

## **<sup>208</sup>Pb(1 GeV)+p REAKSİYONUNDA ÜRETİLEN ATIK ÇEKİRDEKLERİN İZOTOPIK ÜRETİM TESİR KESİTLERİ**

İskender DEMİRKOL, Eyüp TEL, Atilla ÖZMEN

Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara

### **ÖZET**

1 GeV enerjili <sup>208</sup>Pb mermi çekirdek (projectile) ile p (Hidrojen) reaksiyonunda oluşan atık çekirdek üretiminde çeşitli elementlerin izotoplarının üretim tesir kesitleri hesaplandı ve literatürden alınan deneysel değerler ile karşılaştırıldı. Yapılan teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Hızlandırıcı güdümlü enerji yükselteci sisteminin tasarımı parçalanma (spallation) hedefi içinde atıkların üretim tesir kesitlerinin net bir şekilde bilinmesini gerektirir. Özellikle de uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitlerinden hedefin uzun süreli radyoaktif zehirlenme problemi seviyesini tahmin etmek mümkündür. Gönderilen mermi çekirdeğe (projectile) daha yakın ağır elementlerin nötronca zengin olan izotoplarını üretmek için <sup>208</sup>Pb(1 GeV)+p reaksiyonu iyi bir seçimdir. Hesaplanan üretim tesir kesiti hızlandırıcı güdümlü kritik altı reaktörlerin tasarımı için uygundur.

**Anahtar kelimeler:** Nükleer Reaksiyon, Tesir Kesiti, Atık Çekirdek, Parçalanma.

### **ISOTOPIC PRODUCTION CROSS SECTIONS OF RESIDUALS PRODUCED IN <sup>208</sup>Pb(1GEV)+P REACTIONS**

#### **ABSTRACT**

The production cross sections of residue nuclei have been calculated at <sup>208</sup>Pb(1 GeV)+p reaction for various isotopes of elements and compared with literature values. The accordance of the calculated results with the experimental data has been examined. The design of system accelerator driven energy amplifier requires an

accurate calculation of the production cross sections of residues in the spallation target. Particularly, it is possible to estimate long-live radioactivity problem levels of the target from production cross sections of long-live isotopes. The <sup>208</sup>Pb(1 GeV)+p reaction is a good candidate to produce neutron-rich isotopes of heavy elements closer to the projectile. The calculated production cross sections are relevant for design of accelerator driven subcritical reactors.

**Key words:** Nuclear Reaction, Cross Section, Residue Nucleus, Spallation.

## 1. GİRİŞ

1990'lı yıllarda Nobel ödülü sahibi Prf. Dr. C. Rubbia'nın önderliğinde bir fizikçi grubu yoğun akıllı bir proton hızlandırıcısına dayalı Toryum yakıtlı yeni bir nükleer reaktör tipi önerdiler [1,2]. Yeni reaktörün yapısı geleneksel Uranyum yakıtlı reaktörlerden oldukça farklıdır ve en önemli özelliği nükleer sürecin tam kontrollü olmasıdır. Yani hızlandırıcıdan gelen proton demetinin kesilmesi ile reaksiyon çok kısa (ns mertebesinde) bir sürede duracaktır ve bu sayede nükleer kaza riski ortadan kalkacaktır. Bu reaktörlerdeki amaç yüksek termodinamik verimle (%40-44) toryum yakıttan enerji üretmek ve mevcut radyoaktif atıkları kısa ömürlü radyonüklitlere dönüştürerek yakmaktır. Bu reaktör tipinin diğer önemli bir özelliği de nükleer atıkların geleneksel reaktörlere göre çok daha az olmasıdır.

Enerji Yükseltici (Energy Amplifier-EA) geleneksel nükleer reaktörlerdeki olası kritiklik kazası riskinin ( $k_{eff} > 1$ ), yani nötron çoğaltma katsayısı  $k_{eff} = 0.96-0.98$  aralığında kritikaltı durumda çalışan bir reaktör sistemiyle, yüksek proton akımlı (>10 mA) ve yüksek enerjili (0.5-1.5 GeV) bir hızlandırıcı kompleksinin birlikte çalıştırılması için planlanan yeni nesil reaktörlerdir. Orta enerjili protonlarla atık çekirdek üretiminin güvenilir tesir kesitleri ve spallation hedef radyoaktif ürünlerin hesaplanması enerji yükseltici açısından önemlidir [3,4].

Spallation reaksiyonu hızlandırıcı güdümlü enerji yükseltici sistemde kritikaltı reaktörü besleyen nötron kaynağını oluşturur. Ancak bu reaksiyon mekanizması hakkındaki mevcut bilgi herhangi bir teknik uygulama için yeterince kesin değildir. Nötron verimi ve reaksiyonda üretilen atık çekirdeğin belirlenmesi enerji yükselticinde kullanılan spallation nötron kaynağı hedefinin oluşumu ve tasarımında önemli büyük bir rol oynayacaktır

[5,6,7]. Pb-Bi teknolojileri yüksek enerjili ışınların etkisi altında çalışırlar ki bu durum enerji yükseltici sistemin karakteristiğidir. Bundan dolayı kurşun ve bizmutun nükleonik karakteristiklerinin extra çalışma gerekliliği ortaya çıkar, bu çalışmaların sonucu enerji yükselticinin tasarımında son derece önemlidir [8,9], çünkü spallation reaksiyonu sonucu oluşan atık çekirdeklerin çoğunluğu radyoaktiftirler. Bundan dolayı hedefin tasarımında aktivasyon (radyoaktif) problemleri göz önüne alınmalıdır. Ayrıca atık çekirdek hedef içinde, hızlandırıcı penceresinde ve yapısal materyalde radyasyon zararına ve aşınmaya katkıda bulunur [10].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Reaksiyon Tesir Kesiti Hesaplama Tekniği

Hedefe çarpan ( $A_t, Z_t$ ) bir mermi çekirdekten (projectile) ( $A_p, Z_p$ ) oluşan çekirdek parçalanması ile üretilen A kütleli ve Z atom numaralı bir çekirdeğin (fragment) tesir kesiti için Silberberg'in yarı ampirik formülü aşağıda yazılmıştır [11].

$$\sigma(A, Z) = Y_A \sigma(Z_{prop.} - Z) = Y_A n \exp\left(-R|Z_{prob} - Z|^U\right) \quad (1)$$

Buradaki ilk terim  $Y_A$ ; kütle verimini gösterir, ikinci terim exp; yük dağılımını gösterir. Yük dağılımının şekli R yarıçap ve üs U ile belirlenir. n faktörü;  $n = \sqrt{\frac{R}{\pi}}$  yük dağılımını normalize etmek için kullanılır.

$$Y_A = SP \exp[-P(A_p - A)] \quad (2)$$

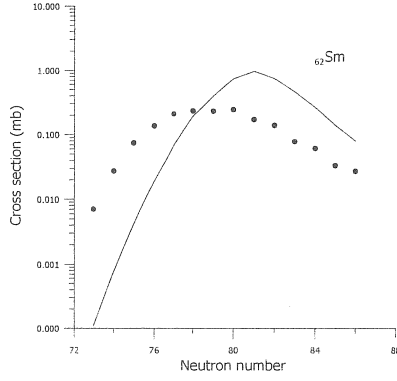
$$S = S_2 \left( A_p^{\frac{1}{3}} + A_t^{\frac{1}{3}} + S_1 \right) \quad (3)$$

$$\ln P = P_2 A_p + P_1$$

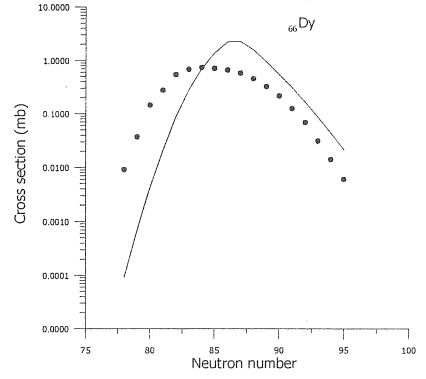
Kütle verim eğrisi ( $A_p - A$ )'nın bir eksponansiyel fonksiyonu olarak alınmıştır. Bu eksponansiyelin eğimi P mermi (projectile) kütesinin fonksiyonudur. S faktörü parçalanma (fragmentation) reaksiyonun yapısını hesaba katar ve bundan dolayı da çarpışan çekirdeğin çevresine bağlıdır.

### 3. BULGULAR

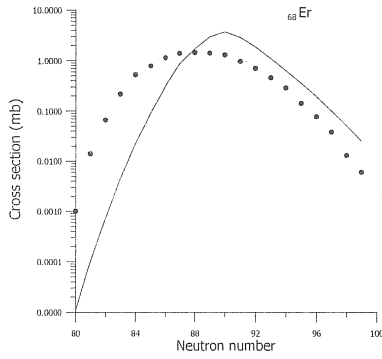
Silberberg'in yarı ampirik formülü ile yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Şekil-1-11'de literatürden alınan deneysel veriler ile kıyaslanmıştır [12].



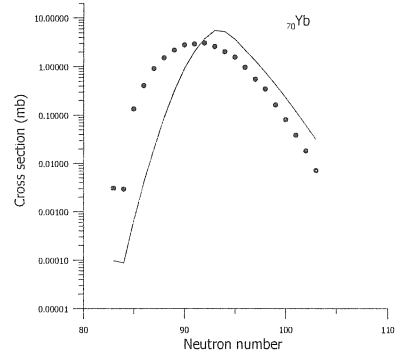
Şekil 1. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Sm ile Karşılaştırılması.



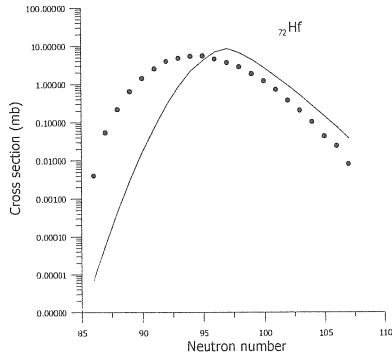
Şekil 2. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Dy ile Karşılaştırılması.



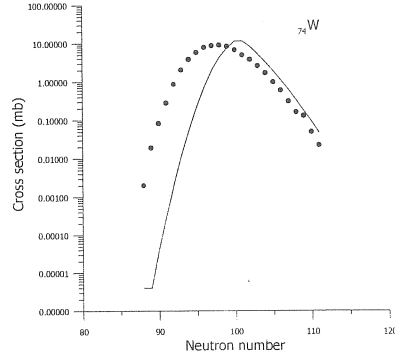
Şekil 3. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Er ile Karşılaştırılması.



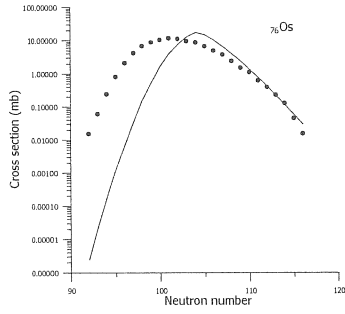
Şekil 4. Şekil.1'deki gibi aynı fakat Er için hesaplama yapılmıştır. Yb için hesaplama yapılmıştır.



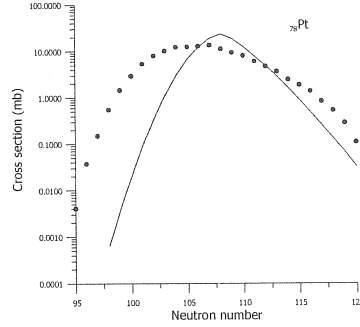
Şekil 5. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Hf ile Karşılaştırılması.



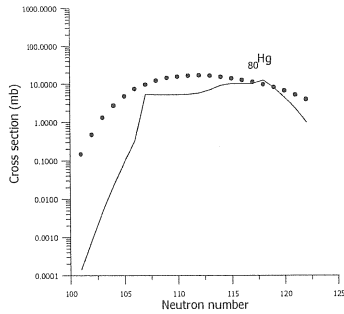
Şekil 6. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) W ile Karşılaştırılması.



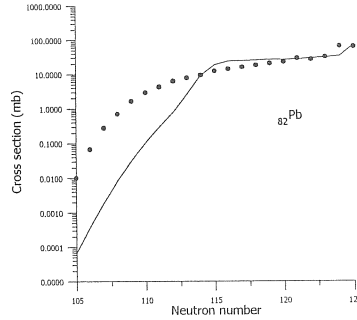
Şekil 7. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Os ile Karşılaştırılması.



Şekil 8. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Pt ile Karşılaştırılması..



Şekil 9. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Hg ile Karşılaştırılması.



Şekil 10. Silberberg Hesaplanması (—) ile Deneysel Sonuçların (...) Pb ile Karşılaştırılması.

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Şekil 1-10 proton (hidrojen) hedefi üzerine gönderilen 1 GeV enerjili  $^{208}\text{Pb}$  mermi çekirdeğin (projectile) reaksiyonu sonucu oluşan çeşitli atık çekirdek oluşum tesir kesitlerini göstermektedir.  $\text{Pb}(1\text{ A GeV}) + \text{p}$  reaksiyonunda izotop üretimine en önemli katkı kurşun elementinin hemen altındaki en ağır elementlerden gelmektedir. En hafif elementlerden gelen katkı ise daha az olmaktadır.

Şekil-1'de  $_{62}\text{Sm}$ 'in maksimum izotopik üretim tesir kesiti 1.0 mb ve Şekil-7'de  $_{76}\text{Os}$ 'un 150 mb civarında iken Şekil-10'da  $_{82}\text{Pb}$ 'nin maksimum izotopik üretim tesir kesiti 200 mb civarındadır. Nötron sayısına göre hedef elemente daha yakın olan izotopların üretim tesir kesitlerinin çok daha büyük oldukları görülmektedir. Kurşuna göre daha hafif element olan  $_{62}\text{Sm}$ ,  $_{66}\text{Dy}$ ,  $_{68}\text{Er}$ ,  $_{70}\text{Yb}$ ,  $_{72}\text{Hf}$ ,  $_{74}\text{W}$  ve  $_{76}\text{Os}$ 'un izotopik üretim tesir kesitlerinin nötron sayısına göre çizimi Gauss dağılımı gösterirken mermi (projectile) elementin değerine doğru yaklaştıkça bu dağılımın kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek nötron sayılı izotopların hesaplanan üretim tesir kesitleri deneysel veriler ile daha iyi uyum sağlamaktadır.

Şekil-11 kütle numarası  $A=185$  olan elementlerin atom numarası  $Z'$  ye göre üretim tesir kesitlerinin deneysel ile hesaplanan sonuçların kıyasını göstermektedir. En büyük izotopik üretim tesir kesitinin  $_{78}\text{Pt}$  element için elde edildiği görülmektedir. Yapılan hesaplama ile deneysel değerler kıyaslandığında yüksek nötronlu izotopların üretim tesir kesitlerinin deney ile daha iyi uyum içinde olduğu görülmektedir. Mermi çekirdeğe yakın daha ağır elementlerin nötronca zengin olan izotoplarını üretmek için bu  $^{208}\text{Pb}(1\text{A GeV}) + \text{p}$  reaksiyonu iyi bir seçim olabilir.

Hızlandırıcı güdümlü enerji yükseltici sistem tasarımı spallation hedef içinde atıkların üretim tesir kesitlerinin net bir şekilde bilinmesini gerektirdiğinden dolayı yapmış olduğumuz çalışmanın sonuçları bu açıdan önemlidir. Bu çalışmanın sonuçları enerji yükseltici tasarımında değerlendirilebilir. Çünkü hedef materyalde radyasyon zararının çoğu yüksek üretim tesir kesitli spallation atıklardan kaynaklanmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Rubbia C., Rubio J. A., "A Tentative Programme Towards a full Scale Energy Amplifier", Geneva (1996).
2. Rubbia C., et al., "Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier", EONC, CERN/AT/ 95-44, (1995).
3. Aleksandrov Yu.V., et al., "Production Cross Section for Radioactive Nuclides in Lead Target Bombarded by 660 MeV Protons", C, 96 MOSCOW, 221, (1996).
4. Peter J., et al., "Proton Induced Spallation Reactions", Radiat. Phys. Chem. 43:(1/2), 139-149, (1994).
5. Demirkol İ., Tel E., Özmen A., Şarer B., "The Neutron Production by the Reaction of Protons at 30-100 MeV with Different Isotopes of <sup>206,207,208</sup>Pb Thin Target", Balkan Physics Letters, 10:(2), 108-115, (2002).
6. Reinhold J., et al., Phys. Rev. C, 58, 247, (1998).
7. Benlliure J., "New Data and Monte Carlo Simulations on Spallation Reactions Relevant for the Design of ADS", <http://www.nea.fr/html/pt/docs/iem/madrid00/Proceedings/Paper.52> (2001).
8. Titerenko Yuriy Efimovich, "Experimental and Theoretical Studies of the Yields of Residual Product Nuclei Produced in Thin Pb and Bi Targets Irradiated by 40-2600 MeV Protons", <http://www.tech-db.ru/istc/db/projects.nsf/prjn>, (2002).
9. Ridikas D., and Mittig W., Nucl. Inst. And Methods A, 41, 449 (1998).
10. Sümmerer K., et al., "Target fragmentation of Au and Th by 2.6 GeV protons", Physical Rev. C, 42, 6, (1990).
11. Sümmerer K., Blank B., "Modified Empirical Parametrization of Fragmentation Cross Sections", Physical Review. C, 61,034607, (2000).
12. Enqvist T., et al., "Isotopic Yields and Kinetic Energies of Primary Residues in 1 A GeV <sup>208</sup>Pb+p Reactions", Nuclear Physics A, 686, 481-524, (2001).

