TÜBİTAK

^{143}Pm ve ^{144}Pm İzotoplarının Duyarlı Yarı-Ömür Ölçümleri

Program Kodu: 3001

Proje No: 114F487

Proje Yürütücüsü:
Dr. Caner YALÇIN

Araştırmacı(lar):
Doç. Dr. Recep Taygun GÜRAY
Prof. Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY

Bursiyer(ler):
İbrahim ÖKSÜZ

MAYIS 2017
KOCAELİ

ÖNSÖZ

İzotopların nükleer özelliklerinin doğru olarak bilinmesi, hem deneysel hem de teorik nükleer fizik çalışmaları için olmazsa olmazdır. İzotopun yarı-ömrü de bunlardan bir tanesidir. Özellikle nükleer fiziğin sanayi ve tıp alanındaki uygulamalarında izotoplarının yarı-ömür bilgisi çok önemlidir. Ancak pratik uygulamalar dışında da tesir kesiti gibi diğer nükleer parametrelerin ölçülebilmesi için de bilinmeleri gerekir. Aktivasyon yöntemi tesir kesiti ölçümleri için yarı-ömrün mutlaka duyarlı olarak bilinmesi gereklidir. Son yıllarda Element Sentezi Teorisinin eksik parçalarının tamamlanabilmesi için gerekli olan Tesir Kesiti ölçümleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Nükleer Astrofizik ve Teorik Nükleer Fizik açısından önem arz eden $^{141}Pr(\alpha,n)^{144}Pm$, $^{142}Nd(p,\gamma)^{143}Pm$ ve $^{143}Nd(p,\gamma)^{144}Pm$ reaksiyonlarının tesir kesitlerinin aktivasyon yöntemi ile ölçülebilmeleri için ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürlerinin duyarlı olarak ölçülmesi gereklidir.

TÜBİTAK tarafından **114F487** proje numarası ile desteklenenen bu projede ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı ömürleri, Macar Bilimler Akademisi Nükleer Araştırma Enstitüsünün (ATOMKI) desteği ile Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında duyarlı bir şekilde ölçülmüştür.

İÇİNDEKİLER

1. Giriş 1

2. Literatür Özeti 4

3. Yöntem 7

3.1. Neodmiyum Hedeflerin Üretilmesi 7

3.2. Hedeflerin Hızlandırıcıda Işınlanması (Aktivasyon) 10

3.3. Hedeflerin HPGe Dedektörler ile Sayılması 10

4. Bulgular 14

5. Tartışma ve Sonuç 16

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İzotop tablosunda s-, r- ve p-prosesin üretilmesinde sorumlu olduğu izotop bölgeleri.
Şekil 2. Aktivasyon ve bozunma süreci
Şekil 3. İzotop tablosunun ilgili bölgesindeki izotopların temel durumları için önerilen yarı-ömür değerlerinin belirsizlikleri.
Şekil 4. 143Pm izotopu için literatürdeki ölçüm değerleri ve belirsizlikleri.
Şekil 5. 144Pm izotopu için literatürdeki ölçüm değerleri ve belirsizlikleri
Şekil 6. Hedef hazırlamada kullanılacak Leybold Univex 350 kaplama cihazı ve örnek tutucu ve karbon pota yerleşimi.
Şekil 7. Üretilen Neodmiyum hedeflerden bir tanesi.
Şekil 8. Hazırlanan hedeflerden birisinin PIXE spektrumu.
Şekil 9. (a). Aktivasyonun gerçekleştirildiği demet hattı ve (b) reaksiyon odasının şematik çizimi.
Şekil 10. ATOMKI ultra düşük art alan (ULB) Dedektörü.
Şekil 11. ATOMKI Offset Dedektörü
Şekil 12. Kocaeli Nükleer Araştırma laboratuvarı düşük artalan dedektörü.
Şekil 13. Proton demetiyle 7,5 MeV enerjide ışınlanmış doğal Neodimyum hedefin 6 saat süreyle sayılmasıyla elde edilen spektrum.
Şekil 14. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 742 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.
Şekil 15. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 476 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.
Şekil 16. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 618 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.
Şekil 17. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 696 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.
Şekil 18. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.
Şekil 19. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.
Şekil 20. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.

Şekil 21. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 144Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.
Şekil 22. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 144Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.
Şekil 23. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 144Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.
Şekil 24. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 144Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.
Şekil 25. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 144Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Neodimyum iztoplarının doğal bollukları.
Tablo 2. Dedektör sistemlerinin özellikleri ve ölçüm süreleri sayıları.
Tablo 3. ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yayınladıkları gama ve X-ışınlarının listesi.
Tablo 4. Eğriye uydurma parametreleri ve ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotopları için hesaplanan yarı-ömür değerleri.
Tablo 5. ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotopları için ölçülen yarı-ömür ve literatürdeki diğer ölçüm sonuçları.

ÖZET

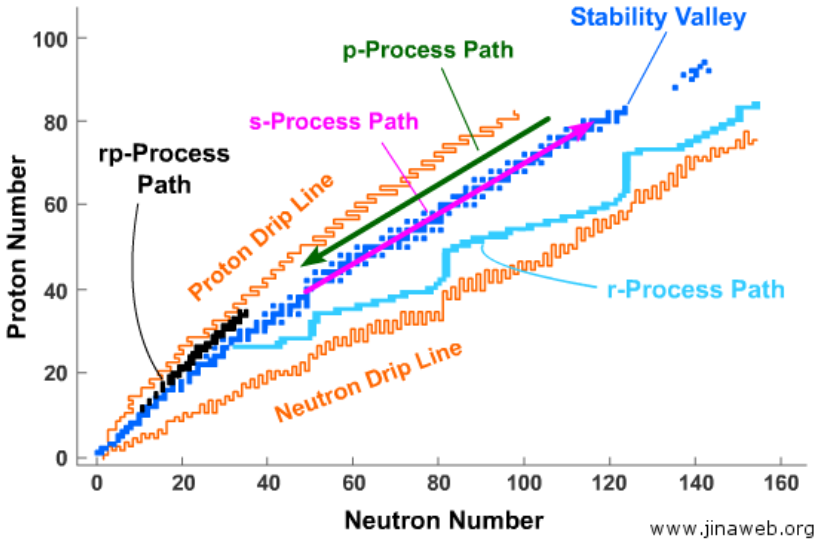
Radyoaktif izotopların yarı-ömürlerinin duyarlı olarak ölçülmesi, nükleer fizikte yapılan bir çok çalışma için önemlidir. Yarı-ömür özellikle aktivasyon yöntemi ile yapılan tesir kesiti ölçümlerinde, tesir kesiti değerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yarı-ömür ölçümlerindeki yüksek belirsizlikler, tesir kesiti belirsizliklerini artırmaktadır. Reaksiyon tesir kesitlerinin duyarlı olarak bilinmesi ise Element Sentezi Teorisinde hayati öneme sahiptir. Çünkü, elementlerin sentezlenmesini modelleyen reaksiyon networklarında girdi olarak kullanılan reaksiyon hızları, tesir kesiti değerlerinden hesaplanmakta ve doğru olmayan tesir kesiti değerleri ve tesir kesitindeki belirsizlikler bu hesaplamalara da yansımakta ve hatalı sonuçların oluşmasına neden olmaktadır. $^{142}Nd(p,\gamma)^{143}Pm$ ve $^{143}Nd(p,\gamma)^{144}Pm$ reaksiyonlarının tesir kesitinin ölçülebilmesi için ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürlerinin duyarlı olarak ölçülmesi gereklidir. ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürleri 261,00 ± 0,62 gün ve 339,50 ± 0,43 gün olarak ölçülmüş ve literatürde bulunan bu ölçümlerin belirsizlikleri oldukça düşürülmüştür.

ABSTRACT

The precise half-life measurements of the radioisotopes are important for many studies in nuclear physics. Particularly for cross section measurements via activation method, the half-life of the reaction products, directly effects cross section values. Hence, high uncertainties in the half-life measurements increase the cross section uncertainties. Precise measurements of the cross sections are crucial for the nucleosynthesis theory. The reaction rates used as input parameter for the reaction networks are derived from cross sections and if the cross section results are inaccurate and with high uncertainty, these results led to inaccurate results in the reaction network calculations. In order to measure $^{142}Nd(p,\gamma)^{143}Pm$ and $^{143}Nd(p,\gamma)^{144}Pm$ reactions, half-lives of the ^{143}Pm and ^{144}Pm isotopes should be precisely measured. Half-lives of the ^{143}Pm and ^{144}Pm isotopes were measured as 261.00 ± 0.62 day ve 339.50 ± 0.43 day, respectively and uncertainties of these half-lives in the literature considerably were decreased.

1.GİRİŞ

Çekirdek Sentezinin, Büyük Patlama (Big Bang) ile başladığı, daha sonra evrenin genişlemesi ve soğuması sürecinde hafif elementlerin (^{1}H, ^{4}He, ^{7}Li) meydana gelen füzyon reaksiyonları sonucunda oluştuğu öne sürülür [6]. Takip eden milyonlarca yıl sonunda yıldızlar oluşmuş ve yıldızlarda element sentezi başlamıştır. Yıldızlarda meydana gelen nükleer yanma reaksiyonları sonucunda Demir'e kadar olan elementler üretilir. Demirden daha ağır elementlerin üretilmesi ise kütlesi güneşin kütlesinden çok daha büyük olan yıldızların evrimleri sonunda meydana gelen süpernova patlamaları gibi patlayan ortamlarda gerçekleşir. Bu elementleri meydana getiren üç temel oluşum mekanizması bulunmaktadır: s-proses, r-proses ve p-proses. İzotop tablosunun nötronca zengin kısmındaki izotoplar s- ve r-proses ile, protonca zengin kısmında bulunan izotoplar ise p-proses ile üretilirler (Şekil 1).



Şekil 1. İzotop tablosunda s-, r- ve p-prosesin üretildiği izotop bölgeleri.

S- ve r-proses yeterince bilinmesine rağmen p-proses çekirdek sentezinde, hala teori ile yapılan gözlemler arasındaki önemli uyuşmazlıklar bulunmaktadır ve p-proses çekirdek sentezi üzerindeki tartışmalar halen yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bunun başlıca nedeni, ilgili bölgedeki reaksiyon tesir kesitlerinin çok küçük bir kısmının deneysel olarak bilinmesidir. P-prosesi sentezinin modellenmesi için oluşturulan simülasyonlar (reaksiyon networkleri) kararlı ve kararsız çekirdeklerin binlerce reaksiyonunun içerir ve bu simülasyonlara reaksiyon tesir kesitinden hesaplanan reaksiyon hızı verilerinin girilmesi

gereklidir. P-çekirdeklerinin güneş sistemindeki doğal bolluklarının s- ve r-çekirdeklerinden 10-100 kez daha az olmaları (bu nedenle zenginleştirme işlemi gereklidir) ve çoğunun proton bakımından zengin kararsız çekirdekler olmaları (radyoaktif hedeflerle deneyler daha zordur) ve ayrıca diğer teknik zorluklar nedeniyle gerçekleştirilebilecek deneysel çalışmalar oldukça azdır [7]. Deneysel olarak elde edilmiş reaksiyon tesir kesiti sayısının oldukça az olması nedeniyle reaksiyon networkları için gerekli olan tesir kesiti değerlerinin neredeyse tamamı Hauser-Feshbach istatistiksel model hesaplamalarından elde edilmektedir [8, 9]. Ancak Hauser-Feshbach tesir kesiti model hesaplamaları, orta ağırlıktaki çekirdeklerin proton yakalama reaksiyonları (p,γ) için tipik olarak deneysel verilerle iki kata kadar iyi bir uyum içindeyken [10, 11, 12], alfa yakalama (α,γ) tesir kesitleri için deneysel olarak bulunan değerlerle ve model ile hesaplanan değerler arasında önemli oranda fark bulunmaktadır [13, 14, 15]. Bu nedenlerle tesir kesiti değerlerinin doğru ve yeterince duyarlı olarak ölçülmesi gerekmektedir. Çünkü bu tesir kesiti değerleri hem direkt reaksiyon hızlarının hesaplanmasında (dolayısı ile reaksiyon networklerinde) hem de mevcut teorik tesir kesiti hesaplamalarının (Hauser-Feshbach istatistiksel model hesaplamaları) [8, 9] test edilmesi ve iyileştirilmesi çalışmalarında kullanılmaktadır. Yani, doğru ve duyarlı tesir kesiti ölçümleri hem element sentezi teorisinin hem de teorik nükleer fiziğin gelişimi için hayati öneme sahiptir.

Aktivasyon yöntemi ile yapılan tesir kesiti ölçümlerinde ilgili izotopun yarı-ömrü değeri ve bu değerdeki belirsizlik doğrudan tesir kesiti değerini ve belirsizliğini etkilemektedir [16, 17, 18, 19]. Bu nedenle duyarlı yarı-ömür ölçümleri, duyarlı tesir kesiti ölçümlerinin bir ön koşuludur. Aktivasyon yöntemi özetle şöyledir; bir izotop uygun parçacıklarla belirli enerjilerde aktive edilir, oluşan reaksiyon sonucunda meydana gelen radyoaktif ürün çekirdekten yayınlanan radyasyon sayılır. Ürün çekirdeğin aktivitesi, diğer parametreler sabit olduğunda (bombardıman parçacığının enerjisi, şiddeti, dedektör verimi, aktivasyon ve sayım süresi gibi) madde miktarı (hedef kalınlığı) ile orantılıdır. Benzer şekilde eğer hedefteki madde miktarı biliniyorsa meydana gelen reaksiyonun tesir kesiti de bulunabilir. Ancak yöntemin uygulamada bazı kısıtlamaları vardır. Meydana gelen reaksiyon sonucunda oluşan ürün çekirdek uygun yarı-ömre sahip radyoaktif bir çekirdek olmalı ve uygun şiddete sahip bir gama ışını ya da bir parçacık yayınlamalıdır. Aktivasyon için termal nötronlar, hızlı nötronlar, yüklü parçacıklar veya yüksek enerjili fotonlar kullanılabilir. Aktivasyon metodu kullanarak, (p,γ), (α,γ), (α,p), (α,n) ve (γ,α) gibi reaksiyonların tesir kesitleri ölçülebilmektedir.

Aşağıdaki gibi bir proton yakalama reaksiyonu göz önüne alalım; X çekirdeğinin protonlarla bombardımanı sonucunda, bir proton yakalayarak bir Y çekirdeği oluştursun ve bu reaksiyon

sonucunda oluşan radyoaktif Y çekirdeği de β^+ bozunması yaparak bir Z çekirdeğine dönüşsün, yani:

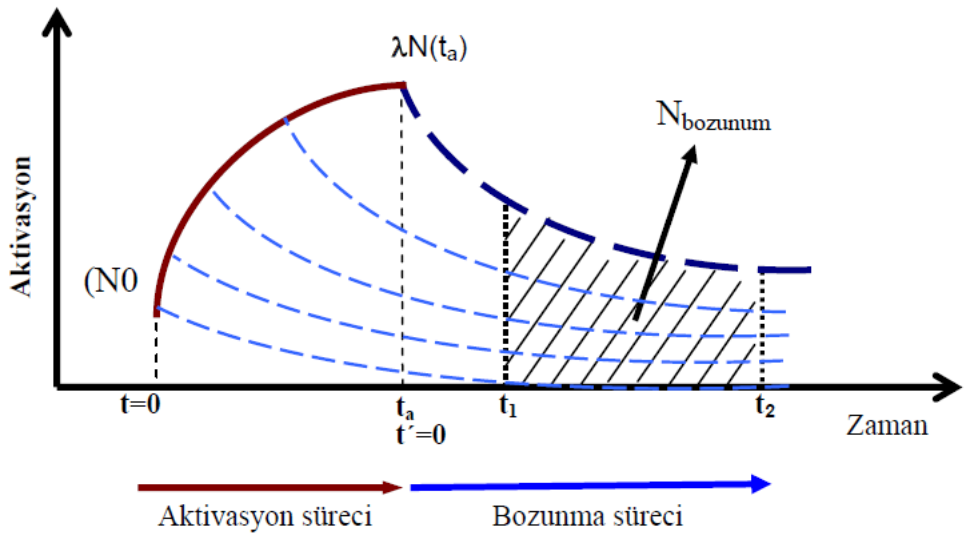
$$p + X \rightarrow Y + \gamma \qquad \Rightarrow \qquad Y \rightarrow \beta^+ + Z + \nu_e$$

şeklinde reaksiyonlar meydana gelsin. Aktivasyon süresince, yeni çekirdek oluşumunun yanında bozunma da gerçekleşeceğinden lineer bir üretim meydana gelmez (Şekil 2). Bu durumda Y çekirdek sayısının değişim hızı, üretim ve bozunma hızının farkıdır;

$$\frac{dN_Y(t)}{dt} = R(t) - \lambda_Y N_Y(t) \qquad (1)$$

Burada R(t) üretim hızı, N_Y, Y çekirdeği sayısı ve λ_Y ise Y çekirdeğinin bozunma sabitidir.

Şekil 2.



Aktivasyon ve bozunma süreci. Aktivasyon ile ürün çekirdek üretilirken bir yandan da ürün çekirdek bozunmaktadır. Aktivasyonun bittiği an (t_a), sadece bozunum için başlangıç (t'=0) anıdır.

Denklem 1 çözülürse, aktivasyonun sonunda, üretilen Y çekirdeğinin sayısı,

$$N_Y(t_a) = \frac{\sigma\, n_T\, \phi}{\lambda_Y}\left(1 - e^{-\lambda_Y t_a}\right) + N_{Y0}\, e^{-\lambda_Y t_a} \qquad (2)$$

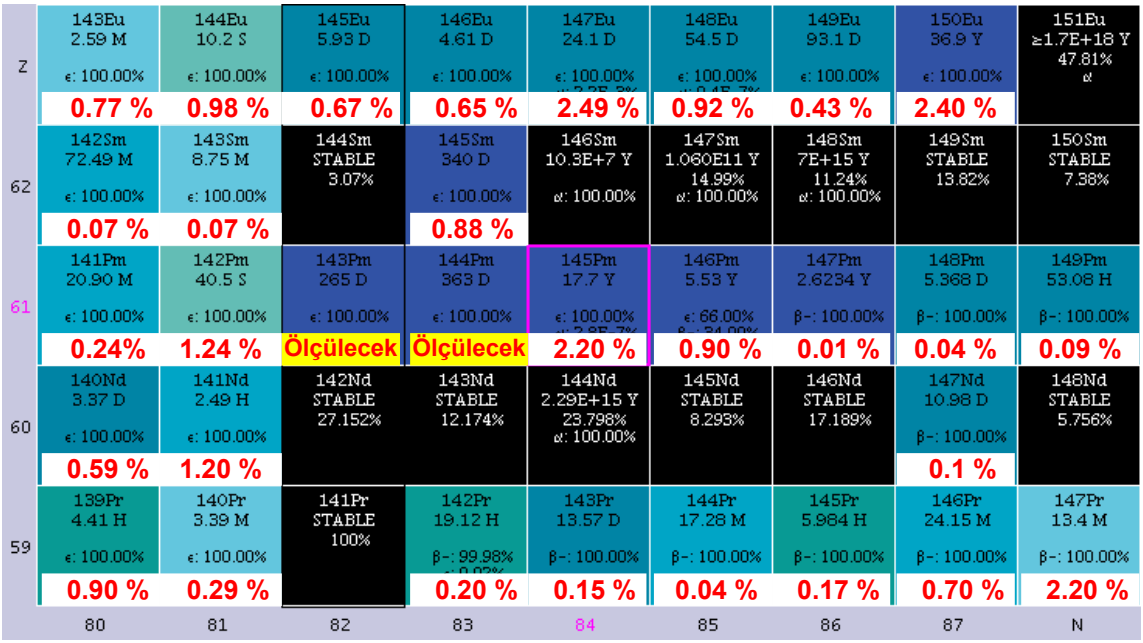
şeklinde olur. Aktivasyon sonunda üretilen N_Y çekirdeklerinin sayısı deneysel olarak bulunur ise ve yarı-ömür, hedef kalınlığı, demet akısı biliniyorsa, σ tesir kesiti denklemden çekilerek kolayca hesaplanabilmektedir. Aktivasyon yöntemiyle ilgili detaylı bilgi [14, 18, 19] referanslarından bulunabilir. Burada σ tesir kesiti, n_T, birim alandaki toplam hedef çekirdeği sayısı, ϕ, hızlandırılan parçacık akısıdır (parçacık / cm^2.s). λ_Y ise Y çekirdeğinin bozunma sabitidir ve şu ifadeyle verilmektedir;

$$\lambda_Y = \frac{\ln(2)}{t_{Y(1/2)}} \qquad (3).$$

Denklem 2 ve 3 ten görüldüğü gibi Y çekirdeğinin yarı-ömrü $t_{Y(1/2)}$, deneysel olarak tesir kesiti ölçümüne doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle de yarı-ömürün doğru ve duyarlı olarak bilinmesi tesir kesiti ölçümleri için çok önemlidir. Son yıllarda nükleer astrofizik için önem arz eden bir çok tesir kesiti [1, 2, 7, 10-15, 20-32] ve ayrıca yarı-ömür ölçümü [16, 17, 33] yapılmıştır. Son olarak yapılan tesir kesiti ölçümü çalışmalardan birisi ^{141}Pr(α,n)^{144}Pm reaksiyonudur [2]. Bu reaksiyon aktivasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve literatürdeki mevcut yarı-ömür değeri kullanılmıştır. Hem bu reaksiyon için hem de yapılması planlanan ^{142}Nd(p,γ)^{143}Pm ve ^{143}Nd(p,γ)^{144}Pm reaksiyonları için ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürlerinin doğru ve daha duyarlı olarak ölçülmesi gereklidir.

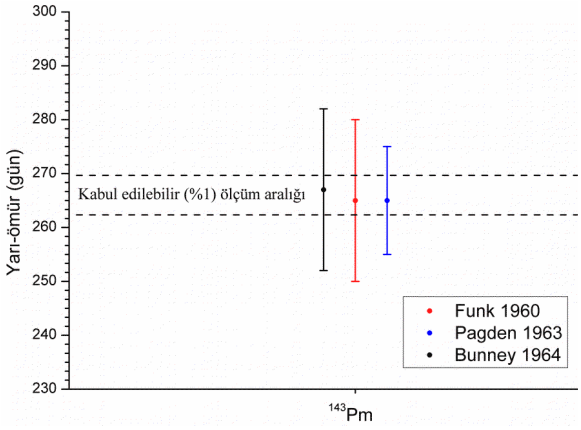
2. LİREATÜR ÖZETİ

Aynı motivasyona sahip çalışmalar, daha önce de gerçekleştirilmiştir. Örneğin Gy. Gyürky ve arkadaşları tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada (Nuclear Physics A 828 (2009) 1–8), aktivasyon yöntemi ile tesir kesiti ölçümü gerçekleştirilmek istenen ^{151}Eu(α,n)^{154}Tb reaksiyonu için**,** literatürde yarı-ömründeki belirsizlik %4 olan ^{154}Tb izotopunun yarı-ömrü ölçülmüş ve belirsizlik %0,39'a indirilmiştir. Başka bir çalışma ise J. Farkas ve arkadaşları tarafından 2011 yılında gerçekleştirilmiştir (Eur. Phys. J. A (2011) 47:7) ve aktivasyon yöntemi ile tesir kesiti ölçümü gerçekleştirilmek istenen ^{130}Ba(α,n)^{133m}Ce reaksiyonu için literatürde yarı-ömründeki belirsizlik %8 olan ^{133m}Ce izotopunun yarı-ömrü ölçülmüş ve belirsizlik %0,2'ye indirilmiştir.



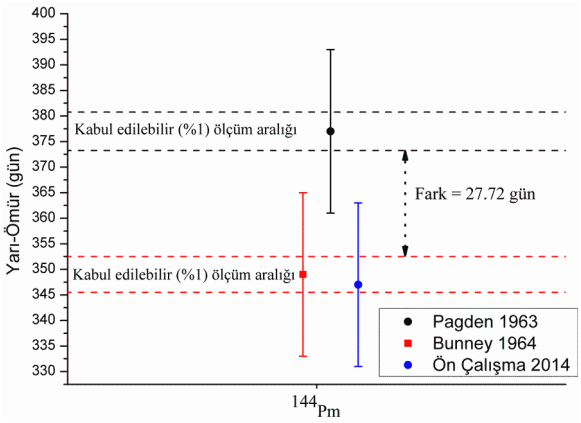
Şekil 3. İzotop tablosunun ilgili bölgesindeki izotopların temel durumları için önerilen yarı-ömür değerlerinin belirsizlikleri. Her izotop için yarı-ömürdeki belirsizlikler en altta kırmızı yazı rengiyle verilmiştir.

^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürlerinin literatürde sırasıyla 3 ve 2 adet ölçüm bulunmaktadır. Literatürde, ^{143}Pm için ölçülmüş yarı-ömür değerleri 265 ± 15 gün [5], 265 ± 10 gün [3] ve 267 ± 15 gün [4] olarak bulunmuştur. Bu ölçümlerin sonucu birbiriyle uyumlu olsa da, belirsizlikleri görece olarak oldukça yüksek ve sırasıyla % 5,66, % 3,77 ve % 5,62'dir. Dedektör kalibrasyonu için kullanılacak referans kaynaklar için yarı-ömürdeki belirsizliğin % 0.1'den daha küçük ve yarı-ömürlerin değerlendirilebilmesi için en az 6 tane birbirinden bağımsız ölçüm olması gerektiği Woods ve Collins tarafından belirtilmiştir [35]. Referans kaynakların dışındaki izotoplar için, kararlılık eğrisi civarındaki izotopların yarı-ömür ölçümlerindeki belirsizlik genellikle %1'in altındadır (Şekil 3) ve bu nedenle yarı-ömür ölçümleri için %1 belirsizlik makul bir orandır. Bu orana göre Şekil 4'te de gösterildiği gibi ^{143}Pm için yarı-ömür değerleri birbiriyle uyumlu olmasına rağmen bu ölçümlerin belirsizlikleri oldukça yüksektir ve yeni yarı-ömür ölçümleri yapılarak %1'in altına düşürülmesi gerekmektedir.



Şekil 4. ^{143}Pm izotopu için literatürdeki ölçüm değerleri ve belirsizlikleri.

^{144}Pm izotopu için mevcut literatürdeki değerlerin belirsizliklerinin yaygın ölçüm sonuçlarının belirsizlikleriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir (377 ± 16 gün [3] ve 349 ± 16 gün [4]). İstatistiksel olarak bu iki ölçümün hata çubuklarının birbirine değmesi nedeniyle uyumlu oldukları söylenebilir. Ancak izotop tablosunun bu bölgesinde pratik amaçlar için kabul edilebilir belirsizlik sınırını dikkate alarak, ölçüm sonuçlarını bu bilgi ışığında değerlendirmek gerekmektedir. Dolaysıyla Şekil 5'te gösterdiğimiz gibi bu iki ölçümün uyumlu olduğu söylenemez ve bu ölçümlerin iyileştirilmesi ve belirsizliklerinin kabul edilebilir bir sınıra indirilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu iki yarı-ömür ölçümü arasındaki bu büyük fark nedeniyle, Sauerwein tarafından 2011 yılında aktivasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiş ^{141}Pr(α,n)^{144}Pm reaksiyon tesir kesiti ölçümleri [2], ^{144}Pm izotopu için duyarlı olarak yarı-ömür ölçümü yapıldıktan sonra revize edilmelidir.



Şekil 5. ^{144}Pm izotopu için literatürdeki ölçüm değerleri ve belirsizlikleri

3.YÖNTEM

Ölçüm yöntemimiz literatürde daha önce yapılmış ölçümlerden bir çok noktada farklılaşmaktadır. Literatürde, ^{143}Pm ve ^{144}Pm İzotoplarının yarı-ömrü belirlemek için gerçekleştirilen tüm ölçümlerde üretilen kaynaklardan yayınlanan gama ışınlarını saymak için NaI dedektörleri kullanılmıştır. NaI dedektörlerinin enerji çözünürlüğü çok kötüdür. Bu nedenle NaI dedektörleriyle yapılmış ölçümlerde, ilgili pik alanı altında fark edilmeyen diğer piklerin bulunması ve katkıların gelmesi kuvvetle muhtemeldir. Literatürde, ^{143}Pm ve ^{144}Pm İzotoplarının yarı-ömürlerinin belirlendiği üç çalışmada [3, 4 ,5] da NaI dedektörleri kullanılmış ve hedef içindeki diğer izotoplar çeşitli yöntemlerle tahmin edilerek, ölçülen spektrumlara düzeltmeler uygulanmıştır. Eski ve yetersiz cihazlarla gerçekleştirilen bu ölçümlerin yerine, daha gelişmiş teknolojiler içeren cihazlarla yeniden ölçülmesi ve önceki ölçümlerin geliştirilmesi nükleer astrofizik açısından çok önemlidir. ^{143}Pm ve ^{144}Pm İzotoplarının yarı-ömürlerini ölçmek için gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar; hedeflerin hazırlanması, hedeflerin hızlandırıcıda ışınlanması, ışınlanan hedeflerin HPGe dedektörleri ile sayılması ve elde edilen spektrumların analiz edilerek yarı-ömür değerlerinin hesaplanması adımlarını kapsamaktadır. Bu adımlar detaylı olarak aşağıda ayrı alt-başlıklar altında irdelenmiştir.

3.1. Neodimyum Hedeflerin Hazırlanması

Yarı ömür ölçümleri için gerekli olan ^{143}Pm ve ^{144}Pm kaynakları, ^{142}Nd(p,γ)^{143}Pm, ^{143}Nd(p,n)^{143}Pm, ^{143}Nd(p,γ)^{144}Pm ve ^{144}Nd(p,n)^{144}Pm reaksiyonları sonucunda oluşturulacaktır. Bu nedenle doğal Neodimyum hedefleri hazırlanmalıdır. Neodimyum elementi Lantanidler grubundan olup, doğada 7 tane kararlı Neodimyum izotopu bulunmaktadır. Bu iztopların doğal bollukları Tablo 1'de verilmiştir. Tablodaki bolluklara baktığımızda ^{143}Pm ve ^{144}Pm kaynakları üretmek için gerekli olan ^{142}Nd, ^{143}Nd ve ^{144}Nd izotopları doğal Nd içinde yeterince bulunmaktadır. Ancak, ^{144}Pm izotopunun yayınladığı gama ışınları ile X-ışınlarının çakışma (coincidence) yapması nedeniyle, ^{143}Pm izotopunun ilgili piki (741,98 keV) bozulmaktadır. Bu nedenle ayrıca yüksek oranda zenginleştirilmiş ^{142}Nd hedefler de yapılmıştır.

Tablo 1. Neodimyum iztoplarının doğal bollukları.

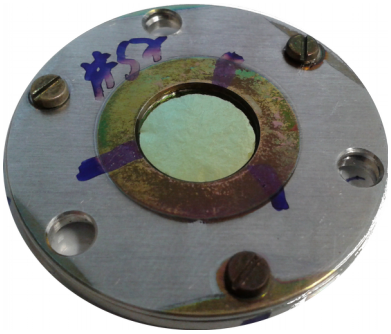
İzotop	***Doğal bolluğu***	***İzotop***	***Doğal bolluğu***
^{142}Nd	% 27,152 *40*	^{146}Nd	**%** 17,189 *32*
^{143}Nd	% 12,174 *26*	^{148}Nd	**%** 5,756 *21*
^{144}Nd	% 23,798 *19*	^{150}Nd	**%** 5,638 *28*
^{145}Nd	**%** 8,293 *12*		

Bu durum hedeflerin hazırlanmasından önce, en verimli hedef hazırlama yönteminin belirlenmesini ve bir çok deneme yapılmasını gerektirir. Ayrıca hedef hazırlanırken kullanılacak potadan yada başka yerlerden hedefe bulaşacak safsızlıklar da reaksiyona neden olacağı ve spektrumu kirleteceği için engellenmelidir. Ayrıca bir kirlenmenin olup olmadığı PIXE yada RBS gibi yöntemlerle incelenmelidir.

Oksit formda (Nd_2O_3) toz Neodimyum ile hedefler hazırlanmıştır. Nd_2O_3'nin erime sıcaklığı çok yüksek olduğu için (2272 ºC) elektron demetiyle doğrudan bombardıman edilerek buharlaştırma işlemi yapılmıştır. Hedeflerin hazırlanması için, Macar Bilimler Akademisi, Nükleer Araştırma Enstitüsünde bulunan Leybold Univex 350 kaplama cihazı kullanılmıştır (Şekil 6). Öncelikle toz haldeki 40-60 mg miktarda Nd_2O_3 bir pres ile tablet haline getirildikten sonra karbon bir potanın içine yerleştirilmiş ve yaklaşık 1.0 10^{-6} mbar basınç altında bulunan bir vakum odasına konulmuştur. Bu karbon potanın yaklaşık 5-7 cm yukarısına hedeflerin kaplanacağı Al folyoların yerleştirildiği bir örnek tutucu sabitlenmiştir (Şekil 6). Elektron demeti doğrudan Nd_2O_3 tabletin üzerine gönderilmek suretiyle buharlaştırılmış ve Al altlığın üzerine başarıyla kaplanmaları sağlanmıştır (Şekil 7). Üretilen hedeflerin kalınlıkları ~300-350 μg/cm^2 arasında değişmektedir. Geliştirilen bu yöntem ile doğal hedeflerin yanı sıra zenginleştirilmiş hedefler de hazırlanmıştır.

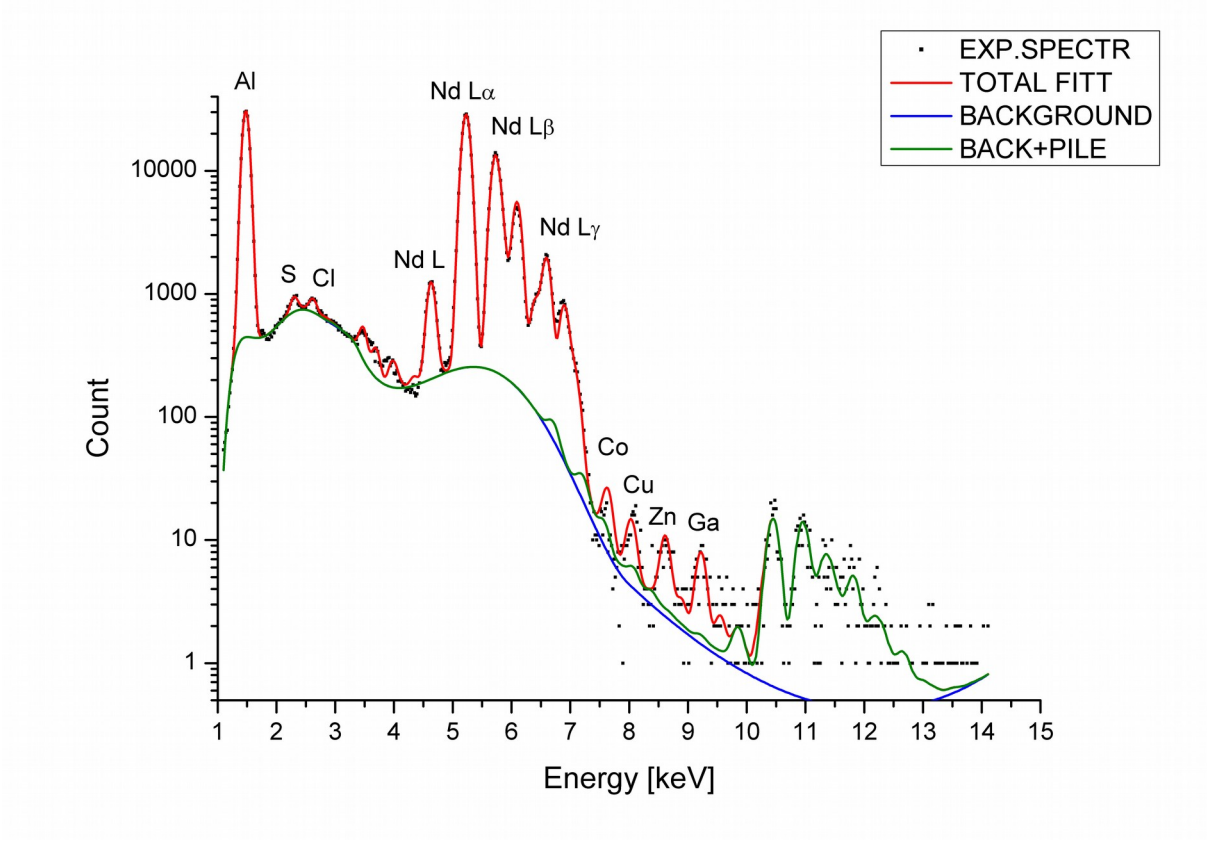


Şekil 6. Hedef hazırlamada kullanılacak Leybold Univex 350 kaplama cihazı ve örnek tutucu ve karbon pota yerleşimi.



Şekil 7. Üretilen Neodmiyum hedeflerden bir tanesi.

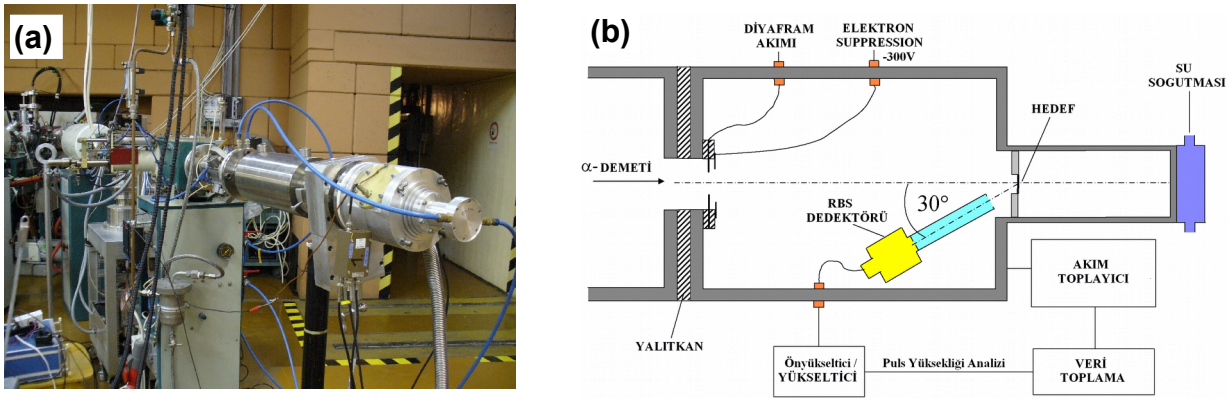
Üretilen hedeflerin içerisinde herhangi başka safsızlığın bulunup bulunmadığı araştırmak için, hedeflerden biri PIXE yöntemi ile incelenmiştir. Sonuç olarak üretilen hedefte Nd ve altlılık olarak kullanılan Al dışında belirgin bir elemente rastlanmamıştır (Şekil 8). Eser miktardaki diğer elementler (S, Cl, Co, Cu, Zn, Ga) Al altlıkta ve Nd_2O_3'in içinde ulunan safsızlıklardır.



Şekil 8. Hazırlanan hedeflerden birisinin PIXE spektrumu.

3.2. Hedeflerin Hızlandırıcıda Işınlanması (Aktivasyon)

Neodmiyum hedefler MTA-ATOMKI MGC-20E siklotron hızlandırıcısında, 6.5, 7.0 ve 7.5 MeV enerjili protonlarla ışınlanarak ^{143}Pm ve ^{144}Pm kaynakları üretilmiştir. Aktivasyon işlemi için kullanılan deney hattı ve reaksiyon odasının şeması Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. (a). Aktivasyonun gerçekleştirildiği demet hattı ve **(b)** reaksiyon odasının şematik çizimi.

Reaksiyon odası, demet hattından bir yalıtkan ile yalıtılmış ve ayrıca demet hattında oluşabilecek ikincil elektronları engellemek için girişine -300 V gerilim uygulanmıştır. Hedefte herhangi bir erime olup olmadığını kontrol etmek için demete 150º açıyla RBS dedektörü yerleştirilmiştir. Bu dedektör sayesinde birim zamanda hedeften saçılan parçacık sayısı belirli aralıklarla kontrol edilmektedir. Bu sayı hedefin kalınlığıyla orantılıdır ve hedefte herhangi bir erime meydana gelmiyorsa sabit olmalıdır. Tüm deneylerde hedef bu yöntemle sürekli takip edilmiş ve herhangi bir erime gözlenmemiştir.

3.3. Hedeflerin HPGe Dedektörler ile Sayılması

Işınlanan hedeflerin içinde bulunan Neodmiyumun diğer izotopları ve altlık olarak kullanılan Al folyonun içinde bulunan istenmeyen izotopların meydana getireceği reaksiyonlar sonucunda oluşan izotoplar gama spektrumunu kirletecektir. Bu nedenle bu izotoplardan kısa yarıömürlü olanlarının bozunması için yaklaşık 1 ay beklenmiştir. Örneğin doğal Nd hedef içinde %5.76 oranında bulunan ^{148}Nd izotopunun gerçekleştireceği ^{148}Nd(p,n)^{148}Pm reaksiyonu sonucunda oluşan ^{148}Pm izotopun yarı-ömrü, 5.368 gündür. Bu izotop bu bekleme süresi sonunda büyük oranda bozunmuştur.

Üretilen ^{143}Pm ve ^{144}Pm kaynakları 3 ayrı dedektör sistemi ile sayılmıştır. Bu sistemlerden ikisi ATOMKI'de bir tanesi Kocaeli Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarındadır.

Sistemlerin resimleri aşağıda verilmiştir (Şekil 10, 11 ve 12). Dedektör sistemlerinin özellikleri ve sayımlar sonucu elde edilen veriler Tablo 1 de verilmiştir.



Şekil 10. ATOMKI ultra düşük art alan (ULB) Dedektörü.



Şekil 11. ATOMKI Offset Dedektörü

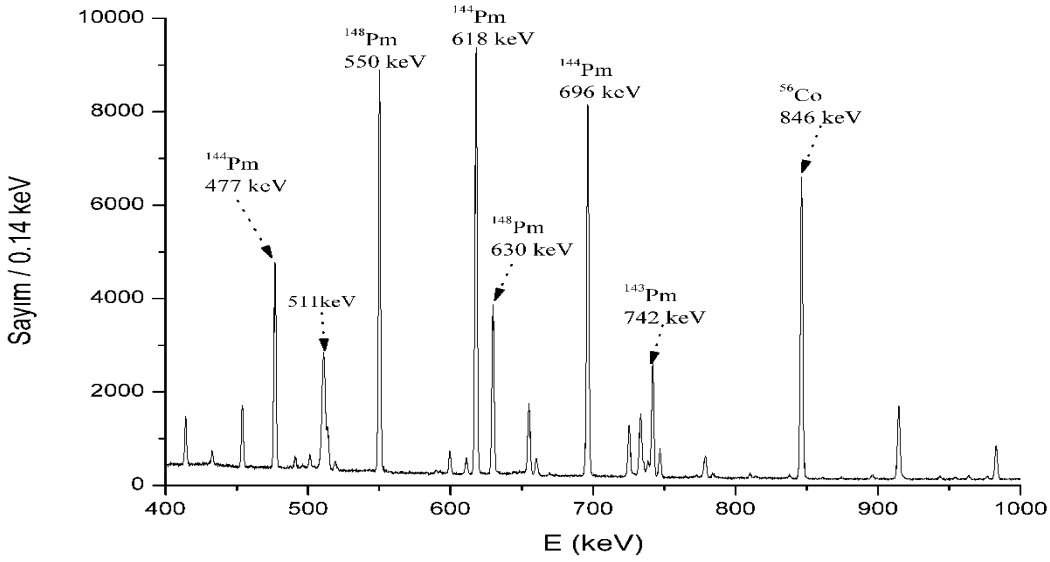


Şekil 12. Kocaeli Nükleer Araştırma laboratuvarı düşük artalan dedektörü.

Tablo 2. Dedektör sistemlerinin özellikleri ve ölçüm süreleri sayıları.			
	ATOMKI (Offset)	**ATOMKI (ULB)**	**KOCAELİ**
Üretici firma	Canberra	Canberra	Ortec
Rölatif verimi	%100	%100	%25
Zırh Özellikleri	El yapımı	TEMA DSF-3	ORTEC HPLBS1
Ölçüm Sıklığı	6 saat	6 saat	6 saat
Ölçüm Süresi	155 gün	50 gün	322 gün

ATOMKI'deki ölçümler dedektör sistemlerinin geniş bir kullanıcı ağı tarafından diğer deneyler için kullanılması nedeniyle çok daha kısa sayılmıştır. Yapılan analizler sonucunda bu sayımların yeterince duyarlı yarı-ömür ölçümüne izin vermeyeceği değerlendirilerek sadece Kocaeli Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarındaki ölçümler kullanılmıştır. Ancak bu ölçüm sırasında da elektrik hattında meydana gelen bir arıza nedeniyle kaynak dedektör geometrisi bozulmadan ölçümlere bir süre ara verilmek zorunda kalınmıştır.

Sayımlar sonucunda elde edilen bir örnek spektrum Şekil 13'te verilmektedir. Şekil 13'ten de görüldüğü gibi üretilen başlıca izotoplar ^{143}Pm, ^{144}Pm ve ^{56}Co'dır. Tablo 3'te koyu olarak işaretlendiği üzere analizler için kullanılacak pikler ^{143}Pm için; 741,98 keV, ^{144}Pm için; 476,78 keV, 618,01 keV ve 696,49 keV. Spektrumların otomatik olarak gerçekleştirilen ön analizleri sonucunda, ölçümlerde bazı spektrumlarda, yükselticiden kaynaklanan kaymalar olduğu görülmüştür. Dolayısı ile spektrumların otomatik analizlerinin hatalı sonuçlar verebileceği ve bu nedenle tüm spektrumların manuel analiz edilmesine karar verilmiştir. Sayımlar TV programı ile her bir pik için ayrı ayrı analiz edilmiştir.



Şekil 13. Proton demetiyle 7,5 MeV enerjide ışınlanmış doğal Neodimyum hedefin 6 saat süreyle sayılmasıyla elde edilen spektrum. Başlıca pikler işaretlenmiştir.

Tablo 3. ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yayınladıkları gama ve X-ışınlarının listesi [34].

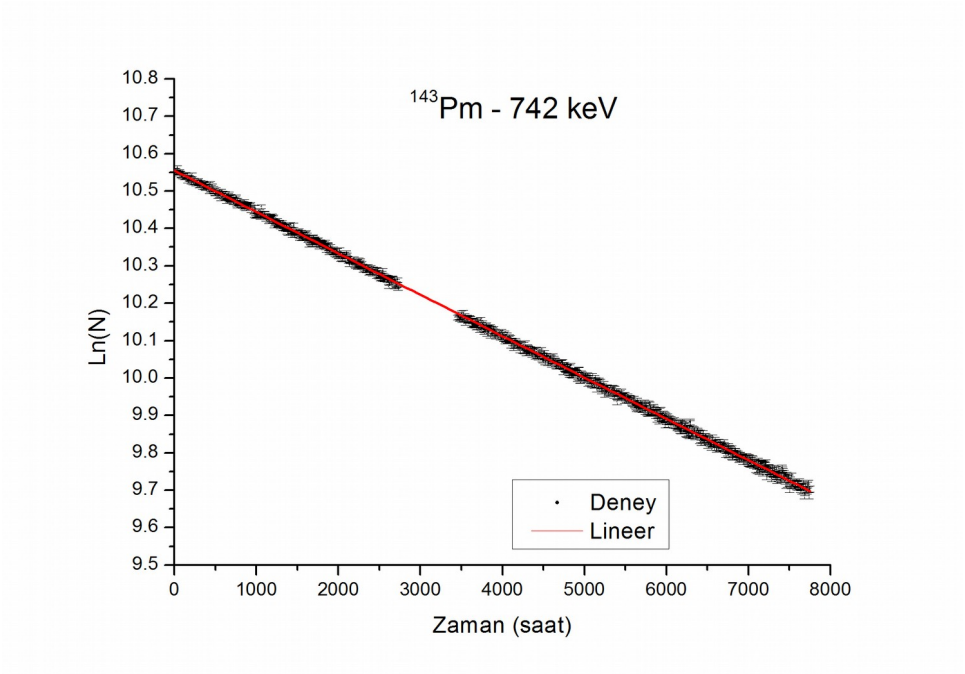
^{143}Pm				**^{144}Pm**		
	E (MeV)	**Gama Yayınlama Olasılığı (%)**			**E (MeV)**	**Gama Yayınlama Olasılığı (%)**
XR l	5,23	11,9 % *6*		XR l	5,23	12,1 % *5*
XR kα2	36,847	21,7 % *9*		XR kα2	36,847	22,2 % *6*
XR kα1	37,361	39,2 % *16*		XR kα1	37,361	40,0 % *10*
XR kβ3	42,166	3,86% *16*		XR kβ3	42,166	3,94 % *10*
XR kβ1	42,272	7,4 % *3*		XR kβ1	42,272	7,60 % *20*
XR kβ2	43,335	2,48 % *10*		XR kβ2	43,335	2,53 % *6*
	741,98	**38,5 %**			**476,78 *3***	**43,8 % *20***
					618,01 *3*	**98 % *3***
					696,49 *3*	**99,490 %**
					778,57 *6*	1,50 % *3*

4. BULGULAR

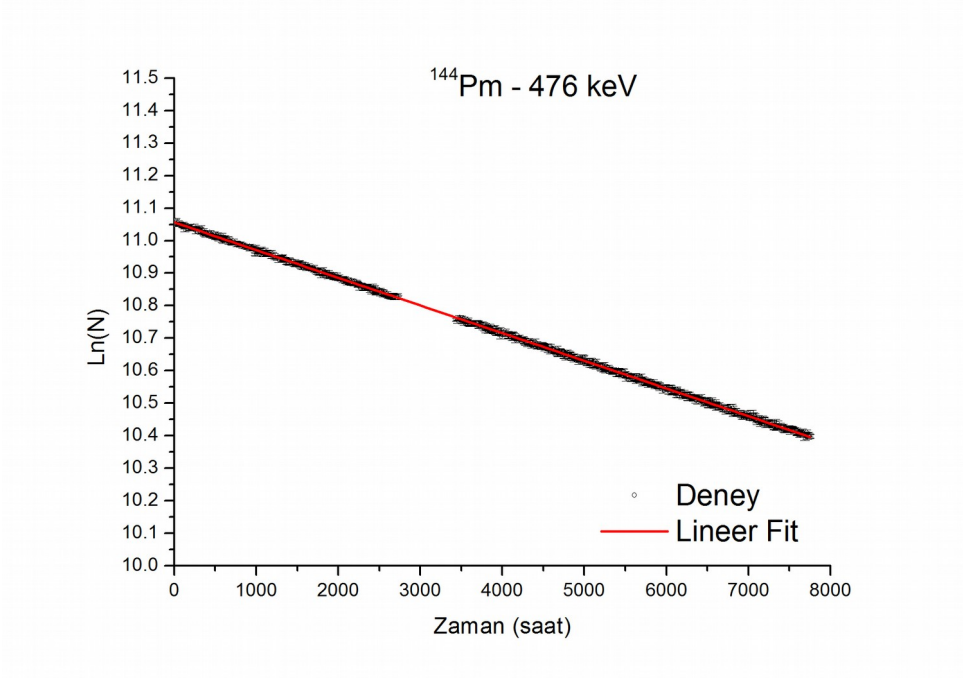
Farklı gama ışınlarıyla gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen pik alanları ile çizilen Ln(N) – Zaman grafiği Şekil 14,15,16 ve 17'de verilmiştir. Elde edilen verilere ölü-zaman düzeltmesi yapılmıştır. Deneysel noktalara doğrusal eğriye uydurma (fit) işlemi yapılmış ve elde edilen doğrunun eğimi ile yarı ömür değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler Tablo 4'te detaylı olarak verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere R^2 değerleri, tüm hesaplamalar için gerçekleştirilen eğriye uydurma işleminin çok başarılı olduğunu göstermektedir. Tablo 4'deki hesaplanan yarı ömür değerlerinin hatası sadece istatistiksel hatayı içermektedir ve hesaplamalar % 95 güven limitine (2σ) göre yapılmıştır. Diğer belirsizlikler izleyen bölümde dahil edilecektir.

Tablo 4. Eğriye uydurma parametreleri ve ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotopları için hesaplanan yarı-ömür değerleri.

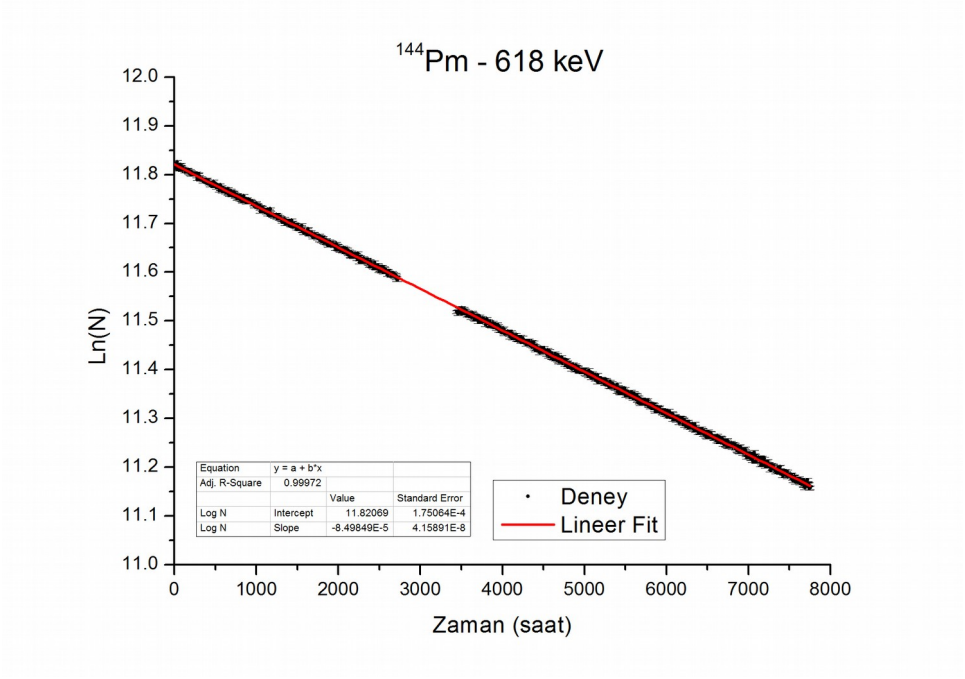
İzotop	E_γ (keV)	Eğim	Eğimdeki Hata	R^2	Yarı-Ömür (gün)	Hata (2σ) (gün)
^{143}Pm	742	-1.10656E-4	8.44908E-8	0.99932	261,00	0,39
^{144}Pm	476	-8.51592E-5	6.19195E-8	0.99938	339,14	0,48
	618	-8.49849E-5	4.15891E-8	0.99972	339,84	0,33
	696	-8.50616E-5	4.30852E-8	0.99970	339,53	0,34



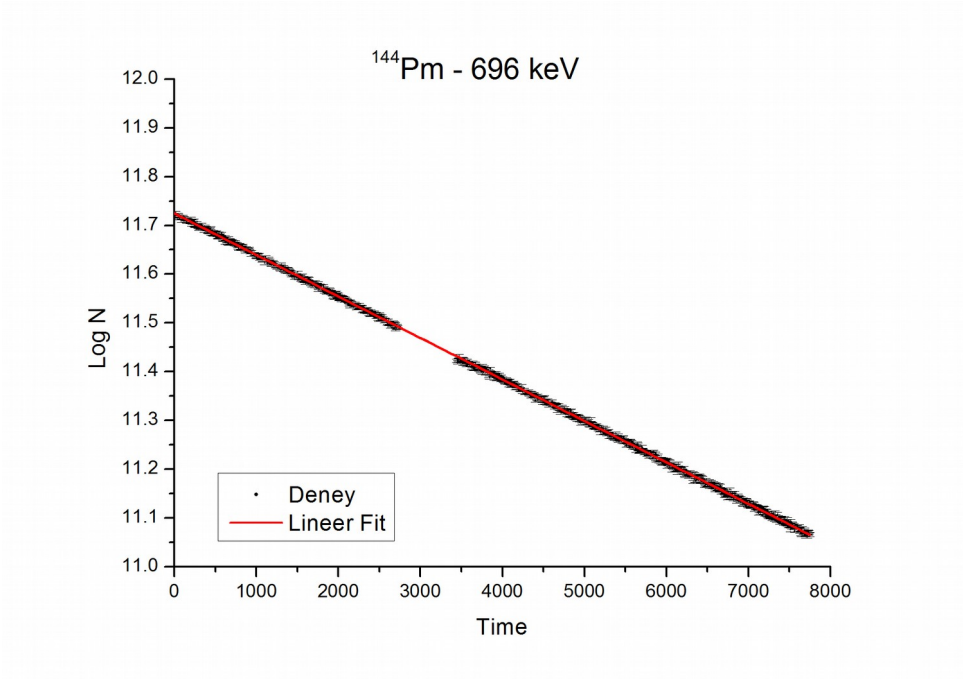
Şekil 14. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 742 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.



Şekil 15. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 476 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.



Şekil 16. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 618 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.

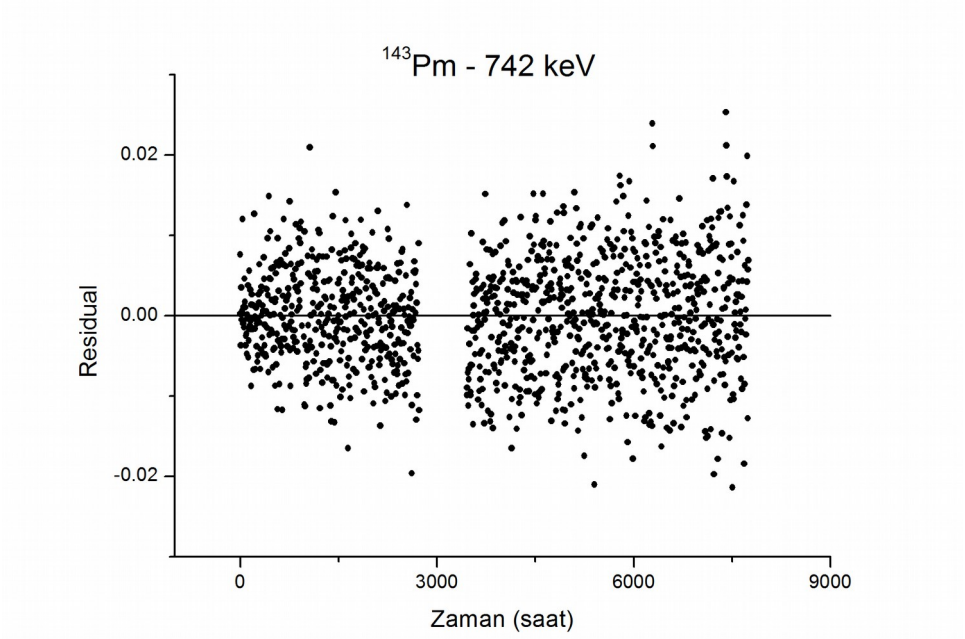


Şekil 17. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun 696 keV enerjili gama-ışınları için yarı-ömür grafiği.

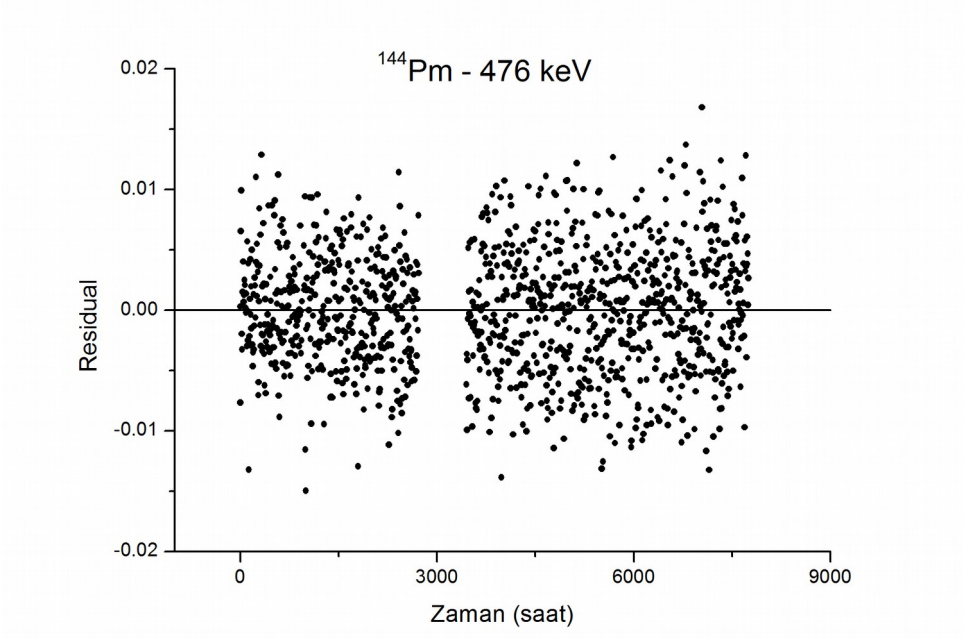
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

^{143}Pm ve ^{144}Pm izotoplarının yarı-ömürleri görece olarak uzun olduğu için, ölçüm esnasında herhangi bir sistematik hata olup olmadığının araştırılması gerekmektedir. Bu hatalar yüksek frekanslı, orta frekanslı ve düşük frekanslı hataları olarak üç ana gruba ayrılabilir. Yüksek frekanslı hatalar, ölçüm süresine göre çok daha kısa aralıklarla meydana gelen hatalardır. Ölçümlerin istatistiksel hatası, anlık elektronik gürültüler bu kapsamdadır. Orta frekanslı hatalar genellikle ölçüm ortamının sıcaklık, nem, basınç gibi parametrelerinde haftalık yada mevsimsel değişimler nedeniyle meydana gelir. Bu hatalar genellikle artık (residual) grafiğinde kısmi eğilimler (trendler) olarak belirir. Düşük frekanslı hatalar ise tüm ölçüm süresine kıyasla daha yavaş değişen hatalardır. Bunlar, dedektör veriminin uzun süreli değişimi, kaynakta meydana gelen aşınma ve erimeler yada oksitlenme gibi ölçüm sonucunu etkileyen hatalardır. Bu nedenle öncelikle Şekil 14, 15, 16 ve 17'de çizilen yarı-ömür grafiklerinin artık (residual) grafikleri çizilmiş ve incelenmiştir. Çizilen artık grafiğinde eğer veriler rastgele bir şekilde dağılmış ve yani her hangi bir eğilim (trend) gözlenmiyor ise bu ölçümde sistematik hatanın olmadığına işaret etmektedir. Şekil 18, 19, 20 ve 21'de tüm ölçümler için çizilen artık grafikler görülmektedir. İlk bakışta grafikteki verilerin rastgele dağıldığı gözlenmesine rağmen, bundan emin olmak için artık grafiklerdeki verilerin rastgele dağılımının olup olmadığını gösteren "lag" grafikleri de çizilmiştir. Şekil 22, 23 24 ve 25 tüm

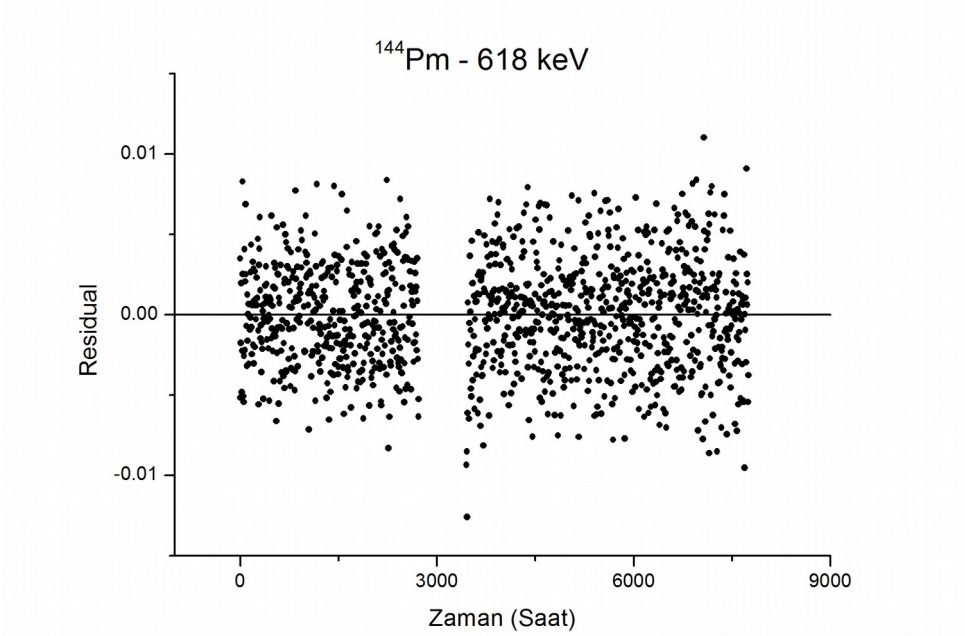
ölçümler için çizilen lag grafiklerinin göstermektedir. Bu grafiklerdeki sıfır etrafındaki dairesel dağılım, ölçümlerde sistematik hatanın olmadığını göstermektedir.



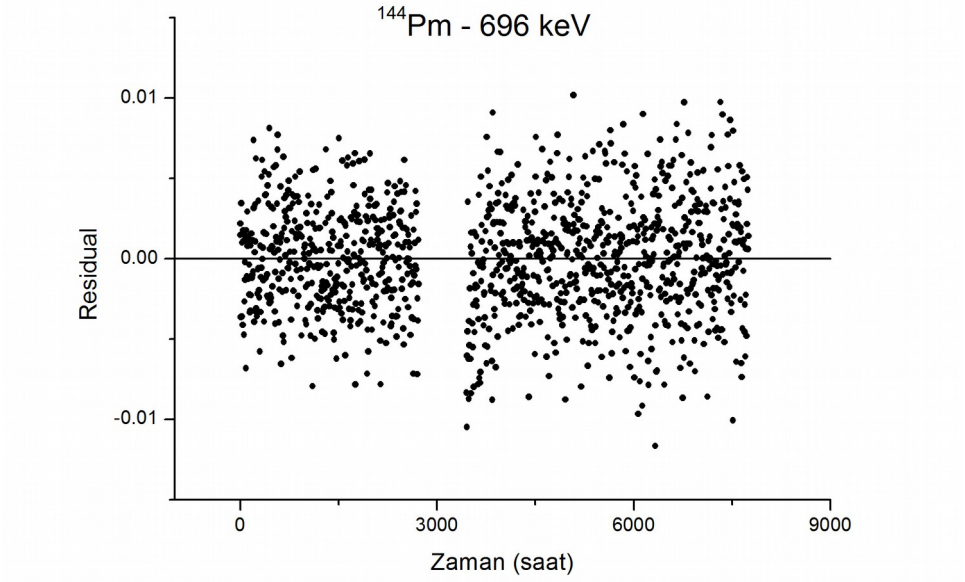
Şekil 18. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{143}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.



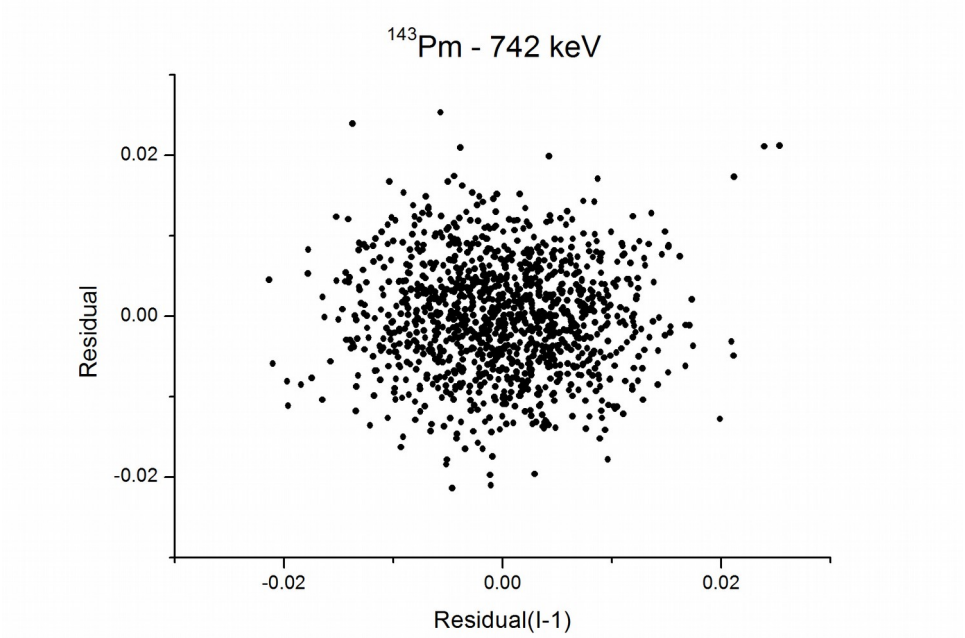
Şekil 19. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.



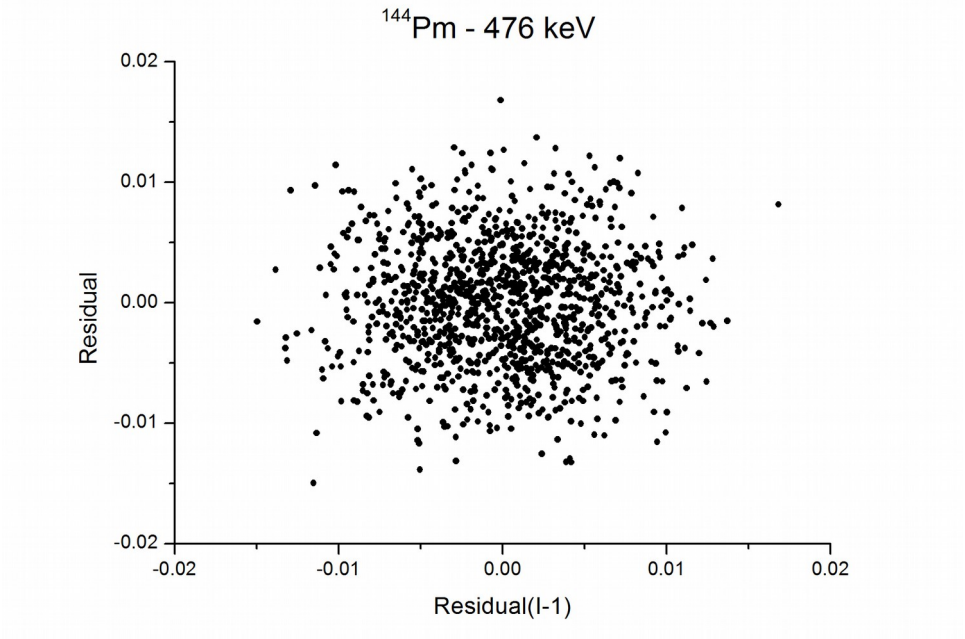
Şekil 20. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.



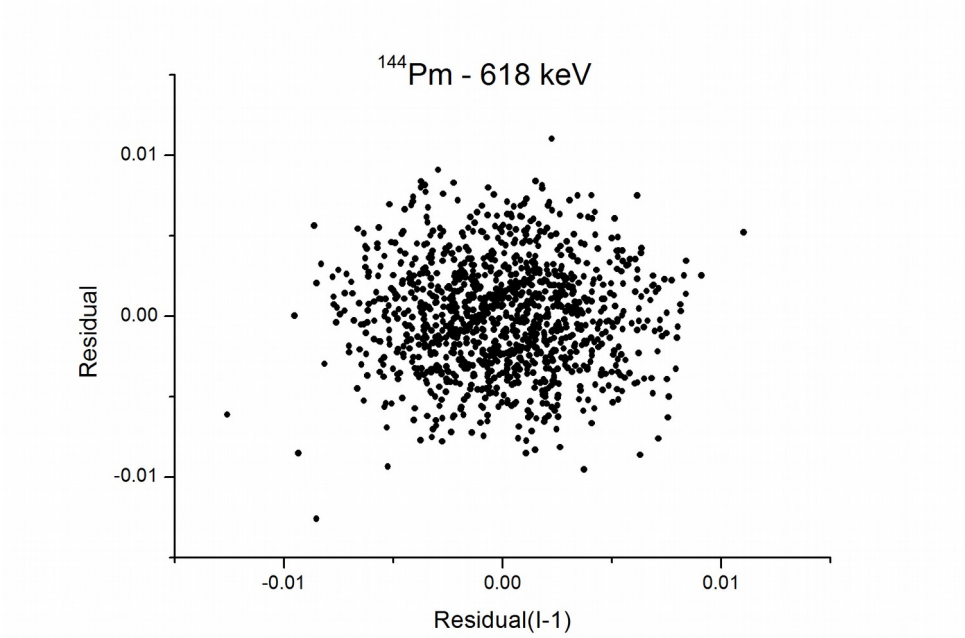
Şekil 21. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün residual grafiği.



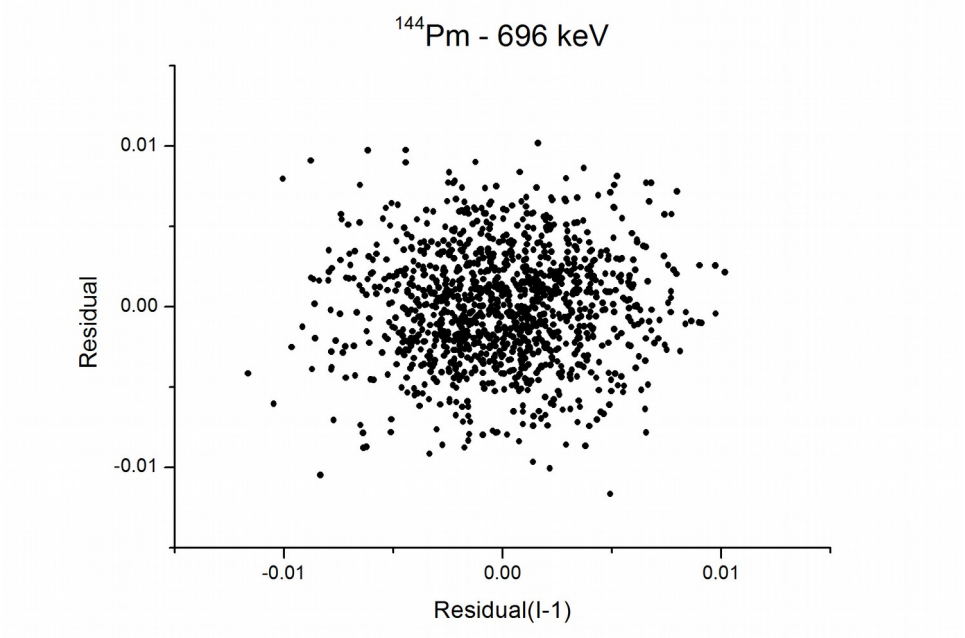
Şekil 22. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.



Şekil 23. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.



Şekil 24. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.

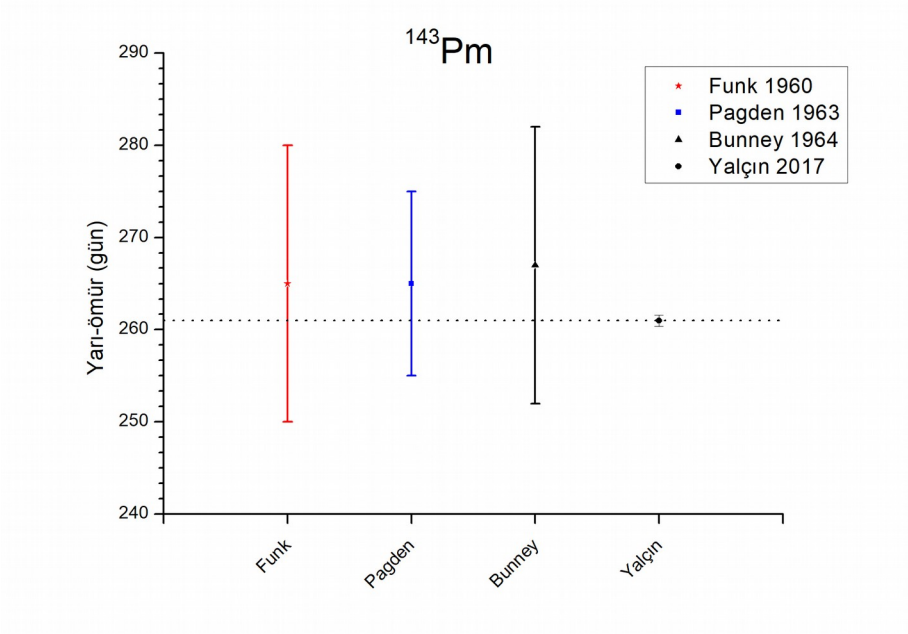


Şekil 25. Kocaeli Üniversitesi Nükleer Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ^{144}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümünün Lag grafiği.

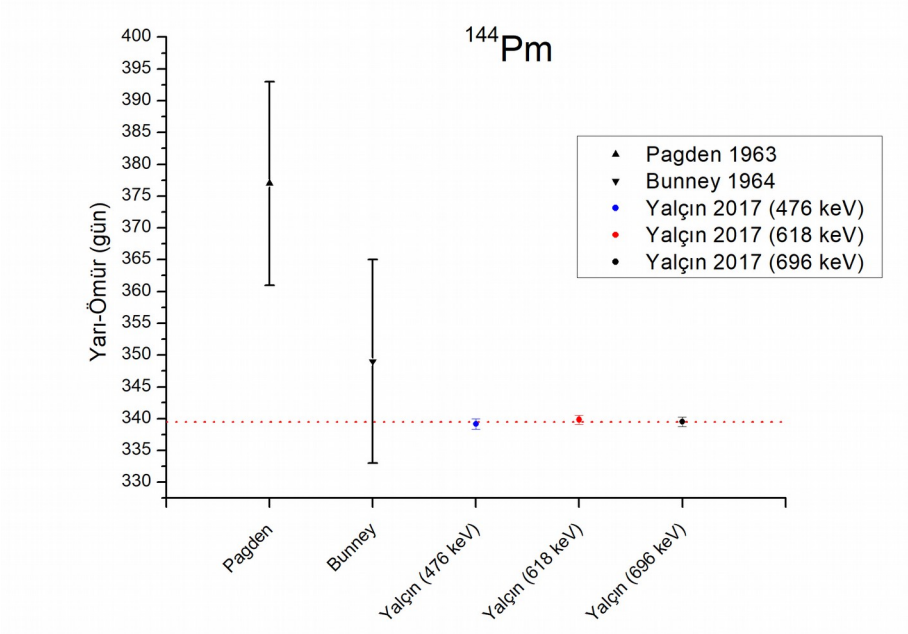
Bütün bu incelemeler sonucunda hesaplanan yarı-ömür değerlerinin belirsizliği hesaplanırken Bulgular bölümünde verilen istatistiksel hatalara, verimden kaynaklan % 0.15, ölü-zaman düzeltmesi için %0,05 ve bunların dışında kalan diğer hata kaynakları için %0,1 hata eklenmiştir. Sonuç olarak elde edilen yarı-ömür değerleri ve literatürdeki değerler Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda ^{144}Pm izotopu için verilen yarı-ömür değeri, 3 ayrı gama ışınıyla gerçekleştirilen ölçümlerin ağırlıklı ortalaması alınması ile bulunmuştur. Şekil 26 ve 27'de görülen noktalı çizgi ölçülen yarı-ömür değerlerinin ağırlıklı ortalamasını göstermektedir.

Tablo 5. ^{143}Pm ve ^{144}Pm izotopları için ölçülen yarı-ömür ve literatürdeki diğer ölçüm sonuçları.

İzotop	Yarı-Ömür (gün)	Belirsizlik (gün)	Belirsizlik (%)	Referans
^{143}Pm	**261,00**	**0,62**	**0,24**	**Yalçın 2017**
	265	10	3,77	Pagden 1963
	267	15	5,62	Bunney 1964
	265	15	5,66	Funk 1960
Önerilen Değer	265	7		NNDC - ENSDF
^{144}Pm	**339,50**	**0,43**	**0,13**	**Yalçın 2017**
	377	16	4,24	Pagden 1963
	349	16	4,58	Bunney 1964
Önerilen Değer	363	14	3,8	NNDC - ENSDF



Şekil 26. ^{143}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümü ve literatürdeki diğer ölçümlerle karşılaştırılması.



Şekil 27. ^{143}Pm izotopunun yarı-ömür ölçümü ve literatürdeki diğer ölçümlerle karşılaştırılması.

Tablo 5'ten ve Şekil 26 ve 27'den görüleceği üzere, bu proje ile literatürde bulunan ölçümlerin belirsizlikleri iki mertebe daha düşürülmüştür. Proje önerisinde öngörülen ve belirsizliklerin %1'in altına indirilmesi hedefi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu proje ile elde edilen hassas yarı-ömür ölçümleri ile sonraki aşamada gerçekleştirilmesi planlanan tesir kesiti ölçümlerinde kullanılarak, daha duyarlı tesir kesiti ölçümlerinin önünü açmıştır. Ayrıca bu proje ile kazanılan deneyim bundan sonra gerçekleştirilecek yarı-ömür çalışmalarını da hızlandıracaktır. Türkiye Atom Enerjisi, Sarayköy Araştırma Merkezinde bulunan proton hızlandırıcısının araştırma için ayrılan demet hatları bilim insanlarının kullanımına açıldığında buna benzer bir çok projenin gerçekleşmesi muhtemeldir.

KAYNAKLAR

[1] Yalçın, C., Güray, R.T., Özkan, N., Kutlu, S., Gyürky, Gy., Farkas, J., Kiss, G.G., Fülöp, Zs., Simon, A., Somorjai E., and Rauscher, T., "Odd p isotope In-113: Measurement of Alpha-Induced Reactions", ***Physical Review C***, 79, 065801 (2009).

[2] Sauerwein, A., Becker, H. -W., Dombrowski, H., Elvers, M., Endres, J., Giesen, U., Hasper, J. Hennig, A., Netterdon, L., Rauscher, T., Rogalla, D., Zell, K. O., Zilges, A., "Determination of Pr-141(alpha, n)Pm-144 cross sections at energies of relevance for the astrophysical p process using the gamma gamma coincidence method", ***Physical Review C***,, 84, 045808, (2011).

[3] Pagden, I.M.H., Jakeways, R., Flack, F.C., "The decays of Pm143, Pm144 and Pm146", **Nucl. Phys.,** 48, 555 (1963).

[4] Bunney, L.R., Scadden, E.M., "Half-lives of 143Pm and 144Pm", **J. Inorg. Nucl. Chem.,** 26, 1795 (1964).

[5] Funk, E.G., Mihelich, J.W., Schwerdtfeger, C.F., "Radioactive Decay of Pm143, Pm144, and Pm146", **Phys. Rev.,** 120, 1781 (1960).

[6] Fowler, W.A., "Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the origin of the elements", ***Rev. Mod. Phys***., 56, 149–179 (1984).

[7] Özkan N., "Activation method for cross section measurements related to the p-process nucleosynthesis", ***Proceedings of Science***, ***PoS(NIC IX)*** Part 2, 833-837 (2006).

[8] Hauser, W., Fesbach, H., "The inelastic scattering of neutrons", ***Phys. Rev.***, 87, 366 (1952).

[9] Rauscher, T., Thielemann, F.-K., "Astrophysical reaction rates from statistical model calculation", ***At. Data Nucl. Data Tabl.*** 75 (2000).

[10] Chloupek, F.R., Murphy, A.S.J., Boyd, R.N., Cole, A.L., Görres, J., Güray, R.T., Raimann, G., Zach, J.J., Rauscher, T., Schwarzenberg, J.V., Tischhauser, P., and M.C., Wiescher, "Measurements of proton radiative capture cross sections relevant to the astrophysical rp- and γ-processes", ***Nucl. Phys. A,*** 652, 391 (1999).

[11] Harissopulos, S., Skreti, E., Tsagari, P., Souliotis, G., Demetriou, P., Paradellis, T., Hammer, J.W., Kunz, R., Angulo, C., Goriely, S., and Rauscher, T., "Cross section measurements of the $_{93}$Nb(p,γ)$_{94}$Mo reaction at E_p=1.4–4.9 MeV relevant to the nucleosynthetic p process" ***Phys. Rev. C,*** 64, 055804 (2001).

[12] Sauter, T., and Käppeler, F., "(p,γ) rates of $_{92}$Mo, $_{94}$Mo, $_{95}$Mo, $_{98}$Mo: Towards an experimentally founded database for p-process studies", ***Phys. Rev. C***, 55, 3127 (1997).

[13] Gyürky, Gy., Kiss, G.G., Elekes, Z., Fülöp, Zs., Somorjai, E., Palumbo, A., Görres, J., Lee, H.Y., Rapp, W., Wiescher, M., Özkan, N., Güray, R.T., Efe, G., Rauscher, T., "α-induced cross sections of $_{106}$Cd for the astrophysical p process", ***Phys. Rev. C***, 74, 025805 (2006).

[14] Özkan, N., Efe, G., Güray, R.T., Palumbo, A., Görres, J., Lee, H.Y., Lamm, L.O., Rapp, W., Stech, E., Wiescher, M., Gyürky, Gy., Fülöp, Zs., and Somorjai, E., "Astrophysical *S* factor for α-capture on $_{112}$Sn in the p-process energy range", ***Phys. Rev. C***, 75, 025801 (2007).

[15] Somorjai, E., Fülöp, Zs., Kiss, A.Z., Rolfs, C.E., Trautvetter, H.P., Greife, U., Junker, M,. Goriely, S., Arnould, M., Rayet, M., Rauscher, T., and Oberhummer, H., "Experimental cross section of $_{144}$Sm(α, γ)$_{148}$Gd and implications for the p-process", ***Astron. Astrophys***., 333, 1112 (1998).

[16] Gyürky, Gy., Rastrepina, G., Elekes, Z., Farkas, J., Fülöp, Zs., Kiss, G.G., Somorjai, E., Szücs, T., "Precise half-life measurement of the 10 h isomer in 154Tb", **Nuclear Physics A**, 828, 1–8, (2009).

[17] Farkas, J., Gyürky, Gy., Halasz, Z., Szücs, T., Fülöp, Zs., Somorjai, E., "Half-life measurement of 133mCe with γ-spectrometry", **Eur. Phys. J. A,** 47, 7, (2011).

[18] Rolfs C.E., Rodney W.S., "Couldrons in the Cosmos", ***Univ. of Chicago Press***, (1988).

[19] Iliadis, C., "Nuclear Physics in Stars", ***Wiley-VCH,*** (2007).

[20] Gyürky, Gy., Fülöp, Zs., Somorjai, E., Kokkoris, M. Galanopoulos, S., Demetriou, P., Harissopulos, S., Rauscher, T. and Goriely, S., "Proton induced reaction cross section measurements on Se isotopes for the astrophysical p process" ***Phys. Rev. C,*** 68, 055803 (2003).

[21] Gyürky, Gy., Somorjai, E., Fülöp, Zs., Harissopulos, S., Demetriou, P. and Rauscher T., "Proton capture cross section of Sr isotopes and their importance for nucleosynthesis of proton-rich nuclides", ***Phys. Rev. C,*** 64, 065803 (2001).

1001BF-01 Güncelleme Tarihi: 27/05/2013

[22] Galanopoulos, S., Demetriou, P., Kokkoris, M., Harissopulos, S., Kunz, R., Fey, M., Hammer, J.W., Gyürky, Gy., Fülöp, Zs., Somorjai, E. and Goriely, S., "The $_{88}$Sr(p,γ)$_{89}$Y reaction at astrophysically relevant energies", ***Phys. Rev. C,*** 67, 015801 (2003).

[23] Tsagari, P., Kokkoris, M., Skreti, E., Karydas, A.G., Harissopulos, S., Paradellis, T.,and Demetriou, P., "Cross section measurements of the $_{89}$Y(p,γ)$_{90}$Zr reaction at energies relevant to p-process nucleosynthesis", ***Phys. Rev. C,*** 70, 015802 (2004).

[24] Laird, C.E., Flynn, D., Hershberger, R.L., and Gabard, F., "Proton-$_{90}$Zr interaction at sub-Coulomb proton energies", ***Phys. Rev. C***, 35, 1265 (1987).

[25] Fülöp, Zs., Kiss, A.Z., Somorjai, E., Rolfs, C.E., Trautvetter, H.P., Rauscher, T., and Oberhummer, H., "$_{70}$Ge(α,γ)$_{74}$Se cross section measurements at energies of astrophysical interest", ***Z. Phys. A,*** 355, 203 (1996).

[26] Rapp, W., Heil, M., Hentschel, D., Käppeler, F., Reifarth, R., Brede, H.J., Klein, H., and Rauscher, T., "á- and neutron-induced reactions on ruthenium isotopes" ***Phys. Rev C,*** 66, 015803 (2002).

[27] Basunia, M.S., Shugart, H.A., Smith, A.R., and Norman, E.B., "Measurement of cross sections for α-induced reactions on $_{197}$Au and thick-target yields for the (α,γ) process on $_{64}$Zn and $_{63}$Cu", ***Phys. Rev. C,*** 75, 015802 (2007).

[28] Bork, J., Schatz, H., Käppeler, F., and Rauscher, T., "Proton capture cross sections of the ruthenium isotopes", ***Phys. Rev. C***, 58, 524 (1998).

[29] Özkan, N., Murphy, A.S.J., Boyd, R.N., Cole, A.L., Famiano, M., Gray, R.T., Howard, M., Sahin, L., Zach, J.J., Haan, de R., Görres, J., Wiescher, M.C., Islam, M.S., and Rauscher, T., "Cross section measurements of the $_{102}$Pd(p,γ)$_{103}$Ag, $_{116}$Sn(p,γ)$_{117}$Sb, and $_{112}$Sn(α,γ)$_{116}$Te reactions relevant to the astrophysical rp- and γ-processes", ***Nucl. Phys. A***, 710, 469 (2002).

[30] Güray, R.T., Özkan, N., Yalçın, C., Palumbo, A., deBoer, R., Görres, J., Leblanc, P.J., O'Brien, S., Strandberg, E., Tan, W.P., Wiescher, M., Fülöp, Zs., Somorjai, E., Lee, H.Y., Greene, J.P., "Measurements of proton-induced reaction cross sections on $_{120}$Te for the astrophysical p-process", ***Physical Review C***, 80, 035804 (2009).

[31] Gyürky, Gy., Elekes, Z., Farkas, J., Fülöp, Zs., Halász, Z., Kiss, G. G., Somorjai, E., Szücs., T., Güray, R. T., Özkan, N., Yalçın C., Rauscher, T., "Alpha-induced reaction cross section measurements on 151Eu for the astrophysical gamma-process", ***Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics***, 37, 115201 (2010).

[32] Galaviz, D., Fülöp, Zs., Gyürky, Gy., Mate, Z., Mohr, P., Rauscher, T., Somorjai, E., Zilges, A., "Elastic α scattering on $_{112}$Sn and $_{124}$Sn at astrophysically relevant energies***", Phys. Rev. C,*** 71, 065802 (2005).

[33] Gyürky, Gy., Farkas, J., Halasz, Z., Szücs, T., "Half-life measurementof 66Ga with g-spectroscopy", **Applied Radiation and Isotopes**, 70, 278–281, (2012).

[34] National Nuclear Data Center, information extracted from the NuDat2 database, http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/

[35] Woods, M.J., Collins, S.M., "Half-life data—a critical review of TECDOC-619 update", Applied Radiation and Isotopes 60, 257–262, (2004).

[36] "REGULATIONS FOR THE SAFE TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIAL", INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X, no. TS-R-1 VIENNA, (2005).

[37] Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumusoglu, N.T., Korkmaz, F., Karahan G., Çevik, U. , "Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına Valley (Rize, Turkey)" , Applied Radiation and Isotopes, Volume 65, Issue 11, Pages 1281–1289, (2007).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. CANER YALÇIN
Proje No:	114F487
Proje Başlığı:	Pm-143 Ve Pm-144 İzotoplarının Duyarlı Yarı-Ömür Ölçümleri
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	RECEP TAYGUN GÜRAY, NALAN ÖZKAN GÜRAY
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KOCAELİ Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2015 - 01/05/2017
Onaylanan Bütçe:	97110.0
Harcanan Bütçe:	43136.99
Öz:	Radyoaktif izotopların yarı-ömürlerinin duyarlı olarak ölçülmesi, nükleer fizikte yapılan bir çok çalışma için önemlidir. Yarı-ömür özellikle aktivasyon yöntemi ile yapılan tesir kesiti ölçümlerinde, tesir kesiti değerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden duyarlı tesir kesiti ölçümleri için, yarı-ömür ölçümlerinin doğruluğu ve bu ölçümlerdeki belirsizliklerin düşük olması ön koşuldur. Reaksiyon tesir kesitlerinin duyarlı olarak bilinmesi ise Element Sentezi Teorisinde hayati öneme sahiptir. Çünkü, elementlerin sentezlenmesini modelleyen reaksiyon networklarında girdi olarak kullanılan reaksiyon hızları, tesir kesiti değerlerinden hesaplanmakta ve doğru olmayan tesir kesiti değerleri ve tesir kesitindeki belirsizlikler bu hesaplamalara da yansımakta ve hatalı sonuçların oluşmasına neden olmaktadır. 142Nd(p,?)143Pm ve 143Nd(p,?)144Pm reaksiyonlarının tesir kesitinin ölçülebilmesi için 143Pm ve 144Pm izotoplarının yarı-ömürlerinin duyarlı olarak ölçülmesi gereklidir. 143Pm ve 144Pm izotoplarının yarı-ömürleri 261,00 ± 0,62 gün ve 339,50 ± 0,43 gün olarak ölçülmüş ve literatürde bulunan ölçümlerin belirsizlikleri oldukça düşürülmüştür.
Anahtar Kelimeler:	Yarı-ömür, Tesir Kesiti, Aktivasyon, Pm-143, Pm-144, Nükleer Astrofizik, Çekirdek Sentezi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK