

## Klinik Linear Hızlandırıcı Kullanılarak $^{99}\text{Mo}$ Radyoizotopunun Yarı-Ömür Tayini

Mehmet Ertan Kürkcüoğlu<sup>1,\*</sup>, Tuğba Göker<sup>1</sup>

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

\*yazışılan yazar e-posta: ertankurkcuglu@sdu.edu.tr

Alınış: 02 Ekim 2016, Kabul: 17 Kasım 2016

**Özet:** Radyoizotopların yarı-ömürlerinin belirlenmesi, çekirdek yapılarının aydınlatılmasında önemli bir yere sahiptir. İlk defa bir klinik linear hızlandırıcı kullanılarak  $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$  fotonükleer reaksiyonunun gerçekleştirildiği bu çalışmayla üretilen  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopunun yarı-ömrü belirlenmiştir. Yüksek saflıkta Germanium dedektöre sahip bir gama spektrometresi vasıtasıyla elde edilen  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopuna ait spektrum, MAESTRO, gf3 ve ROOT yazılımları kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel verilerle hesaplanan yarı-ömür değerinin (64,44saat) daha önceki araştırma sonuçlarıyla ve uluslararası Nükleer Veri Tabanı, NuDat'taki güncel yarı-ömür değeriyle (65,98 saat) uyumlu olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, fotonükleer reaksiyon mekanizmasıyla incelenebilecek orta ağırlıktaki radyoizotopların yeterli çıkış enerjisine sahip bir c-linak kullanılarak çalışılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** c-linak, fotonükleer reaksiyon,  $^{99}\text{Mo}$ , yarı-ömür

## Determination of the Half-Life of Molybdenum-99 Radioisotope by Using Clinical Linear Accelerator

**Abstract:** Determination of the half-lives of the radioisotopes has an importance for understanding about the nuclear structure. In this work,  $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$  photonuclear reaction was studied for the first time by using a clinical linear accelerator and the half-life of  $^{99}\text{Mo}$  radioisotope was determined. The spectrum of  $^{99}\text{Mo}$  radioisotope was obtained by using a gamma spectrometer with a high purity Germanium detector. Then, the spectrum was analyzed by using MAESTRO, gf3 and ROOT software. It was found that, the calculated half-life value from the experimental data (64.44 h) agreed with the results of the previous studies and the reported half-life value in Nuclear Data Database, NuDat(65.98 h). As a conclusion, it has been shown that, the photonuclear reaction mechanism for medium weight radioisotopes can be studied by using a c-linac, which has suitable end point energy.

**Key words:** c-linac, photonuclear reaction,  $^{99}\text{Mo}$ , half-life

### 1. Giriş

Radyoizotoplar, endüstri, bilim, nükleer tıp uygulamaları başta olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle, radyoizotop üretimi popüler olarak çalışılan bir konudur. Hedef odaklı araştırmalar için en uygun çekirdeğin seçilebilmesi ancak çekirdek yapısının daha iyi anlaşılması ile mümkündür. Nükleer yapı hakkında detaylı bilgilerin elde edilmesinde, çekirdeklerin yarı-ömürlerinin belirlenmesi önemli bir yer tutar. Bir foton ( $\gamma$ -ışını) tarafından uyarılan hedefteki bir çekirdeğin kararlı hale dönebilmek için parçacık veya foton salma olayı olarak nitelendirilen fotonükleer reaksiyon mekanizması sonucu, elde edilen ürün çekirdeğin yarı-ömrünün tayin edilebilmesi mümkündür. 1966 yılında Oka ve arkadaşları tarafından, 75 farklı çekirdek üzerinde fotonükleer analiz gerçekleştirilmesi ve ürün çekirdeklerine ait enerji seviyeleri ile yarı-ömürlerin belirlenmesi, bu alanda yapılmış en kapsamlı ilk çalışma olarak bilinmektedir [1]. Bu yöntem kullanılarak, nötron koparma enerjileri düşük olan ağır çekirdeklerin yer aldığı fotonükleer reaksiyon deneyleri günümüze dek defalarca

çalışılmış ancak, nötron koparma enerjileri daha yüksek olan orta ağırlıktaki çekirdekler daha az araştırılmıştır.

42 atom numarasına sahip olan molibden (Mo) elementi, 95,95 g/mol atom ağırlığıyla orta ağırlıktaki elementler arasında yer alan geçiş metallerindedir (saf haldeyken gümüşümsü renkte ve çok sert bir elementtir) [2]. Molibden yüksek erime (2623 °C) ve kaynama (4639 °C) noktası, yüksek ısı iletkenlik (138 W/(mK), 20 °C sıcaklıkta) ve düşük ısı genleşme (4,8µm/(mK), 20 °C sıcaklıkta) gibi üstün özelliklere sahip olup yoğunluğu 10,28 g/cm<sup>3</sup>'tür [3,4]. Kendiliğinden ışımaz. Bilinen 35 izotopu (kütle numarası 83 ile 117 arasında değişen) ve 4 yarı-kararlı izomeri vardır[5].

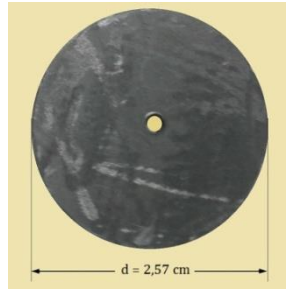
Spesifik olarak <sup>99</sup>Mo üretimi (nükleer tıptaki teşhis işlemlerinin büyük bir bölümünde yaygın olarak kullanılan Teknesyum-m99 izotopunun elde edilebilmesi bakımından) ayrı bir öneme sahiptir [6-8]. Fotonükleer reaksiyon mekanizmasıyla, doğal Molibden hedeften, <sup>99</sup>Mo üretimi çalışmaları 90'lı yıllardan sonra tercih edilmeye başlanmış [9, 10] ve 1998'de patentlenmiştir [11].

Günümüze dek pek çok çekirdek için farklı hızlandırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen fotonükleer reaksiyonlar [6,7,12-15], son yıllarda c-linaklarla (klinik lineer hızlandırıcılarla) çalışılmaya başlanmıştır [16-21]. Bununla birlikte, <sup>99</sup>Mo radyoizotopunun bir c-linak kullanılarak elde edilmesine dair, literatürde yer alan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bir doğal Molibden hedefin Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki (NUBA'daki) c-linak kullanılarak ışınlanması sonucu gerçekleştirilen <sup>100</sup>Mo(γ,n)<sup>99</sup>Mo fotonükleer reaksiyonunun incelendiği bu çalışmanın izleyen bölümünde kullanılan yöntem tanıtılmaktadır. Daha sonra, <sup>99</sup>Mo radyoizotopuna ait yarı-ömrün belirlenmesine yönelik analiz aşamaları sunulmakta ve elde edilen sonuçlar literatür verileriyle karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır.

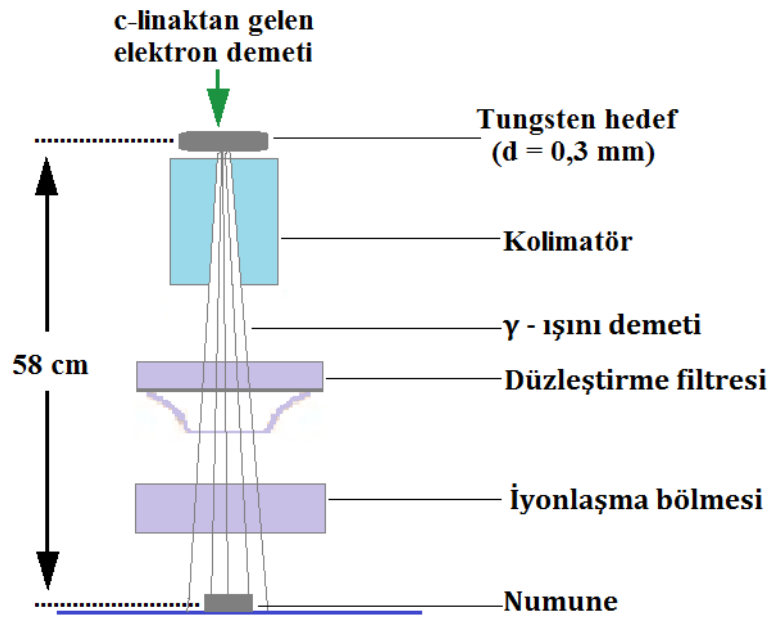
## 2. Materyal ve Metot

Doğal Molibden; <sup>92</sup>Mo (%14,77), <sup>94</sup>Mo (%9,23), <sup>95</sup>Mo (%15,90), <sup>96</sup>Mo (%16,68), <sup>97</sup>Mo (%9,56), <sup>98</sup>Mo (%24,19) ve <sup>100</sup>Mo (%9,67) kararlı izotoplarının karışımından oluşmaktadır [22]. Işınlama işlemi için %99,95 saflıktaki doğal Molibden levhadan 1,285 cm yarıçap ve 1 mm kalınlığa sahip disk şeklinde bir numune hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Işınlama işlemi için hazırlanmış doğal molibden numune

NUBA'da bulunan, Philips SLI-25 marka c-linak [23] içerisinde üretilen elektron demeti bir Tungsten hedefe çarptırılarak bremsstrahlung ışınması gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bremsstrahlung fotonları c-linak içerisinde çeşitli filtrelerden geçirilerek yönlendirilmiş, böylece en fazla ışınlama alanına ulaşılması sağlanmıştır (cihazın ışınlama alanı, 100 cm mesafedeki bir örnek için 40cm×40cm boyutuna çıkarılabilmektedir). Işınlama başlatılmadan önce ışın kaynağından 58 cm uzaklığa yerleştirilen hedef, 18 MeV çıkış enerjisine kadar ulaşabilen bremsstrahlung fotonlarıyla 1 saat boyunca ışınlanmıştır (toplamda 10<sup>4</sup>Monitor Unit). Deneysel düzeneğin yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Molibden numunenin c-linaktan gelen bremsstrahlung fotonlarıyla ışınlanması için kullanılan düzenek.

Işınlama işlemi sonrasında hiç bir kimyasal işleme tabi tutulmayan numune için AMATEK-ORTEK marka (GEM40P4-83) [24], elektrik soğutmalı, p tipi, yüksek saflıkta Germanyum dedektörü (HPGe) ile çalışan bir gama spektrometresi vasıtasıyla 3 gün boyunca spektrometrik ölçümler alınmıştır. Dedektörün bağıl verimi %40 düzeyinde olup spektrometre, her biri 0,33954 keV genişlikte olan 8192 kanallı bir analizöre sahiptir [19]. Cihazın kalibrasyonu, 81 keV ile 1332 keV arasında gama ışını yayan (<sup>22</sup>Na, <sup>54</sup>Mn, <sup>57</sup>Co, <sup>60</sup>Co, <sup>109</sup>Cd, <sup>133</sup>Ba ve <sup>137</sup>Cs izotoplarını içeren) kaynaklar kullanılarak yapılmıştır. Spektrometrik ölçüm verilerinin derlenmesi MAESTRO yazılımı [25] ile gerçekleştirilmiştir. MAESTRO yazılımından alınan sayımlar için pik analizi RadWare kodu [26] kullanılarak, enerji kalibrasyonu ise ROOT [27] programıyla yapılmıştır. Bu işlemler sayesinde elde edilen net sayımların yer aldığı spektrumda, <sup>99</sup>Mo çekirdeğine ait farklı enerjideki fotopiklerin analizi mümkün hale gelmektedir. Aynı enerji düzeyine ait birden fazla pik gözlenmesi durumunda değerlendirme, aritmetik ortalama üzerinden yapılmaktadır. Kullanılan veri analiz yöntemine ait daha detaylı bilgiye Boztosun ve arkadaşlarının 2015 yılındaki çalışmasından [19] ulaşılabilir.

### 3. Bulgular

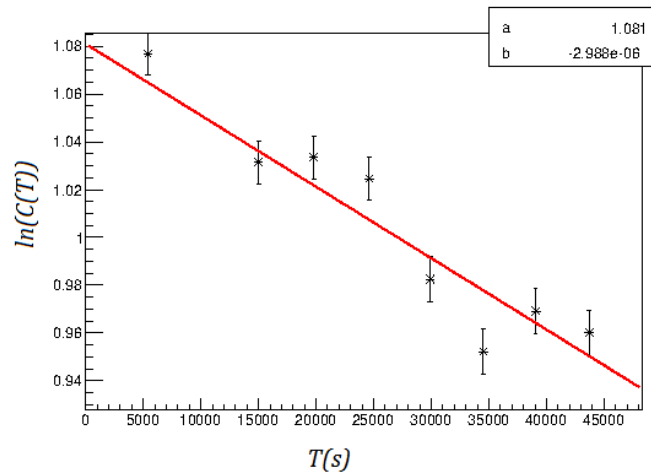
Bu çalışmanın amacı,  $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$  fotonükleer reaksiyonu ile üretilen  $^{99}\text{Mo}$  çekirdeğine ait yarı-ömür değerinin belirlenmesidir.  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopunun bozunma sürecinde yayımlanan gama ışınlarına ait enerji spektrumu, ışınlama öncesi ve ışınlama sonrası kalibrasyon ölçümleri ve fon seviyesi sayımları dikkate alınarak gf3 RadWare ve ROOT programlarıyla analiz edilmiştir. Spektrumdaki net pik alanı ile aktivite arasındaki ilişkiden yararlanılarak bozunma sabitine, buradan da yarı-ömür hesabına gidilmiştir. Yarı-ömrün hesaplanmasına, zamanın bir fonksiyonu olan bozunmanın ölçülmesi ile başlanır. Bunu aktiviteye,

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

ifadesiyle üstel bir bozunma eğrisi olarak fitlemek mümkündür. Bu işlem fitleri doğrudan sayımları temsil eden aktivitenin integraliyle ilişkilendirilerek yapılmak istendiğinde, her bir ardışık adımda, bağımsız olarak piklerin fitlenmesi, hatalarda belirsizliğe yol açar [19]. Bu yüzden aktivitenin eşit büyüklükte zaman adımlarına göre integrasyonu daha iyi bir yaklaşım elde edilebilir.

$$C(T) = \int_{T-\Delta T}^{T+\Delta T} A(t)dt = C_0 e^{-\lambda T} (e^{\lambda \Delta T} - e^{-\lambda \Delta T}) \quad (2)$$

Burada;  $C_0=A_0/\lambda$  ve  $T$  sayım zamanıdır.  $\Delta T$  sabit olduğu sürece, fonksiyon sadece üstel olarak  $T$ 'ye bağlıdır.  $\Delta T$  boyutunda bağımsız spektrum parçaları ele alınarak ve her bir zaman adımı sonunda yeniden sayıma başlanarak analiz yapıldığında, ardışık iki spektrum parçası için elde edilen sayımlar birbiri ile ilişkili olmaz ve bu yolla elde edilen sayım hataları birbirinden bağımsız hale gelir. Eşitlik 2'nin logaritması alınarak fitleme işleminin daha sade bir formda ifade edilebilmesi mümkündür. Bu durumda  $\lambda$ , bozunma sabitinin hesaplanabileceği lineer, basit bir fit elde edilir (Şekil 3). Sayımları temsil eden  $\ln(C(T))$  niceliğinin sayım zamanı  $T$ 'ye göre değişimini veren Şekil 3'te, lineer fitin eğimi  $b$  parametresi ile gösterilmekte ve  $\ln(C_0)$  ise  $a$  parametresi ile temsil edilmektedir (fitin eğimi hesaplamalarda, ROOT programı tarafından otomatik olarak belirlenmekte ve bozunma sabiti olarak atanmaktadır).



Şekil 3. Hesaplama sonuçlarına göre çizdirilen yarı-ömür grafiği

Bozunma sabiti belirlendikten sonra,

$$T_{1/2} = \ln 2/\lambda \quad (3)$$

bağıntısından yararlanılarak yarı-ömür  $T_{1/2} = 231977$  saniye (~64,44 saat) olarak belirlenmiştir.  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopunun yarı-ömrü için ulaştığımız sonuç, bu konuda daha önce yapılmış çalışma sonuçlarıyla birlikte Tablo 1’de tarihsel olarak sunulmaktadır.

**Tablo 1.**  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopu için yarı-ömür tayinine yönelik yapılmış çalışmalar ve sonuçları

$T_{1/2}$ (h)	Hata Oranı	Çalışma Tarihi	Kaynak
66,00	0,01	1947	[28]
		2000	[29]
66,96	0,09	1957	[30]
66,00	0,15	1957	[31]
67,20	0,02	1958	[32]
65,60	0,02	1961	[33]
		1970	[34]
66,70	0,01	1965	[35]
65,93	0,24	1967	[36]
65,95	0,04	1967	[36]
65,98	0,10	1967	[36]
66,69	0,06	1968	[37]
66,50	0,02	1971	[38]
66,02	0,01	1972	[39]
66,16	0,30	1979	[40]
65,95	0,03	1980	[41]
65,92	0,06	1982	[42]
65,94	0,12	1983	[43]
66,70	0,01	1990	[44]
65,92	0,05	2002	[45]
65,97	0,14	2004	[46]
65,98*	0,24	2004	[47]
			[48]
64,44	4,57	2016	bu çalışma

\*NuDat veri tabanındaki güncel yarı-ömür değeri.

#### 4. Sonuç

$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$  fotonükleer reaksiyonu bir c-linak kullanılarak ilk defa çalışılmıştır. Üretilen  $^{99}\text{Mo}$  radyoizotopuna ait deneysel yarı-ömür değeri  $64,44 \pm 4,57$  saat olarak tespit edilmiştir. Yarı-ömür değeri, önceki araştırma bulgularından biraz daha düşük olsa da literatürle uyumludur. Ancak, hata oranı beklenenin oldukça üzerindedir. Aradaki farkın başlıca nedeni, ölçüm alımının son aşamasındaki kesinti ve ışınlama işleminin sonlandırılmasıyla spektrometrik ölçüme başlanması arasında geçen ~15 dakikalık kayıp zamandır. Dolayısıyla, 15 dakikadan daha kısa yarı-ömre sahip enerji seviyelerine ait pikler spektrumda gözlenemediğinden yarı-ömür hesaplamalarına dâhil edilememişlerdir. Kesintinin etkisi ise daha çok, tüm ölçüm adımları üzerinden yapılan hata oranı hesaplamalarına yansımıştır. Öte yandan, katkısı az olmakla birlikte,

dedektörün ölü zamanından kaynaklanan % 2'lik etki hesaplamalarımıza dâhil edilerek gerekli düzeltmeler yapılmıştır. C-linakların araştırma amaçlı kullanımını ön plana çıkaran bu yeni yöntem, ışınlama ve ölçüm işlemlerinin optimizasyonu, kayıp zamanın azaltılması gibi sistemsel düzenlemelerle orta ağırlıktaki çekirdeklere ait fotonükleer reaksiyonların çalşılablmesini mümkün kılmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Tuğba Göker'in yüksek lisans çalışmasının bir parçasıdır ve Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı tarafından 3882-YL1-14 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, Süleyman Demirel Üniversitesi'ne ve ölçümlerin gerçekleştirilme aşamasındaki katkılarından dolayı Prof. Dr. İsmail Boztosun, Yrd. Doç. Dr. Haris Djapo ve Akdeniz Üniversitesi NUBA çalışanlarına teşekkür eder.

## Kaynaklar

- [1] Oka Y., Kato T., Nomura K., Saito T., 1967. Gamma-ray spectrometric study of the photo activation products with 20 MeV bremsstrahlung, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 4 (7): 346-352.
- [2] Meija J., Coplen T.B., Berglund M., Brand W.A., De Bièvre P., Gröning M., Prohaska, T., 2016. Atomic weights of the elements (2013 IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 88 (3): 265-291.
- [3] Lide D.R., 1994. CRC handbook of chemistry and physics, *Chemical Rubber Publishing Company*, USA, p. 2531.
- [4] Lindemann A., Blumm J., 2009. Measurement of the thermophysical properties of pure molybdenum, In: 17<sup>th</sup> Plansee Seminar, Vol.3, Austria.
- [5] Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H., 2003. *The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties*, *Nuclear Physics A*, 729: 3-128.
- [6] Roberts A. D., Geddes C. G. R., Matlis N., Nakamura K., O'Neil J. P., Shaw B. H., Steinke S., van Tilborg J., Leemans W. P., 2015. Measured bremsstrahlung photonuclear production of <sup>99</sup>Mo (<sup>99m</sup>Tc) with 34 MeV to 1.7 GeV electrons, *Applied Radiation and Isotopes*, 96: 122-128.
- [7] Sabel'nikov A. V., Dmitriev S. N., Maslov O. D., 2000. Possibilities of <sup>99</sup>Mo (<sup>99m</sup>Tc) and <sup>237</sup>U production in photonuclear reactions in compact accelerator of electrons MT-25, *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, 252 (3): 280.
- [8] Sabel'nikov A.V., Maslov O.D., Molokanova L.G., Gustova M.V., Dmitriev S.N., 2006. Preparation of <sup>99</sup>Mo and <sup>99m</sup>Tc by <sup>100</sup>Mo ( $\gamma$ , n) photonuclear reaction on an electron accelerator, MT-25 microtron, *Radiochemistry*, 48 (2): 191-194.
- [9] Ishkhanov B.S., 2014. Photonuclear reactions on molybdenum isotopes, *Physics of Atomic Nuclei*, 77 (11): 1362-1370.
- [10] Dovbnya A.N., 2012. An increase of <sup>99</sup>Mo yield under mixed  $\gamma$ , n-irradiation of target from natural molybdenum, *Isotopes and Radiation Sources*, 45 (26): 151-154.
- [11] Lindsy L.M., Lanza R., 1998. Method of producing molybdenum-99, Patent number: 5784423.
- [12] Belic D., Besserer J., Arlandini C., de Boer J., Carroll J. J., Enders J., Hartmann T., Kappeler F., Kaiser H., Kneissl U., Loewe M., Maser H., Mohr P., von Neumann-Cosel P., Nord A., Pitz H. H., Richter A., Schumann M., Volz S., Zilges A., 2001. The new photoactivation facility at the 4.3 MV Stuttgart Dynamitron: Setup, performance, and first applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 463 (1-2): 26-41.
- [13] Masumoto K., Segebade C., 2006. Photon activation analysis, *John Wiley & Sons Ltd.*, New York.
- [14] Danon Y., Block R., Harvey J., 2010. Production of Mo-99 using 30 MeV electrons and a Mo-100 target, In: Transactions of the American Nuclear Society and Embedded Topical Meeting Isotopes for Medicine and Industry, Vol. 103, Las Vegas, pp. 1-1190.
- [15] Starovoitova V.N., Tchelidze L., Wells D.P., 2014. Production of medical radioisotopes with linear accelerators, *Applied Radiation and Isotopes*, 85: 39-44.

- [16] Eke C., Boztosun I., Dapo H., Segebade C., Bayram E., 2016. Determination of gamma-ray energies and half lives of platinum radio-isotopes by photon activation using a medical electron linear accelerator: A feasibility study, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309: 79-83.
- [17] Mohr P., Brieger S., Witucki G., Maetz M., 2007. Photoactivation at a clinical LINAC: The  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$  reaction slightly above threshold, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580 (3): 1201-1208.
- [18] Boztosun I., Dapo H., Özmen S.F., Çeçen Y., Karakoç M., Çoban A., Cesur A., Caner T., Bayram E., Keller G. B., Küçük B., Güvendi A., Derman M., Kaya D., 2014. The results of the first photonuclear reaction performed in Turkey: The zinc example, *Turkish Journal of Physics*, 38: 1-9.
- [19] Boztosun I., Dapo H., Karakoç M., Özmen S.F., Çeçen Y., Çoban A., Caner T., Bayram E., Saito T. R., Akdoğan T., Bozkurt V., Kuçuk Y., Kaya D., Narakeh M. N., 2015. Photonuclear reactions with zinc: A case for clinical linacs, *The European Physical Journal Plus*, 130: 185.
- [20] Dulger F., Akkoyun S., Bayram T., Dapo H., Boztosun I., 2015. Energy levels and half-lives of gallium isotopes obtained by photo-nuclear reaction, *Journal of Physics: Conference Series*, 590: 012051.
- [21] Aygun M., Cesur A., Dogru M., Boztosun I., Dapo H., Kanarya M., Kuluozturk M. F., Bal S. S., Karatepe S., 2016. Using a clinical linac to determine the energy levels of  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  via the photonuclear reaction, *Applied Radiation and Isotopes*, 115: 97-99.
- [22] Anbar A.D., Knab K.A., Barling J., 2001. Precise determination of mass-dependent variations in the isotopic composition of molybdenum using MC-ICPMS, *Analytical Chemistry*, 73(7): 1425-1431.
- [23] Elekta, Elekta Digital Accelerator, 2003. General Introduction Page. <https://www.elekta.com/services/education-and-training.html> Erişim Tarihi: 15.05.2014.
- [24] Ortec, 2010. Manual. <http://www.ortec-online.com/Service-Support/Library/Manuals.aspx> (Erişim Tarihi: 20.12.2014).
- [25] Maestro-32, 2012. Guide. <http://www.ortec-online.com/download/A65-B32-MAESTRO-32-Emulation-Software.pdf> (Erişim Tarihi: 20.12.2014).
- [26] Radford DC, 2000. Notes On The Use Of The Gf3. <http://radware.phy.ornl.gov/gf3/gf3.html> (Erişim Tarihi: 15.10.2014).
- [27] Brun R., Rademakers F., 1997. ROOT-An object oriented data analysis framework, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389 (1): 81-86.
- [28] Seiler J.A., 1947. Early drama, art, and music monograph series, Vol. 17 Report ANL-4000, Argonne National Laboratory, p. 119.
- [29] Chechev V.P., Egorov A.G., 2000. Search for an optimum approach to the evaluation of data of varying consistency: half-live evaluations for  $^3\text{H}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{99}\text{Mo}$  and  $^{111}\text{In}$ , *Applied Radiation and Isotopes*, 52(3): 601-608.
- [30] Wright H.W., Wyatt E.I., Reynolds S.A., Lyon W.S., Handley, T.H., 1957. Half-lives of radionuclides-I, *Nuclear Science and Engineering*, 2 (4): 427-430.
- [31] Gunn S.R., Hicks H.G., Levy H.B., Stevenson P.C., 1957. Calorimetric determination of the average total kinetic energy of fragments from fission of  $\text{U}^{235}$ , *Physical Review*, 107(6): 1642.
- [32] Protopopov A.N., Tolmachev G.M., Ushatskii V.N., Venediktova R.V., Krisiuk I.S., Rodionova L. P., Iakovleva G.V., 1958. Distribution of fragments by mass in fission of  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{U}^{238}$  and  $\text{Pu}^{239}$  by neutrons of 14.6 MeV energy, *The Soviet Journal of Atomic Energy*, 5(2): 963-968.
- [33] Newman R.D., 1961. Half-lives of I-132, Mg-28, Tc-99m, Mo-99 and Al-28, In: Private Communication, Pennsylvania.
- [34] Martin M.J., Blichert-Toft P.H., 1970. Radioactive atoms: Auger-electron,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -, and X-ray data, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 8(1): 1-198.
- [35] Crowther P., Eldridge J.S., 1965. Decay of  $^{99}\text{Mo}$  -  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , *Nuclear Physics*, 66(2): 472-480.
- [36] Baldwin M.N., 1967. Molybdenum-99 half-life determination, *Nuclear Science and Engineering*, 30 (1): 144.
- [37] Reynolds S.A., Emery J.F., Wyatt E.I., 1968. Half-lives of radionuclides-III, *Nuclear Science and Engineering*, 32 (1): 46-48.
- [38] Baba S., Baba H., Natsume H., 1971. Half-lives of some fission product nuclides, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 33 (2): 589-595.

- [39] Emery J.F., Reynolds S.A., Wyatt E.I., Gleason G.I., 1972. Half-lives of radionuclides-IV, *Nuclear Science and Engineering*, 48 (3): 319-323.
- [40] Dickens J.K., 1979. Half life of  $^{132}\text{Te}$ , *Radiochemical and Radioanalytical Letters*, 39 (2): 107-119.
- [41] Houtermans H., Milosevic O., Reichel F., 1980. Half-lives of 35 radionuclides, *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 31(3): 153-154.
- [42] Hoppes D.D., Hutchinson J.M.R., Schima F. J., Unterweger M.P., 1982. Nuclear data for X-or gamma-ray spectrometer efficiency calibrations, In: NBS Special Publication, 626: 85.
- [43] Walz K.F., Debertin K., Schrader H., 1983. Half-life measurements at the PTB, *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 34 (8): 1191-1199.
- [44] Gray P.W., Mac Mahon T.D., Rajput M.U., 1990. Objective data evaluation procedures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 286 (3): 569-575.
- [45] Unterweger M.P., 2002. Half-life measurements at the national institute of standards and technology, *Applied Radiation and Isotopes*, 56 (1): 125-130.
- [46] Schrader H., 2004. Half-life measurements with ionization chambers-a study of systematic effects and results, *Applied Radiation and Isotopes*, 60 (2): 317-323.
- [47] Woods M.J., Collins S.M., 2004. Half-life data-a critical review of TECDOC-619 update, *Applied Radiation and Isotopes*, 60(2): 257-262.
- [48] NuDat, 2015. National Nuclear Data Center (NNDC) in Brookhaven National Laboratory. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> (Erişim Tarihi: 10.02.2015).

*Tuğba Göker e-posta: tugbaogoker@gmail.com*