

## Foton Radyoterapide Medikal LINAC'da Oluşan Fotonötronların Ölçümü

Abdullah KAPLAN, İskender AKKURT

Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Isparta  
kaplan@fef.sdu.edu.tr

**Özet:** Kanser radyoterapisi için kullanılan lineer hızlandırıcılar (LINAC) genellikle yüksek enerjili foton ışını üretmek için kullanılır. Foton enerjisi 10 MeV'den büyükse, hızlandırıcı kafasından fotonükleer reaksiyon yoluyla nötron açığa çıkar. Bu amaçla, Max-Lab (Lund-İsveç) elektron hızlandırıcısı kullanılarak, 11-33 MeV enerjili fotonlarla  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  reaksiyonu gerçekleştirilmiştir.  $(\gamma,n)$  reaksiyonu ile LINAC'da Tungsten'den istenilen fotonların yanında anlamlı olarak istenmeyen nötronların da açığa çıktığı ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Foton, Foton Radyoterapi, Fotonötron, Lineer Hızlandırıcı

### Measuring of Photoneutrons Produced in Medical LINAC During The Photon Radiotherapy

**Abstract:** Linear accelerators (LINAC) used for the cancer radiotherapy are generally used to produce of high-energy photon beam. If the photon energy is grater than 10 MeV, neutrons are generated by photonuclear reaction in the accelerator head. For this aim,  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  reaction was realized with photons of 11-33 MeV energy by using Max-Lab (Lund-Sweden) electron accelerator. As a result of  $(\gamma,n)$  reaction, it has been measured the wanted photons besides significantly unwanted neutrons from Tungsten in LINAC.

**Keywords:** Photon, Photon Radiotherapy, Photoneutron, Linear Accelerator

### Giriş

İnsanlar, yaşamları boyunca; doğal radyasyon dediğimiz, yaşadıkları ortamda bulunan güneşten gelen kozmik ışınlar, ısı ve ışık enerjisinden kaynaklanan radyasyon ve havada, toprakta bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayımlanan radyasyonun etkisi altında kalmaktadır. İnsanlar bu doğal radyasyon kaynakları yanında, insanlığın yararına kullanılan yapay radyasyon kaynaklarından da az miktarda radyasyon alırlar. Tıpta teşhis ve tedavide kullanılan radyasyon, toplum için önemli yapay radyasyon kaynağını oluşturur. Radyasyonu iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki gruba ayırabiliriz. İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği ortamda yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturabilen radyasyon çeşididir. Canlı dokularda normal biyolojik işleyişi doğrudan etkiler. Madde ile etkileşmelerinde; Alfa( $\alpha$ ), beta( $\beta$ ), gama( $\gamma$ ), proton, elektron ve nötron açığa çıkarır. İyonlaştırıcı radyasyonlar önlem alınmadıkları takdirde tüm canlılar için tehlikeli olabilecek radyasyon çeşitleridir. Son 50-60 yıl içerisinde radyasyondan faydalanılarak yapılan çalışmalar yaşam kalitemizin gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Tıp, tarım, sanayi ve endüstri gibi birçok alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıbbi alandaki radyasyon uygulamaları hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli rol oynar. Bu çalışmada, radyoterapide LINAC ile yapılan kanser tedavisi sırasında radyasyonun (fotonun) hızlandırıcılardaki doğrultucularla etkileşmesinden dolayı açığa çıkan nötronların ölçümü yapılmıştır. Hastanelerde

foton kaynağı olarak tek tip enerji veren  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  kaynakları yanında istenilen enerjide fotonun elde edilebildiği lineer hızlandırıcılar da kullanılmaktadır. Bu hızlandırıcılarda maksimum foton enerjisi 4-25 MeV arasında değişmektedir. Maalesef hiçbir tümör, tek başına değildir ve yanında mutlaka bir hayati organ vardır. Tümöre maksimum dozu verirken, yanındaki dokularda da dozu minimumda tutabilmek çok önemlidir. Bunun için; ışın LINAC kafasında yer alan ağır metallere yapılan doğrultucularla tümöre odaklanır. Ancak, 10 MeV'den daha fazla enerjideki foton ışını bu ağır metallere etkileşmesinden dolayı nötron açığa çıkarır. Aynı şekilde; foton vücuda girdikten sonra da, vücutla etkileşmesinden yine nötron açığa çıkarabilir. Bu nötronların diğer sağlıklı organlara vereceği radyasyon dozu fotona göre yaklaşık 20 kat daha fazladır. Bu yüzden, foton radyoterapide hızlandırıcı kafasındaki doğrultucularda oluşan nötronların ölçülmesi çok önemlidir.

### Materyal ve Yöntem

Böyle bir çalışma için öncelikle radyoterapide kullanılan foton enerjisine (10-30 MeV) yakın enerjili foton üretebilen bir hızlandırıcıya ihtiyaç vardır. Lund (İsveç) Üniversitesi'ne bağlı Max-Lab hızlandırıcısı dünyada bu amaçlar için kullanılacak merkezlerden

biridir. Burada 0-80 MeV'ye kadar foton üretilebilmektedir. Bunun yanında elde edilen yüksüz nötronların ölçülmesi de çok önemlidir. Nötronun ölçülmesi genelde uçuş süresi ölçülerek yapılır ki, buna Time-of-Flight (TOF) metodu denilir[1]. Bu metot, Max-Lab'da Glasgow Üniversitesi tarafından kurulmuş olan nötron spektrometreleriyle yıllardan beri kullanılmaktadır [2,3,4,5,6]. Bu çalışmada, Max-Lab hızlandırıcısı ve detektör sistemi hakkında bilgi verilerek, 11-33 MeV enerjili fotonlarla  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  reaksiyonu gerçekleştirilmiştir ve 4 mm kalınlığındaki Tungsten'den sökülen nötronlar, TOF metodu ile ölçülmüştür.

### Max-Lab

Bu çalışma için kullanılan Max-Lab, lineer bir elektron hızlandırıcısı olup, İsveç'in Lund Üniversitesi bünyesinde faaliyetlerini sürdürmektedir. Laboratuvar normal kapasitesi 100 MeV olan mikrotron, puls gerdirme halkası ve etiketleyici (mıknatıs) den oluşmaktadır. Max-Lab hızlandırıcısı, elektronların maksimum 250 MeV enerjiye kadar hızlandırılabilirdikleri ve ortalama olarak bu elektron enerjisinin %80 oranında ancak 20 MeV aralıklı foton elde edilebilen bir merkezdir. Burada fotonlar, elektronların elektrik alanındaki ivmeli hareketi ile oluşan bremsstrahlung (frenleme radyasyonu) metoduyla elde edilmektedir.

### Nötron Detektör Sistemi

Nötronlar, fotonlar gibi yüksüz olduklarından, bir detektörde direk sinyal vermezler. Bu yüzden; bir nötronun ölçümü nötronun gelen direk sinyalden değil de, ikinci bir reaksiyon sonucu oluşan yüklü bir parçacığın verdiği sinyalden yapılabilir. Hızlı nötronlar için, hidrojenik materyalleri detektör ortamı olarak seçmek uygundur. Max-Lab'taki fotonnötron ölçüm deneylerinde iki uçuş zamanı (TOF) nötron spektrometresi kullanılmaktadır [2]. Her bir spektrometre 3x3 şeklinde bölmelendirilmiş ve içleri NE213A sıvı sintilator maddesi ile doldurulmuş 26x26x171,5 cm boyutunda Alüminyum tankdan oluşmaktadır. Sistem kurşun, parafin gibi koruyucu zırhlarla korunmaktadır. Ayrıca, ince plastik sintilasyonla etrafının çevrilmiş olması yüklü parçacıkların engellenmesini sağlamıştır. Detektörden alınan sinyaller nötron enerjisini elde etmek için kullanılmamakta ancak, detektörün verimliliğinin tespitinde önemlidir. Bu yüzden, detektörün kalibrasyonu önemlidir. Bunun için,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{228}\text{Th}$  ve Pu-Be kaynaklarıyla ölçümler yapılmıştır. Sıvı sintilasyon detektörü yüksüz nötrona duyarlı olduğu gibi, fotona karşı da duyarlıdır. Detektörde kaydedilen sinyallerin nötron ya da foton olduğunun ayırt edilmesi gerekir. Bu da, gelen sinyallerin şekline göre ayırım yapan PSD (Pulse-Shape-Discrimination) metodu ile yapılmaktadır [7].

### TOF Metodu

Detektörü hedeften biraz uzağa koyarak, hedeften detektöre olan nötronun uçuş süresi ölçülerek nötronun enerjisi bulunabilir. Buna, uçuş süresi (TOF) metodu denilir. Oluşturulan reaksiyonla çekirdekte sökülen nötronun enerjisi TOF metodu kullanılarak ölçülmüştür.

Bilinen uçuş mesafesini kullanarak, nötronun kinetik enerjisi  $T_n$ ; TOF yoluyla,

$$T_n = M_n \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right] \quad (1)$$

olarak yazılır.

Burada,

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{1}{c} \cdot \frac{d}{t_{tof}} \quad (2)$$

ve

$$t_{tof} = (t_n - t_0) \quad (3)$$

olup,

$t_{tof}$  = Nötronun uçuş süresi

$t_n$  = Nötronun detektöre çarptığı an

$t_0$  = Nötronun hedefte oluştuğu an

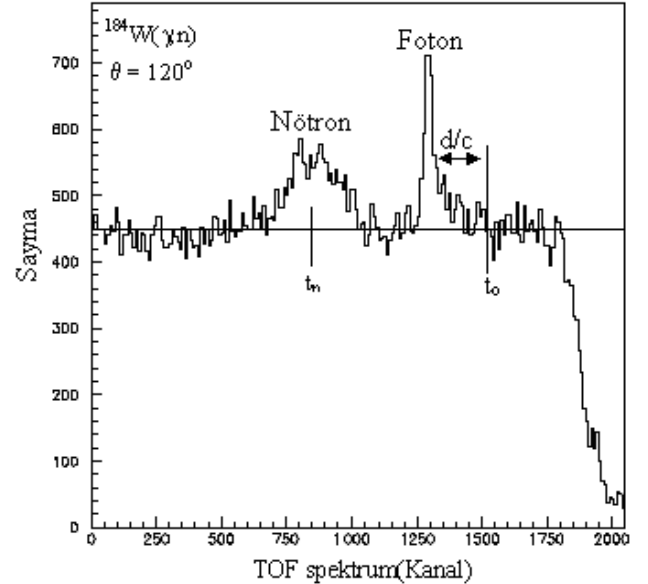
$M_n$  = Nötronun durgun kütle enerjisi

$d$  = Detektörle hedef arasındaki uçuş mesafesi

$c$  = Işık hızı

dır.

Şekil 1'de 4 mm kalınlığındaki Tungsten için TOF spektrumu görülmektedir [8].

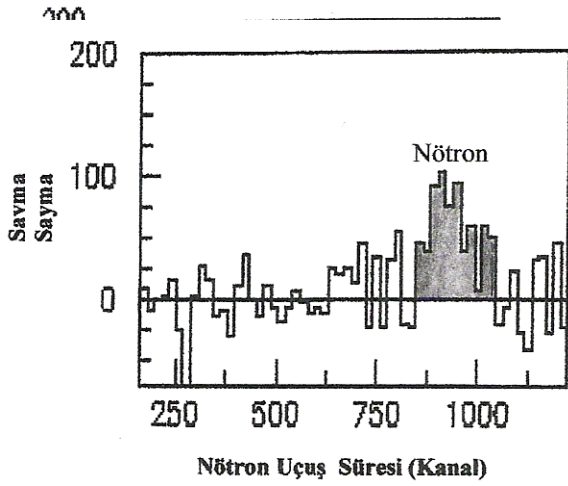


Şekil 1.  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  Reaksiyonunun TOF Spektrumu

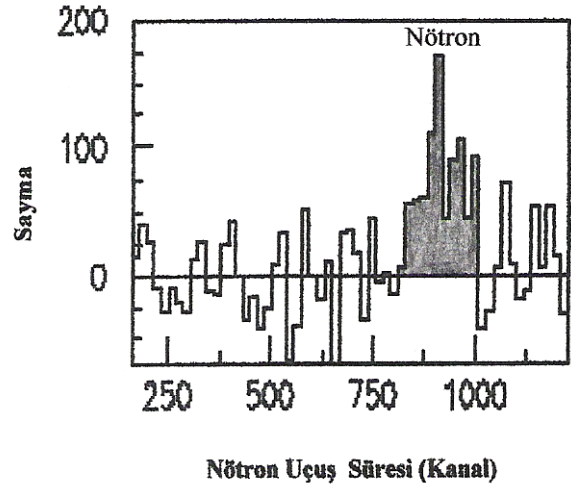
## Sonuçlar ve Tartışma

Foton Radyoterapide; hızlandırıcı cihazlarında doğrultucu olarak kullanılan 4 mm kalınlığındaki Tungsten'den sökülen fotonötronlar, 11-33 MeV enerjili fotonlar kullanılarak ölçülmüştür.  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $105^\circ$  dedeksiyon açıları (doğrultucudan çıkan foton ışınlarının yönü ile nötron detektörleri arasındaki açılar) için Şekil 2'de, nötron ölçüm açısına bağlı olarak 4 mm hedef kalınlığındaki Tungsten için  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  reaksiyonunun TOF spektrumları gösterilmiştir. Farklı açılarda elde edilen TOF spektrumlarında nötron pikleri (taralı alan) açık bir şekilde gözükmemektedir. Nötron piklerinin ölçüm açısına bağlı olarak karşılaştırması yapıldığında; piklerin büyüklüğünün (yoğunluğunun) daha fazla veya az belirgin olması, nötronların dedektörle fazla ya da az etkileşiminin bir sonucudur. Bir çekirdekten açığa çıkan nötronun enerjisi de gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Foton enerjisi arttıkça sayma oranı da küçülmektedir. Enerjileri 10 MeV'den büyük olan fotonlar hedef atomun çekirdeği ile etkileşime girerek, enerjileri çekirdek

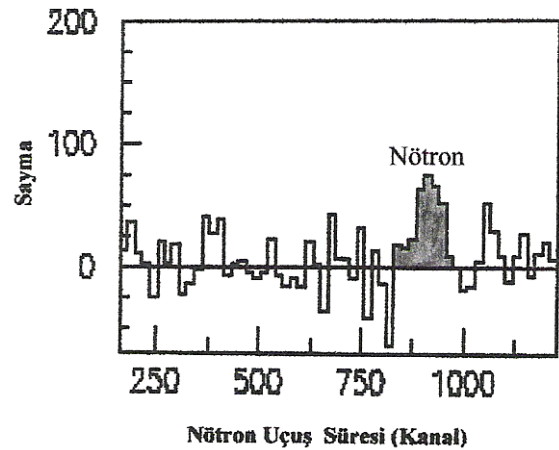
tarafından söğrülür ve çekirdekten nükleer bir parçacık ortama salınır. Salınan bu parçacık nötron, proton, elektron,  $\alpha$  parçacığı veya parçacık kümesi olabilir. Hastanelerin radyoterapi ünitelerinde lineer hızlandırıcılarda doğrultucu olarak Tungsten gibi ağır metaller kullanılmaktadır. Kanser tedavisinde radyoterapi esnasında kullanılan bu ağır metallerle fotonun etkileşmesinden açığa çıkan nötronlar, proton, elektron ve  $\alpha$  parçacıklarına göre daha tehlikelidir. Şekil 2'de görüldüğü gibi;  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  reaksiyonu sonucunda hedef madde olan Tungsten'den yani, fotonun doğrultucu ile etkileşmesinden dolayı nötronlar sökülmemektedir. Nötronlar fotonlara göre daha tehlikelidir. Çünkü; nötronun kalite çarpanı fotonunkinden ~20 kat daha fazladır. Bu nötronlara karşı radyoterapide önlem alınmalıdır. Aksi halde, sökülen nötronların sağlıklı hücrelerde yeni kanserler oluşturabileceği kaçınılmaz olacaktır.



(c)



(b)



(d)

**Şekil 2.** Nötron Dedeksiyon Açısına Göre 4 mm Hedef Kalınlığındaki  $^{184}\text{W}$ (tungsten) İçin  $^{184}\text{W}(\gamma,n)$  Reaksiyonunun TOF Spektrumları (a)  $\theta=60^\circ$  (b)  $\theta=75^\circ$  (c)  $\theta=90^\circ$  (d)  $\theta=105^\circ$

## Kaynaklar

- (1) Akkurt, I., Annand, J.R.M., 2002. Neutron photoproduction measurements using the TOF method. *Czechoslovak Journal of Physics*. 52(9),1049-1056.
- (2) Annand, J.R.M., Andersson, B.E., Akkurt, I., Nilsson, B., 1997. An NE213A TOF spectrometer for high resolution ( $\gamma, n$ ) reaction measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. A400, 344-355.
- (3) Akkurt, I., 1998. The study of ( $\gamma, n$ ) reactions in light nuclei at intermediate photon energy. Ph. D. Thesis, Glasgow University,
- (4) Akkurt, I., Annand, J.R.M., 2002. De-excitation gamma-ray technique for high-resolution photoneutron measurements. *Journal of Physics-G Nuclear and Particle Physics*. 28(2), 197-202.
- (5) Andersson, B. E., Adler, J-O., Bulychjev, S.A., Isaksson, L., Ruijter, H., Schroder, B., Annand, J.R.M., et al., 1995.  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  reaction at intermediate energy. *J. Physical Rev. C*51, 2553-2561.
- (6) Akkurt, I., Annand, J.R.M., 2002. The ( $\gamma, n$ ) reaction mechanism at intermediate energies. *Chinese Journal of Physics*. 40(3), 277-282.
- (7) Annand, J.R.M., 1987. A fast module for pulse shape analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. A262, 371-377.
- (8) Kaplan, A., 2003. Ağır metallerde düşük enerjili foton kullanılarak ( $\gamma, n$ ) reaksiyonlarının ölçümü. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.