



## <sup>57</sup>Co RADYOİZOTOPU ÜRETİMİ İÇİN BAZI ALFA GİRİŞLİ REAKSİYONLARIN UYARILMA FONKSİYONLARININ İNCELENMESİ

Asiye GÜROL <sup>1</sup>, İsmail Hakkı SARPÜN <sup>2,3</sup>, Hüseyin Ali YALIM <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Afyon

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Antalya

<sup>3</sup>Akdeniz Üniversitesi, Nükleer Bilimler Araştırma Merkezi, Antalya

<sup>4</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Afyon

### ÖZET

Sağlık alanında tedavi veya teşhis amacıyla kullanılan radyoizotoplar genellikle siklotron veya reaktörler ile üretilmektedir. Radyoizotopların hangi reaksiyon ile üretileceğini, üretimde kullanılacak olan mermi parçacıklarının enerjisini, hedef çekirdek ve reaksiyonun tesir kesitleri belirlemektedir. Deney yapılmanın zor ve pahalı olması durumlarında ilk önce simülasyon çalışmalarının yapılması zaman ve ekonomik açıdan tasarruf sağlamaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, alfa ile oluşturulan reaksiyonlarla <sup>57</sup>Co radyoizotopunun elde edilme simülasyon çalışması önem kazanmaktadır. Farklı reaksiyonlarla <sup>57</sup>Co radyoizotop üretimi simülasyon çalışmaları, Talys ile ilk defa gerçekleştirilmiştir.

<sup>57</sup>Co radyoizotopu genellikle B12 vitamini eksikliği için Schilling testinde kullanılmaktadır. Gastrointestinal B12 vitamini emilim tayini, nükleer tıp laboratuvarları tarafından sunulan ilk testler arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, alfa parçacıkları ile gerçekleştirilen <sup>55</sup>Mn( $\alpha,2n$ ), <sup>54</sup>Fe( $\alpha,p$ ), <sup>56</sup>Fe( $\alpha,2n+p$ ), <sup>59</sup>Co( $\alpha,2n+\alpha$ ), <sup>59</sup>Co( $\alpha,x$ ) ve <sup>58</sup>Ni( $\alpha,p+\alpha$ ) reaksiyonları ile <sup>57</sup>Co radyoizotopunun üretim reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları incelenmiştir. TALYS 1.8 programı kullanılarak yapılan hesaplamalar, EXFOR kütüphanesinden alınan deneysel veriler ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırılarak reaksiyon tesir kesitleri grafikleri sunulmuştur. Bu çalışma sonucunda tesir kesitleri birbirine yakın ve en büyük olan üç reaksiyon bulunmaktadır. Bu reaksiyonlardan mermi çekirdeklerinin enerjisi diğer iki reaksiyondan küçük olan <sup>54</sup>Fe( $\alpha,p$ ) reaksiyonu <sup>57</sup>Co radyoizotopunun üretiminde öne çıkmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Alfa reaksiyonları, Tesir kesiti, Radyoizotop üretimi, TALYS 1.8

### ABSTRACT

Radioisotopes used in the field of health for treatment or diagnosis are generally produced by cyclotron or reactors. The reaction is produced by the radioisotopes, the energy of the projectile particles to be used in production, the target core and the cross-sections of the reaction are determined. In cases where experimenting is difficult and expensive, performing simulation studies first saves time and economy. Therefore, simulation study of obtaining <sup>57</sup>Co radioisotopes with reactions induced with alpha becomes important. Studies for the production of <sup>57</sup>Co radioisotopes with different reactions were carried out for the first time with Talys.

The <sup>57</sup>Co radioisotope is generally used in the Schilling test for vitamin B12 deficiency. Gastrointestinal vitamin B12 absorption assay is among the first tests offered by nuclear medicine laboratories.

In this study, the excitation functions of <sup>57</sup>Co radioisotope production reactions were investigated by <sup>55</sup>Mn( $\alpha,2n$ ), <sup>54</sup>Fe( $\alpha,p$ ), <sup>56</sup>Fe( $\alpha,2n+p$ ), <sup>59</sup>Co( $\alpha,2n+\alpha$ ), <sup>59</sup>Co( $\alpha,x$ ) and <sup>58</sup>Ni( $\alpha,p+\alpha$ ) reactions. The theoretical cross sections were calculated with TALYS 1.8 nuclear reaction code, and compared with experimental data obtained from EXFOR library. As a result of this study, there are three reactions whose cross sections are close to each other and are the highest. From these reactions, the energy of the bullet cores is less than the other two reactions, and the <sup>54</sup>Fe( $\alpha,p$ ) reaction stands out in the production of the <sup>57</sup>Co radioisotope.

**Keywords:** Alpha induced reaction, Cross section, Radioisotope production, TALYS 1.8

## 1. GİRİŞ

Radyoizotoplar için bilimsel araştırmalar ve pratik uygulamaların ilerlemesi 1920'den başlar ve 1930'ların başlarına kadar devam eder. İlk büyük ilerleme 1934 yılında meydana gelen siklotron icadı, Kaliforniya'daki Berkeley Üniversitesinde Lawrence tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile döteronları çok yüksek hızlara hızlandırmak mümkün olmuştur. Bu gelişme ile birlikte Lawrence

tarafından hızlı bir döteronun hedef elemente yönlendirilmesinin, bir radyoizotop oluşumu ile sonuçlanan reaksiyona neden olduğunu ve bu reaksiyonda 10 dakika yarı ömrü olan radyoizotop oluştuğunu gözlemlemiştir [1].

Nükleer fizik ve radyoizotop ile ilgili konularda gelişen teknoloji ile ilerlemelerin hızla devam ettiği günümüzde, insanlar farkında olarak ya da olmayarak radyoaktif bir ortamda yaşamaya devam etmekte ve doğal ya da yapay radyasyon etkisi altında kalmaktadır. Bu nedenle radyasyonun insan yaşamında önemli bir yeri vardır. Her şeyden önce enerji olan radyasyonu, tüm özelliklerini çok iyi bilerek ve doğru anlayarak hem yaşantımızın pek çok alanında hem yararımıza kullanabilmemiz hem de onun zararlarından korunmamız mümkündür. Özellikle, medikal teknolojisinin tıp sektörüne uygulanması ile birçok teşhis ve tedavi amaçlı yöntem geliştirilmiştir. Radyasyon uygulamaları tıp başta olmak üzere diğer pek çok alanda vazgeçilmez yöntemlerden olmuştur [1].

Radyoizotoplar; sağlık, endüstri ve güvenlik sistemlerinin uygulamalarının gelişmesinde önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Küresel olarak, radyoizotopların tıbbi kullanım sayısı ve alanı gün geçtikçe artmaktadır ve bu işlemler günümüzde bir gereklilik haline gelmiştir. Ayrıca çeşitli sektörlerde radyoizotoplara olan göreceli önem değişmektedir. Talys 1.8 kodu kullanılarak ( $\alpha,^*$ ) reaksiyonu ile özellikle nükleer tıp uygulamalarında önemli yer tutan  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun üretimi için yapılan teorik çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak, reaksiyon tesir kesitinin gözlemlenmesi ve veriler arası uyumun gösterilmesi amaçlanmıştır. Uyumun gözlenmesiyle, deneysel verileri olmayan ve yüksek maliyetler sebebi ile kontrol edilemeyen bölgelerde kullanılarak literatüre veri kazandırmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda  $^{57}\text{Co}$  izotopu üretimi için alfa gelişli reaksiyonlarda, hangi elementten daha verimli ve düşük enerji kullanılarak elde edilmesi, maliyeti düşük hale getirilebilmek için bunun analizini yapmaktır.

Çalışmada ( $\alpha,^*$ ) reaksiyonları ile değişik hedef çekirdekler kullanılarak elde edilen  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun deneysel olarak ilk çalışmayı 1960 yılında Tanaka,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  ve  $^{58}\text{Ni}$  izotoplarına alfa parçacığı göndererek reaksiyon oluşturmuştur [2-5]. Bu çalışmada kullanılan reaksiyonlardan,  $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)$  incelenmesi, 1961 yılında Houck ve Miller [6] ve 1964 yılında da Blann ve Merkel [7] tarafından yapılmıştır.  $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$  reaksiyonunun incelenmesi, 1977 yılında Homma ve Murakami [8] ile başlamış ve son olarak 1998’de Mukherjee vd. [9] tarafından yapılmıştır.  $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)$  reaksiyonunun incelenmesi, 1962’de Sterns [10], 1972’de Zhukova vd. [11] ve 2004’de ise Ansari vd. [12] tarafından yapılmıştır.  $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$  reaksiyonunun incelenmesi, 1960 yılında Tanaka vd. [4] ile başlamış ve son olarak 1991’de Levkovski [13] tarafından yapılmıştır.  $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)$  reaksiyonunun incelenmesi, 1960’da Tanaka vd. [5], 1962’de Iwata [14] ve 1965’de ise Ewart vd. [15] tarafından yapılmıştır.  $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$  reaksiyonunun incelenmesi ise 1960 yılında Tanaka vd. [3] ile başlamış ve son olarak 1994’de Sudar ve Qaim [16] tarafından yapılmıştır. Çalışmada, alfanın enerjisine göre  $^{57}\text{Co}$  izotopunu reaksiyon tesir kesiti incelenmiştir. Bu veriler, IAEA tarafından EXFOR [17] nükleer veri kütüphanesinde derlenmiş ve uluslararası olarak bilgisayarla işlenmektedir. Veri derleme ve işleme süreci henüz tamamlanmamış ve yapılan çalışmalar ışığında derlemeler devam etmektedir.

Bu çalışmada;  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun üretim reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları,  $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$ ,  $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$ ,  $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)$ ,  $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)$ ,  $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$ ,  $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)$  reaksiyonları ile incelendi. Talys 1.8 nükleer reaksiyon kodu kullanılarak yapılan hesaplamalar, Exfor kütüphanesinde mevcut olan deneysel veriler ile reaksiyon tesir kesitleri grafikleri çizilerek karşılaştırılmıştır. Nükleer reaksiyonların uyarılma fonksiyonunun dikkatli ve sistematik bir teorik çalışması olarak öngörülen modellerle çalışan Talys 1.8 kodu hesaplamaları deneysel veriler ile karşılaştırılarak,  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun  $\alpha$  ile uyarılmasından üretiminin incelenmesi yapıldı.

## 2. MATERYAL ve METOT

Bilgisayar kod sistemleri bağlamında nükleer reaksiyonlar değerlendirildiğinde, hedef çekirdek üzerine gelen bir parçacığın birden çok reaksiyona yol açması mümkündür. Bu durum, doğrudan ya da bileşik çekirdek reaksiyonları (süreçleri) gibi kompleks reaksiyon mekanizmaları tarafından açıklanmıştır.

Yüklü parçacıklarla oluşturulan uyarılma reaksiyonları; nükleer modellerin test edilmesi ve özellikle radyoizotopların siklotronlarla üretiminde, pratik uygulamalar için büyük öneme sahiptir. Özellikle çeşitli yüklü parçacıklar (protonlar, döteryum vb.) tarafından indüklenen ancak aynı ürün çekirdeklerine neden olan net reaksiyonlar üzerinde yapılan araştırmalar vardır. Bu şekilde nükleer yapı etkilerinin rolü azalır ve giriş nükleer model parametrelerinin etkisi araştırılır. Reaksiyon eşik değerlerine yakın olan çeşitli uyarma fonksiyonlarının bilgisi, küçük siklotronlardaki üretim işlemlerinin optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte asıl amaç; nükleer model ve tesir kesiti hesaplamalarının belirli enerji aralığında uygulanabilirliğini test etmektir.

Tesir kesiti, reaksiyon oluşumunun bağıl olasılığının bir ölçüsüdür. Demet doğrultusuna göre ( $\theta, \phi$ ) doğrultusunda yayınlanan  $b$  parçacığını kaydetmek için bir dedektör yerleştirirsek; dedektör, hedef çekirdekte küçük bir  $d\Omega$  katı açısı tanımlanmaktadır. Birim zamanda gelen parçacıkların akısı  $I_a$  olsun ve birim alandaki hedef çekirdek sayısı  $N$  ile gösterilir. Çıkan parçacık sayısı  $R_b$  ise, reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yolla tanımlanan  $\sigma$ , çekirdek başına alan boyutuna sahiptir, ancak gelen ışınlarda demetin gördüğü alan, hedef çekirdekleri kesitlerinin geometrik alanından daha büyük ya da daha küçük olabilmektedir. Reaksiyonlar için tesir kesiti milibarn veya mikrobarn olarak ölçülmektedir.  $\sigma$  alan boyutuna sahip, reaksiyon olasılığı ile orantılı bir niceliktir [18].

Bir nükleer çarpışmanın farklı son durumlarının her biri, kendine özgü meydana gelme olasılığına veya tesir kesitine sahiptir. Genellikle başlangıç kurallarından faydalanarak özel bir tesir kesiti hesaplamak zordur. Burada nükleer modellerden yararlanarak yaklaşık hesaplamalar yapılır. Klasik veya kuantum hesaplamalar makul bir sonuç vermektedir. Genel kuantum etkileri özellikle gelen parçacığın dalga boyunun nükleer boyuttan daha büyük olduğu düşük enerjilerde klasik düşünceyi değiştirir [19].

## 3. RADYOİZOTOPLAR

Radyoizotoplar, bir elementin, radyoaktif bozunmaya uğrayan kararsız izotoplarıdır. Radyum ve uranyum gibi doğal radyoaktif izotopu olan elementler doğada oldukça az bulunmaktadır. Bilimsel çalışmalarda ve sanayideki yararlarından ötürü birçok radyoizotop yapay olarak hazırlanmaktadır. Bunlar genellikle kararlı izotopların fotonlarla ya da bir hızlandırıcıda veya nükleer reaktörde elde edilen nötron gibi hızlandırılmış parçacıklarla bombardımanı yoluyla üretilir. Böylece yarılanma süreleri çok geniş bir dağılım gösteren çok sayıda radyoizotop elde edilebilmektedir. Küresel olarak, özellikle radyoizotopların tıbbi kullanımı sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Radyoizotopların yaydığı radyasyon, vücudun belli bir dokusundaki hastalığın giderilmesine, besinlerin sterilize edilmesi ve birçok alanda yararlanılmaktadır.

Radyoizotopların gelişimi ve kullanımının yaygınlaşması parçacık hızlandırıcılarının icadı ile başlamıştır. Parçacık hızlandırıcıları ve özellikle de siklotron 1935 yıllarında dünya savaşı sırasında keşfedilmiştir. Dünya savaşından sonra, hızlandırıcılar ve reaktörlerde radyoizotop üretmek için kullanılan atomların kullanımı yaygınlaşmıştır. Radyoizotoplar, nükleer reaktörlerde veya hızlandırıcılarda, yüklü parçacık uyarılması ile ( $p, d, {}^3He$  ve  $\alpha$  çekirdekleri) elde edilmektedir. Siklotron tipi hızlandırıcılarda  $p, d, t, \alpha$  gibi yüklü parçacıklar bir demet haline getirildikten sonra, taşıyıcı demet hattı vasıtasıyla bir hedef

malzeme üzerine gönderilir. Hedef malzeme atomları ile etkileşen hızlandırılmış iyonlar enerjilerini hedef atomuna aktarırlar. Böylece kararlı durumdaki hedef atomu çekirdekleri uyarılarak radyoizotoplar elde edilir. Bir hızlandırıcı ile radyonüklitlerin üretimi için gerekli şartlar, parçacıkların ve ışınların iki spesifik özelliği ile tespit edilmektedir. Nükleer reaksiyonlar meydana getirmek için yeterli demet akımı ve ürünün dışında ışınların olması gerekmektedir [20].

Tıpta kullanılan radyoizotopların bir kısmı üretim, taşıma ve depolama gibi bazı problemleri nedeniyle direkt üretimleri hızlandırıcılarda ya da reaktörlerde değildir, radyoizotop jeneratörleri ile üretilmektedir. Radyoizotop jeneratörleri az masraflı ve ana radyonüklit üretilerek sistem oluşturulmuştur. Bu sistemde oluşan kız nüklit birkaç defa kendini yenileyebilmektedir. Radyoizotop üretiminde kısa ömürlü radyoizotoplar için kullanılmaktadır. Radyoizotopların hangi yöntem ile üretileceği gönderilen parçacık ve hedef ürün belirlemektedir.

### 3.1. Talys Kodu

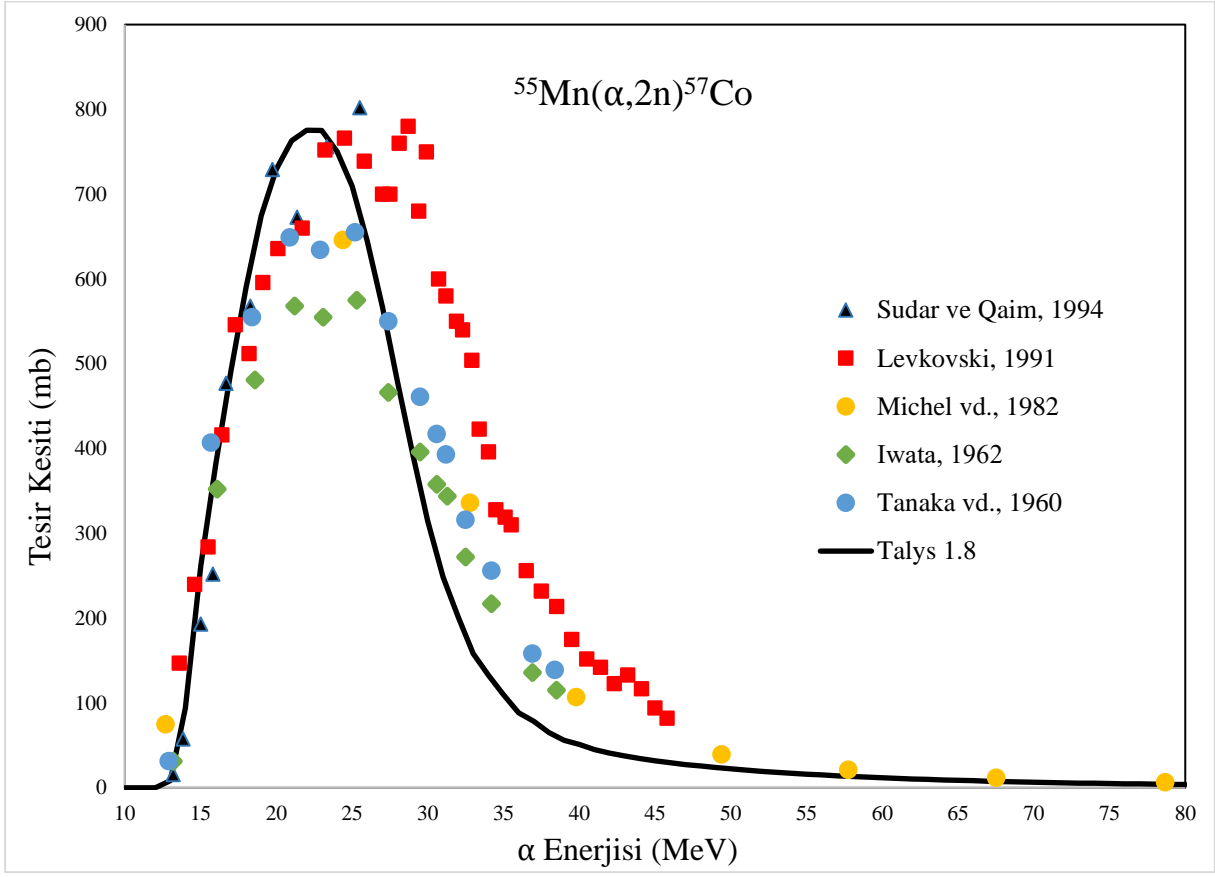
Talys [21], Linux işletim sisteminde çalışan ve fortran programlama diline sahip, nükleer reaksiyonların analizi ve tahmini için oluşturulmuş bir bilgisayar kod programıdır. Simülasyon reaksiyonlarda, nötron, proton, döteryum, trityum,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$  parçacıkları ve  $\gamma$  ışınları ile 1 keV–1 GeV enerji bölgesinde çalışılabilir. Hedef çekirdek kütleleri için 12 veya daha ağır kütleli olması şarttır. Çalışmada kullanılan Talys 1.8 sürümü ise  $5 < A \leq 339$  durumuna geliştirilmiştir. 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 [22].

## 4. TEORİK HESAPLAMALAR

$^{57}\text{Co}$  radyoizotopu B12 vitamini eksikliği için Schilling'in testinde kullanılmaktadır. Gastrointestinal B12 vitamini emilim tayini, nükleer tıp laboratuvarları tarafından kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı kütlelere sahip ( $25 \leq A \leq 28$ ) bazı çekirdeklerin  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopun elde edilmesi için ( $\alpha, *$ ) reaksiyon fonksiyonlarının tesir kesitleri incelemesi Talys programı ile yapıldı. Etkisinin gözlenmesi için  $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)$ ,  $^{54}\text{Fe}(\alpha, p)$ ,  $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)$ ,  $^{59}\text{Co}(\alpha, 2n+\alpha)$ ,  $^{59}\text{Co}(\alpha, x)$ ,  $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)$  seçilmiş reaksiyonların tesir kesitinin geniş bir enerji aralığında sistematik olarak incelemesi için uygun görüldü. Bu çalışmada deneysel verilerin çeşitliliği, teorik hesaplamaların mevcut olmaması, geniş bir enerji aralığında çalışmalara sahip olması, bu kütle ve enerji bölgesinin seçiminde önemli etkenlerdir. Bulgular literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak, reaksiyon tesir kesitinin gözlemlenmesi ve uyumun durumunun incelenmesi amaçlanmıştır.

### 4.1. $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)^{57}\text{Co}$ , Reaksiyonu

$^{55}\text{Mn}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 10-80 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan ( $\alpha, 2n$ ) reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.  $^{55}\text{Mn}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha,2n)$  reaksiyon tesir kesiti

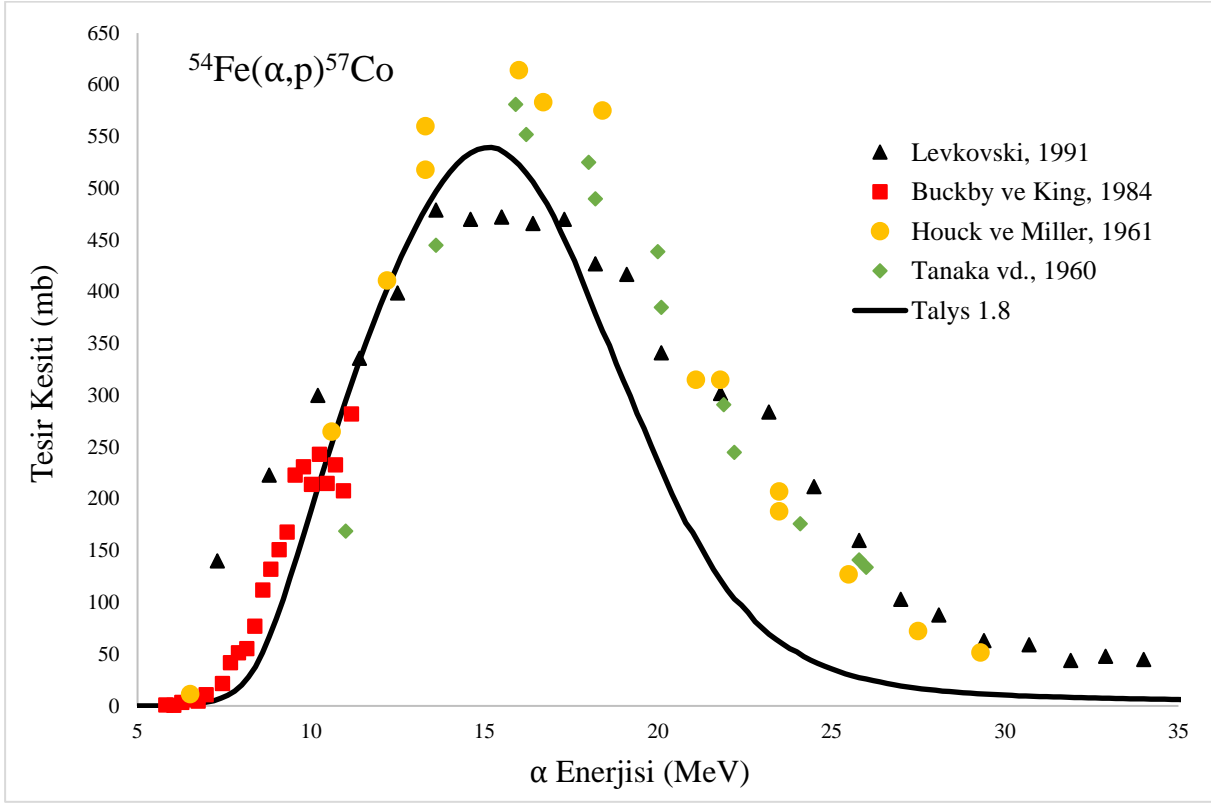
Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 13 MeV’de başladığı ve yaklaşık 24 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 20 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir [3,13,14,16,23]. Deneysel sonuçların reaksiyon tesir kesiti değerlerinin 25 MeV ile 30 MeV arasında maksimuma ulaştığı görülmektedir. Reaksiyon olasılığının maksimum olduğu noktadan sonrasında ise 60 MeV’e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum içindedir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler arasında uyumu biçim olarak yakalanmıştır.

#### 4.2. $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

$^{54}\text{Fe}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 4-36 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan  $(\alpha,p)$  reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Şekil 2’de gösterilmiştir.

Talys 1.8 ile elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 4,4 MeV’de başladığı ve yaklaşık 15,2 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, 5–18 MeV enerji bölgesinde rapor edilmiş deneysel verilerle neredeyse çakışık olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 12,5 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir [4,6,12,13]. Tesir kesitinin maksimum olduğu 15,2 MeV’e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum

içindedir. 16 MeV'den sonra uyumlu bir eğri özlenmesi rağmen tesir kesitlerinde bir kayma vardır. Teorik çalışma ile tarafından rapor edilmiş veriler arasında uyumu biçim olarak yakalanmıştır.

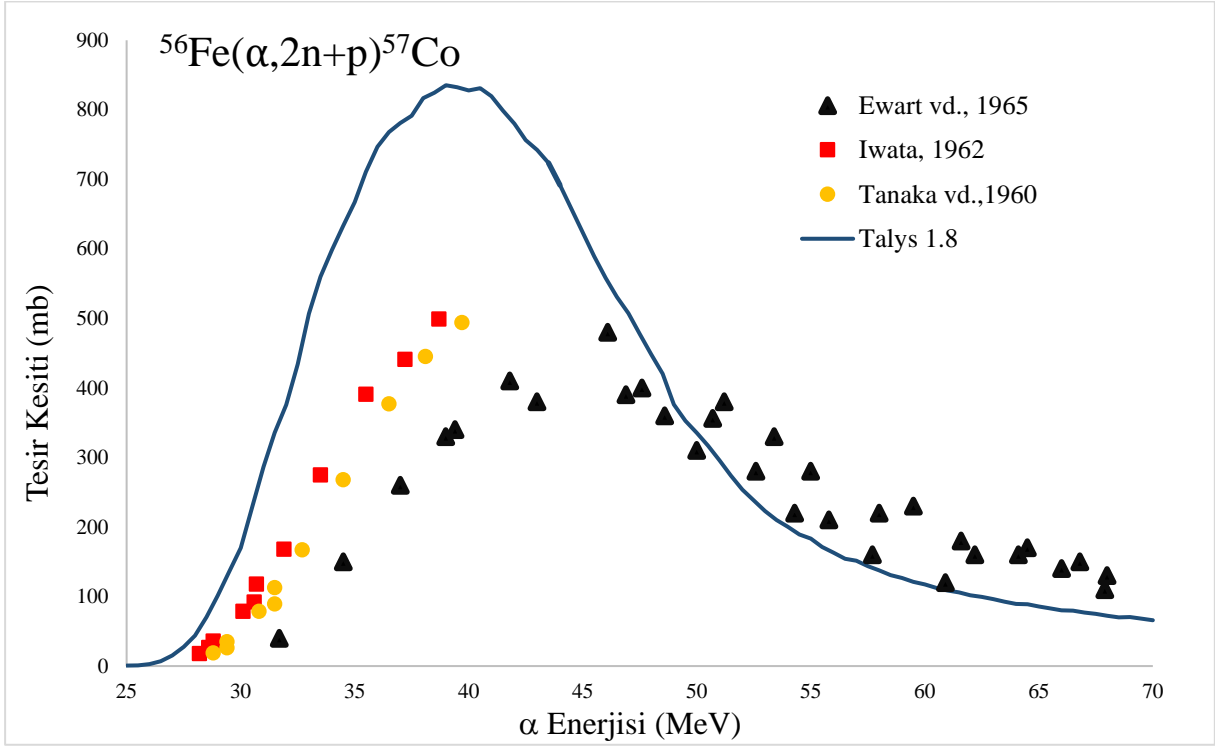


Şekil 2.  $^{54}\text{Fe}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha, p)$  reaksiyon tesir kesiti

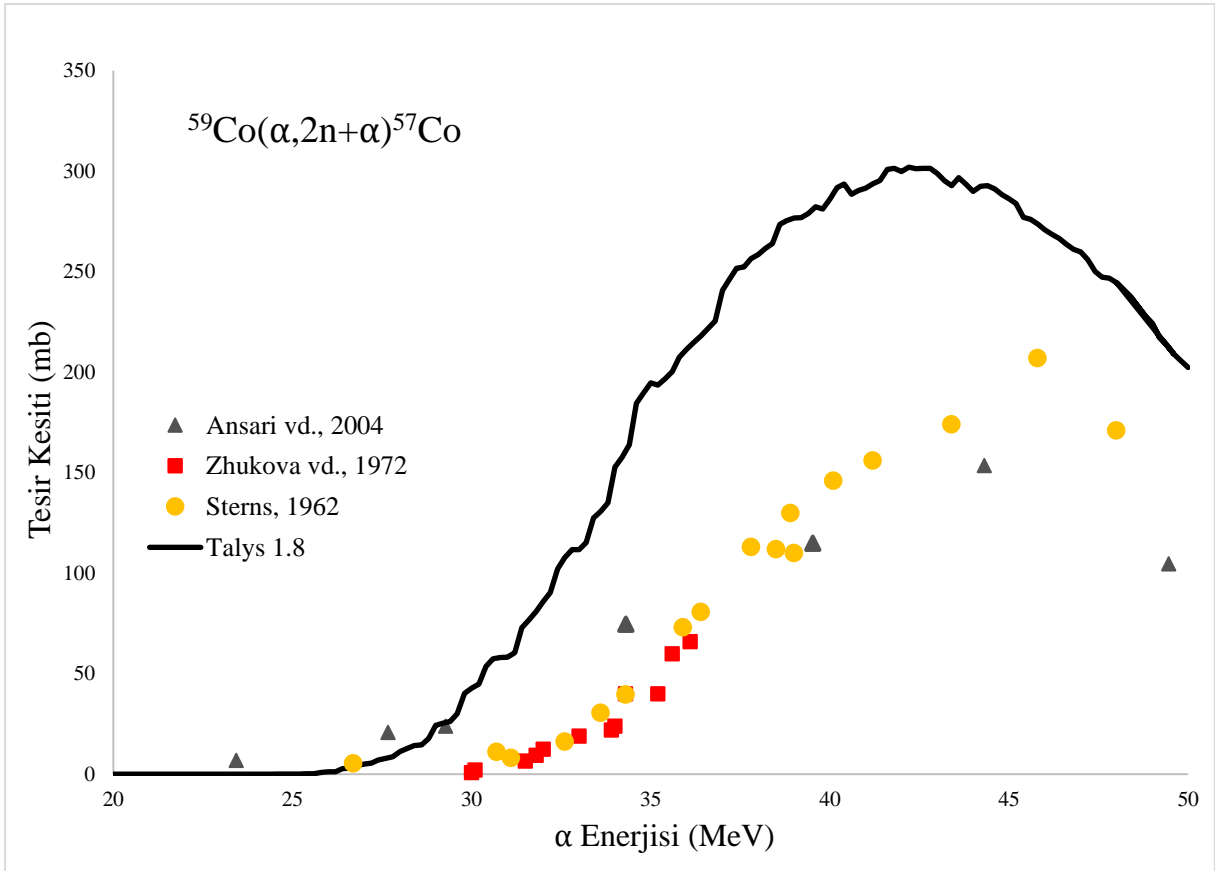
#### 4.3. $^{56}\text{Fe}(\alpha, 2n+p)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

$^{56}\text{Fe}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 25-70 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan  $(\alpha, 2n+p)$  reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Şekil 3'de gösterilmiştir.

Talys 1.8 ile elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 17 MeV'de başladığı ve yaklaşık 40 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının deneysel verilerle 45 MeV kadar biçim olarak uyumlu olduğu görülmüştür [5,14,15]. Reaksiyon olasılığı 45 MeV'den sonrasında ise 70 MeV'e kadar olan enerji aralığında teorik hesaplamalardan ve deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklerin eğilimi uyum içindedir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler arasında biçim olarak uyum vardır.



Şekil 1.  $^{56}\text{Fe}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha,2n+p)$  reaksiyon tesir kesiti



Şekil 4.  $^{59}\text{Co}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha,2n+\alpha)$  reaksiyon tesir kesiti

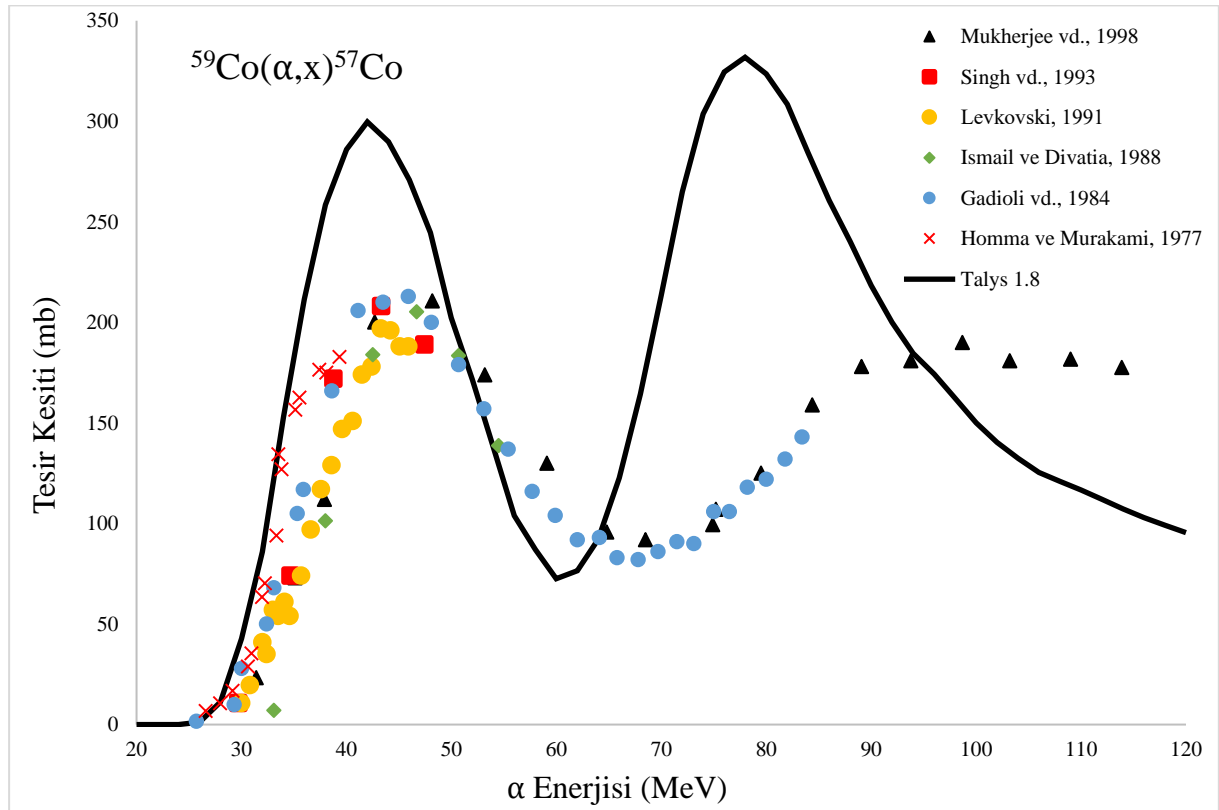
#### 4.4. $^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

$^{59}\text{Co}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 20-50 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan  $(\alpha,2n+\alpha)$  reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Şekil 4’de gösterilmiştir.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 26 MeV’de başladığı ve yaklaşık 42,6 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 33,52 MeV’e kadar hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının deneysel sonuçlar ile şekil açısında uyum içinde olduğu görülmektedir. Rapor edilmiş deneysel verilerin reaksiyon olasılığı maksimum olduğu enerji 46 MeV’dir. Deneysel veriler [10-12] ile Talys 1.8 biçim olarak uyumlu bir eğri ortaya koyduğu Şekil 4’de görülmektedir.

#### 4.5. $^{59}\text{Co}(\alpha,x)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

$^{59}\text{Co}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 20-180 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan  $(\alpha,x)$  reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.  $^{59}\text{Co}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha,x)$  reaksiyon tesir kesiti

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 25 MeV’de başladığı ve yaklaşık 42 MeV ve 78 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren yaklaşık 35,52 MeV’e kadar hesaplama sonucunda

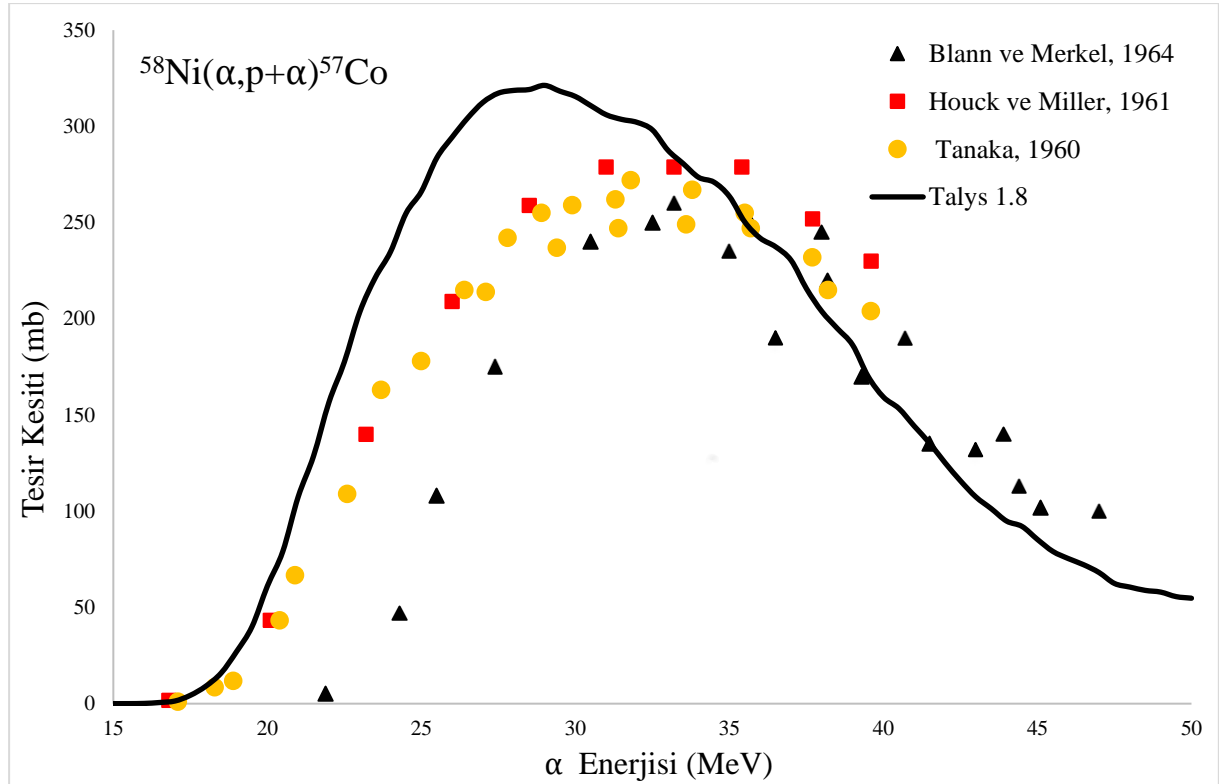


elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının Homma ve Murakami [8] tarafından rapor edilmiş bulunan deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçları, 20 – 35,5 MeV ve 50 – 54 MeV enerji bölgelerinde deneysel veriler [8,9,13,24-26] ile neredeyse çakışık olduğu gözlemlenmiştir. 60 MeV enerji değerine kadar biçim olarak uyumlu bir eğri ortaya koyduğu Şekil 5’de görülmektedir. 60 MeV’den sonra uyum gözlenememiştir.

#### 4.6. $^{58}\text{Ni}(\alpha, p+\alpha)^{57}\text{Co}$ Reaksiyonu

$^{58}\text{Ni}$  hedef çekirdeğine alfa parçacığı yollanarak, 15 – 50 MeV enerji bölgesinde Talys 1.8 kodu kullanılarak hesaplanan  $(\alpha, p+\alpha)$  reaksiyonu tesir kesitinin, EXFOR deneysel nükleer reaksiyon veri kütüphanesinden alınan deneysel reaksiyon tesir kesiti verileri ile karşılaştırılması Şekil 6’da gösterilmiştir.

Talys 1.8 çalışmasında elde edilen teorik sonuçlar incelendiğinde, reaksiyonun 17 MeV’de başladığı ve yaklaşık 29 MeV civarında reaksiyon olasılığının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Reaksiyonun başladığı enerji değerinden itibaren hesaplama sonucunda elde edilen reaksiyon tesir kesiti sonuçlarının deneysel sonuçlar [2, 6, 7] ile biçim olarak uyum içinde olduğu Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6.  $^{58}\text{Ni}$  hedef çekirdeği için  $(\alpha, p+\alpha)$  reaksiyon tesir kesiti

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Alfa ile uyarılmış fonksiyonların, Talys1.8 kodu periyodik cetvelin VII-B ve VIII-B grubunda bulunan hafif çekirdeklerle  $(\alpha, 2n)$ ,  $(\alpha, p)$ ,  $(\alpha, 2n+p)$ ,  $(\alpha, 2n+\alpha)$ ,  $(\alpha, x)$  ve  $(\alpha, p+\alpha)$  reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar IAEA’na ait veri tabanları EXFOR kütüphanesinden alınmış deneysel ve hesaplanmış sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan reaksiyonların tesir kesitleri incelendiğinde (Tablo 1) en yüksek tesir kesitine  $^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)$  reaksiyonunda ulaşıldığı ama bu tesir kesiti için gerekli enerjinin 40,5 MeV gibi yüksek bir enerji olduğu görülmektedir. Bu tesir kesitinden sonraki ikinci en yüksek değere ise  $^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)$  reaksiyonunda 25 MeV enerjili alfa parçacıkları ile ulaşılabilmektedir. Bu tesir kesitine yakın olan  $^{54}\text{Fe}(\alpha,p)^{57}\text{Co}$  reaksiyonunda maksimum tesir kesitine 15,2 MeV enerjili alfalar ile ulaşılabilmesi bu reaksiyonun  $^{57}\text{Co}$  radyoizotopunun üretiminde öne çıkmasını sağlamaktadır.

**Tablo 1.** Kullanılan reaksiyonların Talys 1.8 programındaki tesir kesiti analizi

Reaksiyon	Maksimum tesir kesitinde gönderilen parçacığın enerjisi (MeV)		Tesir kesitinin maksimum değeri (mb)	
$^{55}\text{Mn}(\alpha,2n)^{57}\text{Co}$	25		709,441	
$^{54}\text{Fe}(\alpha,p)^{57}\text{Co}$	15.2		539,511	
$^{56}\text{Fe}(\alpha,2n+p)^{57}\text{Co}$	40,5		830,989	
$^{59}\text{Co}(\alpha,2n+\alpha)^{57}\text{Co}$	42,2		301,969	
$^{59}\text{Co}(\alpha,x)^{57}\text{Co}$	42	78	299,729	331,820
$^{58}\text{Ni}(\alpha,p+\alpha)^{57}\text{Co}$	29		321,295	

## KAYNAKLAR

- [1] Williams WSC. Nuclear and Particle Physics. (Çev: Dumanoğlu İ, Ertürk S), Nobel Yayıncılık, 1. Baskı, Ankara, 2014.
- [2] Tanaka S. reactions of nickel with alpha-particles. Journal of the Physical Society of Japan 1960, 15, 2159-2167.
- [3] Tanaka S, Furukawa M, Mikumo T, Iwata S, Yagi M, Amano H. Excitation functions for alpha-induced reactions on manganese-55. Journal of the Physical Society of Japan 1960, 15, 545-550.
- [4] Tanaka S, Furukawa M, Iwata S, Yagi M, Amano H, Mikumo T. Reactions of iron-54 with alpha particles, Journal of the Physical Society of Japan 1960, 15, 1547-1551.
- [5] Tanaka S, Furukawa M, Iwata S, Yagi M, Amano H, Mikumo T. Excitation functions for alpha-particle reaction on  $\text{Fe}^{56}$  and  $\text{Fe}^{57}$ . Journal of the Physical Society of Japan 1960, 15, 2125-2128.
- [6] Houck FS, Miller JM. Reactions of alpha particles with iron-54 and nickel-58. Physical Review Journals Archive 1961, 123, 231-234.
- [7] Blann M, Merkel G. Evidence of nuclear shell effects in  $\text{Ni}^{58}$  reactions induced with 0-48 MeV alpha particles. Nuclear Physics 1964, 52, 673-691.
- [8] Homma Y, Murakami Y. Production of  $^{61}\text{Cu}$  by alpha and  $^3\text{He}$  bombardment on cobalt target. Bulletin of the Chemical Society of Japan 1976, 50, 397-400.
- [9] Mukherjee S, Sharma AK, Bakhru D, Singh NL, Kolev D. Pre-equilibrium alpha and nucleon emission in  $^{59}\text{Co}(\alpha,\alpha\gamma p\alpha n)$  reactions. Physica Scripta 1998, 58, 319-325.
- [10] Sterns CM. Columbia University Report series, 34, 63, 1962.
- [11] Zhukova OA, Kanashevich VI, Laptsev SV, Chursin GP. Nuclear reactions produced by  $\alpha$  particles on  $\text{Co}^{59}$  nuclei. Yadernaya Fizika 1972, 16, 242-246.
- [12] Ansari MA, Abd Alslam MA, Sathik NP, Ismail M, Rashid MH. Excitation functions of  $\alpha$ -

- induced reactions in cobalt and pre-equilibrium effects. International Journal of Modern Physics E 2004, 13, 585-595.
- [13] Levkovski VN. Cross sections of medium mass nuclide activation ( $A=40-100$ ) by medium energy protons and alpha-particles ( $E=10-50$  MeV), Protons and Alphas 1991, 69, 99-102.
- [14] Iwata SJ. Isomeric cross section ratios in alpha-particle reactions, Journal of the Physical Society of Japan 1962, 17, 1323-1333.
- [15] Ewart A, Valentine C, Blann M. excitation functions and mean recoil ranges resulting from the bombardment of  $^{56}\text{Fe}$  with 18-68 MeV  $^4\text{He}$  ions. Nuclear Physics A 1965, 69, 625-636.
- [16] Sudar S, Qaim SM. Excitation functions of proton and deuteron induced reactions on iron and alpha-particle induced reactions on manganese in the energy region up to 25 MeV, Physical Review 1994, 50, 2408-2419.
- [17] Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [18] Krane KS. Introductory Nuclear Physics. Nükleer Fizik 1. ve 2. Cilt. (Çev: Şarer B), Palme Yayıncılık, 3. Baskı, Ankara, 2002.
- [19] Lilley J. Nuclear Physics Principles and Applications. (Çev: Aydın A, Sarpün İH, Tel E, Kaplan A), Nobel Yayıncılık, 1. Baskı, Ankara, 2018.
- [20] Das A, Ferbel T. Introduction to Nuclear and Particle Physics. Word Scientific Imprint, 2. Edition. USA, 2003.
- [21] Koning AJ, Hilaire S, Duijvestijn MC. TALYS 1.8 A nuclear reaction program. NRG – Nuclear Research and Consultancy Group, Netherlands, 2015.
- [22] Koning AJ, Duijvestijn MC, van der Marck SC, Meulekamp RK, Hogenbirk A. New nuclear data libraries for lead and bismuth and their impact on accelerator-driven systems design. Nuclear Science and Engineering 2007, 156, 357-390.
- [23] Michel R, Brinkmann G, Stück R. measurement and hybrid model analysis of integral excitation functions for alpha-particle reactions on vanadium and manganese. Nuclear Data for Science and Technology 1982, 47, 599-602.
- [24] Singh NL, Agarwal S, Rama Rao J. Excitation Function for  $\alpha$ -particle-induced reactions in light-mass nuclei. Canadian Journal of Physics 1993, 7, 115-121.
- [25] Ismail M, Divatia AS. Measurement and analysis of alpha-induced reactions on Ta, Ag and Co. Pramana - Journal of Physics 1988, 30, 193-210.
- [26] Gadioli E, Gadioli Erba E, Asher J, Parker DJ. Analysis of  $^{59}\text{Co}(\alpha,x)$  reactions up to 170 MeV incident  $\alpha$  energy. Zeitschrift fuer Physik A Hadrons and Nuclei 1984, 317, 155-168.