktivite tutulumu azalır veya tutulum görülmez. Bu nedenle; iyot uptake testi ve sintigrafi yapılacaksa, iyot içeren bileşiklerin belli süre boyunca kullanılmamaları gerekir [3].

$^{131}\text{I}$ 'in tutulumu (uptake) ve ucuzluğu avantaj olmasına rağmen, yarı ömrünün uzun olması (8 gün), maksimum beta enerjisi 0.61 MeV ve gama enerjisinin yüksek olması (364 keV) maruz kalınan radyasyon dozunu da arttırmaktadır. Bu nedenle, özel endikasyonlar dışında rutin tiroid sintigrafisinde kullanılmaz. Tıbbi uygulamalarda  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  jeneratöründen sağılan  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , yarı ömrü kısa (6 saat), gama enerjisi uygun sınırlarda (140 keV) ve ucuz bir radyoaktif maddedir. Tiroid hücresi tarafından iyot molekülü gibi tutulması sonucunda sintigrafik görüntü elde edildiğinden, bugün ülkemizde rutin tiroid sintigrafisinde kullanılan radyoaktif maddedir [3].

Bu çalışma; radyoaktif iyot tedavisine yönelik bir bilgi aktarımını sağlamakla kalmayıp; tiroid tedavisinde kullanılan  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{I}$  gibi önemli çekirdeklerin üretimine ait yapılacak deneylere ışık tutacak bir öngörü niteliğindedir.

## 2. Materyal ve Metot

Nükleer reaksiyonlarla üretilen tıbbi radyonüklid  $^{94,99,99\text{m}}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{I}$ 'in üretim tesir kesitleri, denge ve denge-öncesi reaksiyon mekanizmaları kullanılarak hesaplanmıştır. Denge hesaplamaları için Weisskopf-Ewing Modeli [4], denge-öncesi hesaplamalar için ise; Full Exciton Model, Hibrit Model, Geometri Bağımlı Hibrit Model (GBH), Cascade Exciton Model (CEM) kullanılmıştır. Hesaplamalar; CEM95 (Cascade Exciton Modeli için) [5,6,7], ALICE/ASH [8] (Hibrit ve Geometri Bağımlı Hibrit Model için) ve PCROSS (Full Exciton Model için) [9] program kodları ile yapılmıştır.

### 2.1. Reaksiyon Mekanizmaları

### 2.1.1. Denge Reaksiyonları

Denge yayınlanması, açısal momentumu ihmal eden Weisskopf–Ewing (WE) Modeli’ne [4] göre hesaplanır. Buharlaşmada temel parametreler; bağlanma enerjisi, ters tesir kesiti, çiftlenim ve düzey–yoğunluk parametreleridir. Gelen “a” ve çıkan kanal “b” olmak üzere reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma_{ab}^{WE} = \sigma_{ab}(E_{inc}) \frac{\Gamma_b}{\sum_b \Gamma_b} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $E_{inc}$  gelme enerjisi,”

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

ve toplam tek–parçacık durum yoğunluğu;

$$\omega_1(E) = \frac{1}{\sqrt{48}} \frac{\exp(2\sqrt{\alpha(E-D)})}{E-D} \quad (3)$$

ile verilir.  $\sigma_b^{inv}$ ; ters tesir kesiti,  $E$ ; bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi,  $D$ ; çiftlenim enerjisi,  $\alpha = \frac{6}{\pi^2} g$   $\alpha = \frac{6}{\pi^2} g$  ve  $g$ ; tek parçacık durum yoğunluğudur [10].

### 2.1.2. Denge Öncesi Reaksiyonlar

Nükleer reaksiyonlar iki kategori altında incelenebilirler. Birincisi, çok hızlı bir süreçte gerçekleşen direk reaksiyonlardır. Bu tür reaksiyonların oluşum süresi yaklaşık  $10^{-22}$  s’dir. Bu süre, hızlandırılmış bir parçacığın, hedef çekirdeği boyunca hiç etkileşmeden geçmesi olarak da adlandırılabilir. İkinci tür reaksiyonlar ise; bileşik çekirdek reaksiyonları olup, reaksiyon süresi ortalama olarak  $10^{-16}$  s’dir ve bu değer direk reaksiyonlara göre oldukça uzundur. Bileşik çekirdek reaksiyonları istatistiksel metotlarla incelenirken, direk reaksiyonlar mikroskobik anlamda incelenirler [11].

Nötronlarla oluşturulan reaksiyonlarla ilgili çalışmaların ilk yıllarında bileşik çekirdek reaksiyonları ve doğrudan etkileşmelerden başka, denge–öncesi mekanizmasının varlığı gözlemlendi [12]. Denge–öncesi mekanizması, hedef çekirdeklerinin kütlelerine ve bileşik sistemin uyarılma enerjisine bağlı olarak birincil nötron, proton ve alfa parçacıklarının yayınlanmasında diğer reaksiyon türlerine göre daha önemli rol oynamaktadır [13].

Deneyler, doğrudan ve bileşik çekirdek reaksiyonlarından başka üçüncü bir reaksiyonun varlığını göstermektedir. Buna “denge–öncesi reaksiyon” denir. Bu tür reaksiyonlarda parçacıklar; iki nükleer sistemin çarpışarak bir bileşik sistem oluşturmasıyla, bu

sistemin tam bir termal veya istatistik dengeye ulaşması arasında geçen süre içerisinde yayınlanırlar [11]. Bu; özellikle, yayınlanan parçacık spektrumunun yüksek enerji kısmında çok önemlidir.

Denge-öncesi reaksiyonları inceleyen başlıca modeller:

1. Full Exciton Modeli.
2. Hibrit ve Geometri Bağımlı Hibrit Model
3. Cascade Exciton Model

Modellerin hepsinde istatistiksel yöntemler kullanılır ve hesaplamalarda çekirdeğin yapısı ve açısal momentum etkisi hesaba katılmaz [14].

### 2.1.2.1. Full Exciton Model

Bu model, gelen parçacıkla hedef çekirdek arasındaki ilk etkileşmeden sonra uyarılmış sistemin giderek artan karmaşıklıkta bir dizi basamaktan geçtikten sonra dengeye ulaşabildiğini varsayar. Bu basamakların her birinden yayınlanma mümkün olabilir. Farklı karmaşıklıkta uyarılmış parçacık ve deşik sayılarına göre sınıflandırılır. Bu modelde reaksiyon bir çiftlenimli diferansiyel denklem sistemi ile Eşitlik (4)'te tanımlanmıştır [15].

$$(dP/dt) = \lambda^+ (n-2) P(n-2,t) + \lambda^- (n+2) P(n+2,t) - \{ \lambda^+ (n) + \lambda^- (n) W(n) \} P(n,t) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te  $P(n,t)$ ,  $n$  ( $n = p+h$ ) exciton durumunda bulunma olasılığıdır.  $\lambda^+$ ,  $\lambda^-$   $n \rightarrow n+2$  ve  $n \rightarrow n-2$  geçiş hızları,  $W(n)$   $n$  exciton durumundan tüm enerjilerde yayınlanma hızıdır. Burada, ana denklem sistemi için başlangıç koşulu;

$$P(p,h,0) = \delta(p,p_0) \delta(h,h_0) \quad (5)$$

nükleonlarla oluşturulan reaksiyonlar için başlangıç parçacık sayısı  $p_0=2$ , başlangıç deşik sayısı  $h_0=1$  ' dir. Tesir kesiti integrali ise,

$$d\sigma/d\varepsilon = \sigma_a \sum W_b(n,\varepsilon) \tau(n) \quad (6)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada;  $\sigma_a$  reaksiyon tesir kesiti,  $\tau(n)$  de  $n$  exciton durumunda ortalama ömrüdür ve ortalama ömür de  $t=0$  dan  $t=\infty$  arasındaki integrasyonundan  $\tau(n) = \int P(n,t) dt$  bulunur.  $W_b(n,\varepsilon)$ ;  $b$  parçacığının  $n$ , exciton basamağından ortalama yayınlanma hızıdır. [15].

### 2.1.2.2. Hibrit ve Geometri Bağımlı Hibrit Model

Denge öncesi bozunma için hibrit model formülü [16]

$$P_v(\varepsilon) = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} \left[ {}_n\chi_v N_n(\varepsilon,U) / N_n(E) \right] g d\varepsilon \{ \lambda_c(\varepsilon) / \lambda_c(\varepsilon) + \lambda_+(\varepsilon) \} D_n \quad (7)$$

$$d\sigma_v(\varepsilon) / d\varepsilon = \sigma_R P_v(\varepsilon) \quad (8)$$

şeklindedir. Burada  $P_v(\varepsilon) d\varepsilon$ ; enerjisi  $\varepsilon$  ile  $\varepsilon + d\varepsilon$  arasında olan ve sürekli bölgeye yayınlanan  $v$  tipi parçacıkların (nötron ve proton) sayısı,  $n$ ; denge konumundaki (en muhtemel) exciton sayısı,  $nX_v$ ; bir  $n$  exciton durumundaki  $v$  türündeki parçacıkların sayısı,  $E$ ; bileşik sisteminin uyarılma enerjisi,  $N(\varepsilon, U)$ ; bir exciton  $\varepsilon$  kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin  $U = E - B_{v-\varepsilon}$  uyarılma enerjisinin diğer  $n-1$  excitonları arasında paylaşılacak şekilde  $n$  excitonunun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı,  $N_n(E)$ ;  $E$  uyarılma enerjisinde  $n$  parçacık artı deşik ( $n = p + h$ ) toplam birleşen sayısı,  $\lambda_c(\varepsilon)$ ; bir parçacığın ( $\varepsilon$ ) kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızı,  $\lambda_+(\varepsilon)$ ;  $\varepsilon$  enerjili bir parçacığın sürekli bölgeye yayınlanmış olduğu zamanki çekirdek içi geçiş hızı,  $D_n$ ; bir  $n$ - exciton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti,  $\sigma_R$  reaksiyon tesir kesiti,  $g$  tek-parçacık düzey yoğunluğudur. Denklem 7'deki köşeli parantez içindeki nicelik, sürekli bölgede enerjisi  $\varepsilon$  ile  $\varepsilon + d\varepsilon$  arasında olan parçacık sayısını verir. İkinci parantez içindeki ifade ise, sürekli bölgeye geçiş hızının toplam geçiş hızına oranıdır [17].

### 2.1.2.3. Cascade Exciton Model

Orta enerji bölgesindeki nükleon-çekirdek reaksiyonları, denge öncesi parçacık yayınlanmasının incelenmesinde elverişli olduğundan çekiciliğini korumaktadır. Uyarılmış bir nükleer sistem içerisinde istatistiksel dengeye ulaşana kadarki parçacık yayınlanma mekanizması, bir bileşik çekirdeğin bozunumları ve direk etkileşmelere göre incelenir [11].

Nükleer reaksiyonların denge öncesi anlayışının gelişimi, nükleer yapının anlaşılmasına ve parçacık yayınlanma mekanizmasının açıklanmasına olanak verir. Yüksek enerjilerde nükleer reaksiyonların birçok özellikleri, nükleer seviyelerde ardı ardına geçiş işlemi (Cascade) dikkate alınarak gayet iyi bir şekilde incelenebilir. Cascade Exciton Model (CEM), reaksiyonların üç safhada meydana geldiğini kabul eder. İlk safha bir nükleer seviyelerdeki geçiştir. İkinci safha denge öncesine; üçüncü safha ise, denge (veya bileşik çekirdek) durumuna karşılık gelir. Bu üç bileşen deneysel olarak ölçülen değerlere katkıda bulunur. Buna göre parçacık spektrumu için;

$$\sigma(p) dp = \sigma_{in} \{ N^{cas}(p) + N^{prq}(p) + N^{eq}(p) \} dp \quad (9)$$

yazılır. Buradaki  $\sigma_{in}$  inelastik saçılma tesir kesiti, ardı ardına geçiş model içinde hesaplanır. Fakat, optiksel model hesaplamalarından bağımsızdır; bu yüzden bu model hesaplamalarında bir normalizasyon kat sayısına ve ek veriye gerek kalmaz. Cascade modeli; hızlı parçacıkların kinematik karakteristikleri hakkında bütün bilgileri içinde bulunduran reaksiyon geometrisini hesaba katar, fakat Cascade parçacıkları arasındaki etkileşmeleri ihmal eder. Diğer taraftan; exciton modeli uyarılmış bir çekirdeği artık  $h-h$ ,  $p-h$  ve  $p-p$  (yani “parçacık-deşik” serbestlik derecesi dahil edilmiştir) etkileşmeleri hesaba katan yarı-parçacık gazı gibi düşünür. Cascade modelin şartları parçacığın kinetik enerjisi nükleonun bağlanma enerjisini aştığı yüksek enerjilerde daha iyi yerine getirilir. Geniş bir enerji bölgesinde yayılan parçacıkların nükleer reaksiyon özelliklerinin tanımını geliştirmek için bu iki modeli birleştirmek önemlidir. Ayrıca, CEM için hızlandırılan parçacıklar ve çekirdek iki farklı tür olarak düşünülür ve bu

parçacıklar arasında da çarpışmalar ihmal edildiği için, hesaplamalarda verilen enerjiler arasında dalgalanma gözükür [18].

## 2.2. Hesaplamalarda Kullanılan Bilgisayar Program Kodları

### 2.2.1. ALICE / ASH Bilgisayar Program Kodu

ALICE/ASH [19] program kodu, ALICE91 [20] program kodunun biraz değiştirilmiş ve geliştirilmiş bir sürümüdür. ALICE/ASH program kodu 300 MeV'lik gelme enerjisine kadar; uyarılma fonksiyonu, ikincil parçacıkların açısal dağılımı, tesir kesiti hesapları ve yayınlanma spektrumu için uygulanabilir. Başlangıç exciton sayısı  $n_0=3$  (proton, nötron ve deşik sayıları toplamı) olarak alınır. Ayrıca; proton girişli reaksiyonlar için hesaplamadaki uyarılma sayısı da sistematiksel hesaplama yöntemi ile bulunur [21].

### 2.2.2. CEM95 Bilgisayar Program Kodu

Cascade Exciton Model hesaplamalarını CEM95 [7] bilgisayar kodu ile yapar. Bu kod, CEM92M [5,6] modelinin gelişmiş versiyonudur. Nükleer reaksiyonların hesabı için Monte Carlo hesaplamasını kullanır. Bu yöntem; düzey yoğunlukları üzerinde, bütün bilinen verilerin içerdiği sistematiksel bir hesaplama türüdür. Yüksek bir enerjide seviye yoğunluk parametresinin asimtotik Fermi Gaz değeri ile  $a(Z, N, E^*)$ 'nin düzey yoğunluk parametresinin fonksiyonel oluşumunu kullanır[22]. Bu programda, Z; atom numarası, N; nötron sayısı, E; parçacıkların toplam enerjisidir [21].

### 2.2.3. PCROSS-03 Bilgisayar Program Kodu

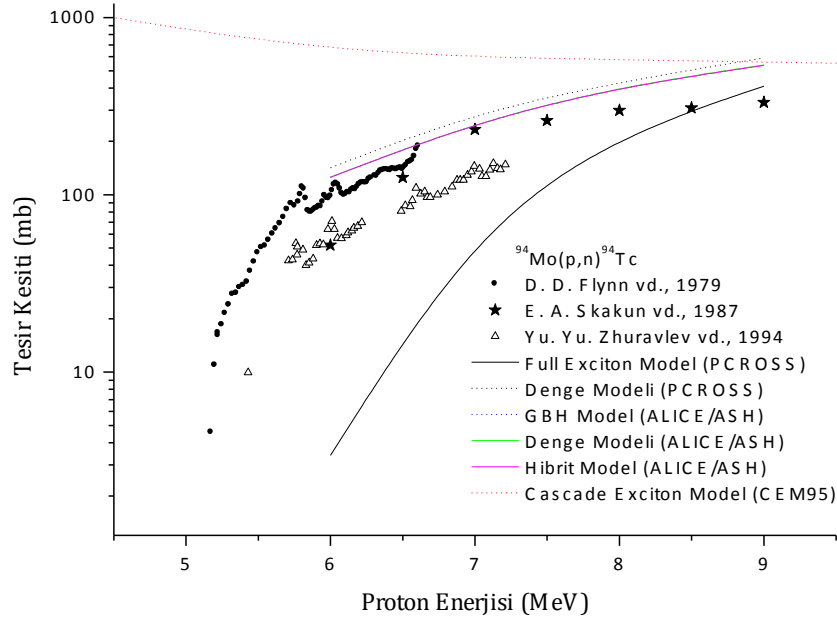
PCROSS programı ile denge ve denge-öncesi model hesapları yapılmaktadır. Denge modeli hesapları için; *Weisskopf-Ewing Model*, denge öncesi hesapları için; *Full Exciton Model* kullanılır. Matematiksel işlemlerinde, başlangıç exciton sayısı  $n_0=1$  (proton1; deşik 0) olarak alınır. Denge durumuna geçerken exciton sayısı ise,  $n=\sqrt{1.4} gE$  olarak hesaplanır. Burada;  $g=A/13$ ; A ise, kütle numarasıdır. E; uyarılmış haldeki çekirdeğin enerjisi olarak hesaba katılır [17].

Ayrıca; bu program, 56 MeV'lik gelme enerjisinden daha yüksek mertebeye sahip enerji değerleri için tesir kesiti hesaplamasına izin vermemektedir.

## 3. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, tiroid sintigrafisi ve tedavisinde kullanılan  $^{94,99,99m}\text{Tc}$  ve  $^{131}\text{I}$  radyonüklidlerine ait üretim tesir kesitleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda; nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak, denge ve denge-öncesi etkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR/CSISRS) Kütüphanesi'nden alınan deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır [23]. 4-50 MeV gelme enerjisi aralığında proton, nötron ve döteron girişli reaksiyonlarda elde edilen tesir kesiti değerleri Şekil 1-4, Tablo1 ve Tablo2' de verilmiştir.

### 3.1. $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94}\text{Tc}$ Reaksiyonu

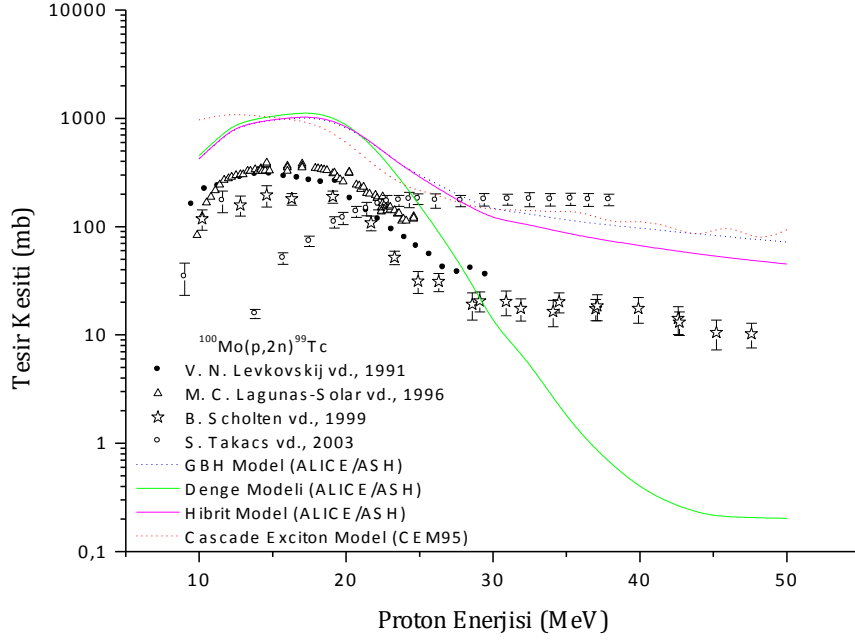


Şekil 1.  $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94}\text{Tc}$  reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması

Şekil 1'e bakıldığında, Cascade Exciton Model'in 7 MeV'e kadar deneysel verilerle uyumsuz olduğu, bu enerji değerinden sonra verileri paralel olarak üstten takip ettiği gözlenmektedir. Full Exciton Model de düşük değerler almasına rağmen verilerle paralelliği yakalamıştır. ALICE/ASH ve PCROSS Denge modelleri 6 MeV'den itibaren değer vermeye başlamış olup, 6–8 MeV arasında kendi aralarında ve deneysel değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.  $^{94}\text{Tc}$  üretimi için optimum proton enerjisi aralığı 7–9 MeV olup, bu enerjilerdeki ortalama tesir kesiti 200–500 mb'dir.

### 3.2. $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99}\text{Tc}$ Reaksiyonu

Şekil 2' de deneysel ve teorik tesir kesiti hesapları karşılaştırıldığında, Cascade Exciton Model, Hibrit ve GBH modellerinin kendi aralarında neredeyse birebir örtüştüğü gözlenmiştir. Bu modeller deneysel verilerle birebir aynı olmasa da, verilere paralel olarak geometrisini yakalamıştır. ALICE/ASH denge modeli de 30 MeV'den sonra deneysel değerlerden sapmıştır.  $^{99}\text{Tc}$  üretimi için optimum proton enerjisi aralığı 15–20 MeV olup, bu enerjilerdeki ortalama tesir kesiti 900–1000 mb'dir.

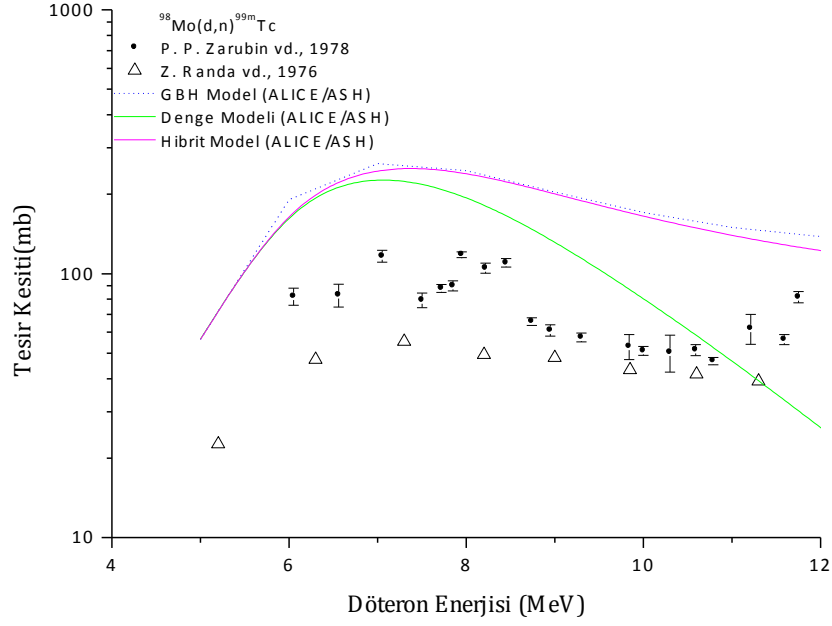


Şekil 2.  $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99}\text{Tc}$  reaksiyonu için hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması

### 3.3. $^{98}\text{Mo}(d,n)^{99m}\text{Tc}$ Reaksiyonu

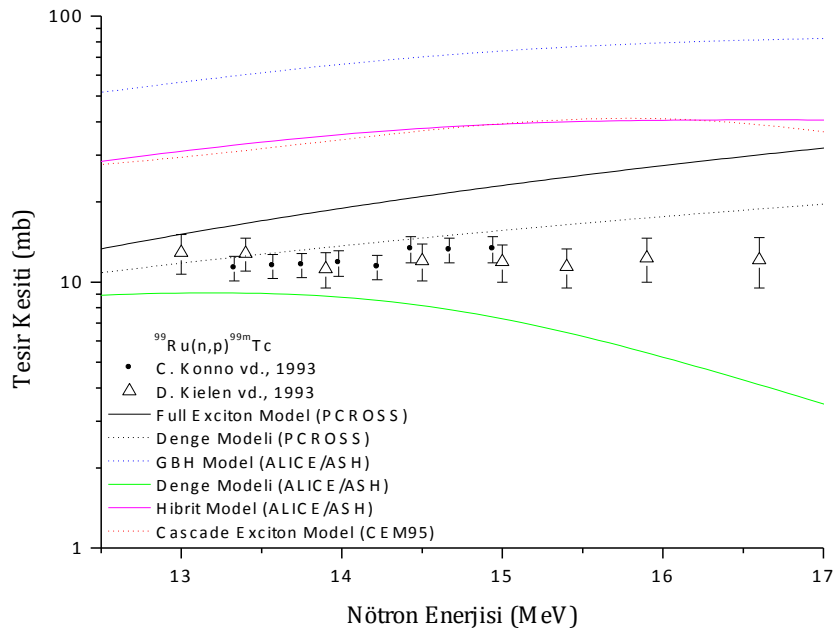
Şekil 3'teki  $^{98}\text{Mo}(d,n)^{99m}\text{Tc}$  reaksiyonuna ait hesaplanan tesisir kesitleri incelendiğinde, ALICE/ASH hesaplamalarının deneysel verilerden yüksek sonuçlar vermesine rağmen, paralellik sergilediği gözlenmiştir. Bu hesaplamaların 10–12 MeV döteron gelme enerjisi aralığında Denge Modeli'yle en yakın uyumu sağladığı görülmektedir. Bu reaksiyona ait  $^{99m}\text{Tc}$  üretimi için optimum döteron enerjisi aralığı 5–9 MeV olup, bu enerjilerdeki ortalama tesisir kesiti 100–200 mb'dir.





Şekil 3.  $^{98}\text{Mo}(d,n)^{99m}\text{Tc}$  reaksiyonu için hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması

### 3.4. $^{99}\text{Ru}(n,p)^{99m}\text{Tc}$ Reaksiyonu



Şekil 4.  $^{99}\text{Ru}(n,p)^{99m}\text{Tc}$  reaksiyonu için hesaplanan tesisir kesitlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması

Şekil 4 incelendiğinde; 13–15 MeV enerji aralığında PCROSS Denge Modeli'nin yapılan her iki deneysel veriyle de neredeyse birebir örtüştüğü gözlenmiştir. ALICE/ASH Denge Modeli 14 MeV'e kadar deneysel veriler ile paralellik göstermiş, bu enerji değerinden sonra uyumunu kaybetmiştir. Diğer modeller deneysel verilerden yüksek sonuçlar vermesine rağmen verileri paralel takip ettiği görülmüştür. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi;  $^{99m}\text{Tc}$ 'nin üretimi için optimum nötron enerjisi aralığı 13–15 MeV olup, bu enerjilerdeki ortalama tesir kesiti 10–15 mb'dir.

### 3.5. $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$ Reaksiyonu

$^{131}\text{I}$  üretiminin nötron girişli tesir kesiti hesaplamalarına ait literatür taraması yapıldığında, bu çekirdeğin  $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reaksiyonuna ait deneysel verilerinin çok az olduğu görülmüştür. Tablo 1'de gösterildiği gibi; sadece 14,4 MeV ve 14,6 MeV enerjilerinde yapılan bu iki ayrı deneysel veri, tesir kesitlerini ALICE/ASH bilgisayar program kodu ile teorik olarak hesapladığımız değerlerle Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. 14,4 MeV ve 14,6 MeV enerji değerlerinde hesaplanan denge ve denge öncesi modellerin deneysel verilere göre daha düşük değerler aldığı gözlenmiştir. Deneysel ve teorik olarak karşılaştırılan değerlere göre, ALICE/ASH bilgisayar program kodunun  $^{131}\text{I}$  üretimine ait tesir kesitini hesaplamada yeterli uyumu sağlamadığı anlaşılmaktadır.

**Tablo 1.**  $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reaksiyonu için Deneysel Nükleer Reaksiyon Data Kütüphanesi'nden alınan verilerle tesir kesiti karşılaştırmaları

Literatürden Alınan Deneysel Değerler	Enerji (MeV)	Tesir Kesiti (mb)
E.Kondaiah et al., 1968	14,4	114
R.A. Sigg et al., 1976	14,6	114,2

$^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reaksiyonuna ait hesaplamalar hariç tüm modellerin yüksek ya da düşük değerler almasına rağmen, deneysel verilerle paralellik sergilediği gözlenmiştir. CEM95 programıyla yapılan hesaplamalar bazı reaksiyonlar için deneysel verilerle uyum sağlamamıştır. Geometri Bağımlı Hibrit ve Hibrit Model ile hesaplanan tesir kesitleri birbirine oldukça yakındır. Genel olarak; modellerin birbiriyle gösterdiği paralel uyumundan dolayı bu çalışma, diğer enerji aralıklarında da yapılacak radyoizotop üretimi çalışmalarına da yol gösterecektir. Ayrıca; 7–9 MeV proton gelme enerjilerinde  $^{94}\text{Tc}$ , 15–20 MeV proton gelme enerjilerinde  $^{99}\text{Tc}$ , 5–9 MeV döteron ve 13–15 MeV nötron gelme enerjilerinde  $^{99m}\text{Tc}$  üretiminin yapılabileceği görülmektedir.

**Tablo 2.**  $^{131}\text{Xe}(n,p)^{131}\text{I}$  reaksiyonu için nükleer reaksiyon modelleriyle hesaplanan tesir kesiti karşılaştırmaları

Nükleer Reaksiyon Modelleri	14,4 MeV' deki Tesir Kesiti (mb)	14,6 MeV' deki Tesir Kesiti (mb)
GBH Model (ALICE/ASH)	44,7649	47,529
Denge Modeli (ALICE/ASH)	1,37266	1,29954
Hibrit Model (ALICE/ASH)	19,4143	20,3387

### Kaynaklar

- [1] Ergün, Y., 2012. Tıpta Teşhis ve Tedavide Kullanılan Bazı Radyoizotopların Nükleer Reaksiyon Modelleri Kullanılarak Üretilebilirliğinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120s, Isparta, Türkiye.
- [2] Sivri, N. N., Özer, A. Y., 2011. Radyonüklidik Tedavi. Hacettepe Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Radyofarmasi Anabilim Dalı, 10s, 06102-Ankara, Türkiye.  
[http://www.teb.org.tr/images/upld2/ecza\\_akademi/makale/20110113051411radyonuklidik\\_tedavi.pdf](http://www.teb.org.tr/images/upld2/ecza_akademi/makale/20110113051411radyonuklidik_tedavi.pdf)  
Erişim Tarihi: 08.08.2011.
- [3] Adalet I., Mudun A., Ünal S. N., Türkmen C., 2012. Nükleer Tıp Ders Kitabı, *İstanbul Üniversitesi Yayın*, 146s, İstanbul, Türkiye.  
[http://www.istanbul.edu.tr/itf/itfогrenci/attachments/079\\_nukleer.tip.kitap.hali.pdf](http://www.istanbul.edu.tr/itf/itfогrenci/attachments/079_nukleer.tip.kitap.hali.pdf), Erişim Tarihi: 10.12.2013.
- [4] Weisskopf, V. F., Ewing, D. H., 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements, *Physical Review*, 57: 472-485.
- [5] S. G. Mashnik, V. D Toneev, 1974. Modex-The Program for Calculation of the Energy Spectra of Particles Emitted in the Reactions of Pre-Equilibrium and Equilibrium Statistical Decays, Communications of the Joint Institute for Nuclear Research, P4-8417, Dubna.
- [6] Gudima, K. K., Mashnik, S. G., Toneev, V. D., 1983. Cascade-exciton model of nuclear reactions. *Nucl. Phys. A* 401, 329–361.
- [7] Mashnik, S.G., 1995. User Manual for the Code CEM95, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moskow Region.
- [8] 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, FZK 7183.
- [9] Capote, R., Osorio, V., Lopez, R., et al., 1991. Final Report on Research Contract 5472/RB, INDC(CUB)-004 (Higher Institute of Nuclear Science and Technology, Cuba), Translated by the IAEA on March 1991 (PCROSS program code).
- [10] Yalçın, E.G., 2008. Proton Hızlandırıcılarının Nükleer Uygulama Alanları İle Protonlarla Oluşturulan Nükleer Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 132s, Ankara, Türkiye.
- [11] Yıldırım, G., 2009. Bazı Amfoter Grubu Hedef Çekirdeklerin Proton Giriş Reaksiyonlarında Üretilen Nötronların Reaksiyon Tesir Kesitlerinin ve Yayınlanma Spektrumlarının İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, Isparta, Türkiye.
- [12] Holub, H., Caplar, E., Cindro, N., 1980. A Consistent Study of Precompound and Compound-Nucleus Emission Mechanisms in Neutron-Induced Reactions, *Z. Physik A. Atom and Nuclei*, 296: 341–357.
- [13] Millazzo-Colli, L., Braga-Marcuzzan, G.M., Milazzo, M., 1974. Preformation Probability of  $\alpha$ -Clusters in Rare earth Nuclei measured by Means of the (p,  $\alpha$ ) Reaction, *Nuclear Physics A*, 218: 274–284.
- [14] Kalbach, C., 1975. Pre-equilibrium Models in General the Griffin Model in Particular, *Acta Physica Slovaca*, 25(2-3): 100-125.
- [15] 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.
- [16] Blann, M., Vonach, H. K., 1983. Global Test of Modified Pre-Compound Decay Models, *Physical Review C*, 28: 1475–1492.
- [17] Kaplan, A., Tel, E., Aydın, A., 2009. The Equilibrium and Pre-equilibrium 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.
- [18] Şarer, B., Aydın, A., Günay, M., Korkmaz, M. E., Tel, E., 2009. Calculations of Neutron-Induced Production Cross-Sections of  $^{180,182,183,184,186}\text{W}$  up to 20 MeV, *Annals of Nuclear Energy*, 36(4): 417–426.
- [19] 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.
- [20] Blann, M., 1991. ALICE-91, Report PSR-146, LLNL/IAEA/NEA Data Bank, France.

- [21] 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, 98s, Isparta, Türkiye.
- [22] Ignatyuk, A. V., Istekov, K. K., Smirenkin, G. N., 1979. The role of collective effects in the systematics of nuclear level densities, *Soviet Journal of Nuclear Physics (trans.)*, 29(4): 875-883.
- [23] EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data) Database Version of December 19, 2007 (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>). Erişim Tarihi: 10.12.2013.

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