



Radyoterapi Odasının Farklı Noktalarında Nötron Kirliliğinin Ölçülmesi

Onur KARAMAN^{1,*}, A. Güneş TANIR²

¹Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, 07058, Antalya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

*yazışılan yazar e-posta: onurkaraman@akdeniz.edu.tr

(Alınış / Received: 24.12.2019, Kabul / Accepted: 25.02.2020, Yayınlanma / Published: 31.05.2020)

Özet: Radyoterapi, kanser tedavisinde kullanılan en önemli tedavi yöntemlerinden birisidir. Ancak, radyoterapide yüksek enerjili foton ve elektron demetlerinin kullanımı sırasında (>7 MV) lineer hızlandırıcı kafasında bulunan ağır metallere kaynaklı nötron kirliliği oluşmaktadır. Bu durum, hedef hacimde ve çevresindeki diğer organlarda nötron kirliliğinden kaynaklı doz belirsizliğine neden olmakta ve ikincil kanser riski oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 18 MV foton enerjisinde, Elekta Synergy lineer hızlandırıcıda Thermo Scientific Rad Eye NL marka nötron dedektörü ile alan açıklığının ve eşmerkeze olan uzaklığın nötron doz hızına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, alan açıklığının nötron doz hızı üzerindeki etkisi eşmerkezde, eşmerkezden farklı uzaklıklarda, radyoterapi odası kapısının içi ve dışında, konsol odasında ölçümler alınarak araştırılmıştır. Radyoterapide, 18 MV enerjili fotonların neden olduğu nötron kirliliğinden kaynaklı doz belirsizliğinin ikincil kanser riskini artırabileceği öngörülmüştür. Bu nedenle, radyoterapide istenmeyen fotonötron dozunun dikkate alınmasının çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Nötron kirliliği, Medikal lineer hızlandırıcı, Nötron dedektör

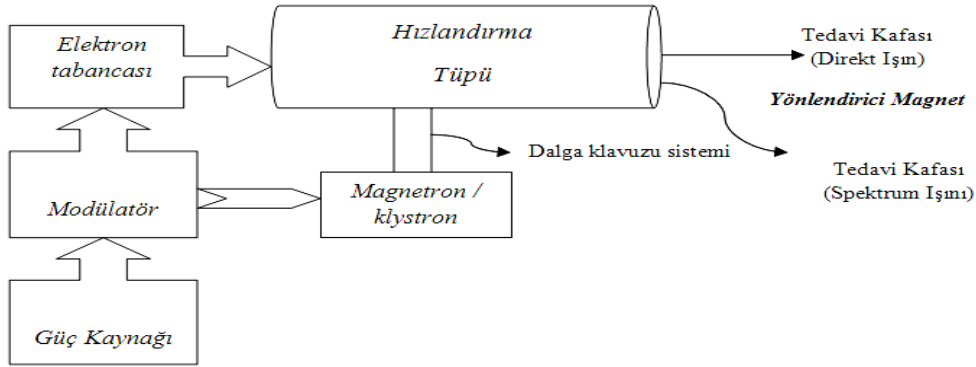
Measurement of Neutron Contamination at Different Points in the Radiotherapy Room

Abstract: Radiotherapy is one of the most important treatment methods used in cancer treatment. However, during the cancer treatment, the undesired photo-neutron caused by using high energy photon beams (> 7 MV) increases the secondary cancer risk. This causes dose uncertainty due to the neutron contamination in the target volume and other organs around it, and brings out a risk of secondary cancer. In this study, the effect of the square field size and the distance from the isocenter on the neutron dose rate was investigated by using Thermo Scientific RadEye neutron detector in 18 MV photon energy, Elekta Synergy linear accelerator. Moreover, the effect of the field size on the neutron dose rate was investigated at the isocenter, and at a different distance from the isocenter as well as at the inside and the outside of the radiotherapy room door, and the console room. In radiotherapy, dose uncertainty due to neutron contamination caused by photons with 18 MV energy is predicted to increase the risk of secondary cancer. It is concluded that it is crucial to take into consideration of the unwanted photo-neutron dose in the radiation treatment.

Key words: Neutron contamination, Medical linear accelerator, Neutron detector

1. Giriş

Kanser, dünyada bilinen en yaygın sağlık sorunlarından birisidir ve tüm dünyada kanserli hasta sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu durum radyoterapi ünitelerinin önemini arttırmaktadır. Kanser tanı ve tedavisi, teknolojideki gelişmelere paralel olarak geliştirilmektedir [1]. Işın tedavisi olarak da adlandırılan radyoterapi yaklaşık 100 yıldır kanser tedavisinde kullanılan yöntemlerden biridir. Etkisi kanser hücrelerinin iyonlaştırıcı radyasyonla yok edilmesi temeline dayanır. Lineer hızlandırıcılar (LINAC), modern RT merkezlerinde en sık kullanılan tedavi cihazlarıdır. Işın demetlerinin oluşturulmasında hızlandırılmış elektronların kullanılması nedeniyle LINAC'larda hem foton ışınlarının, hem de elektron ışınlarının üretilmesi mümkündür. LINAC'lardan elde edilen foton ışınlarının enerjileri 4 MeV ile 25 MeV arasında değişmektedir. Bir medikal LINAC genel olarak, elektron tabancası, magnetron veya klystron, dalga kılavuzu sistemi, saptırıcı magnetler ve çeşitli yönlendirici ve filtreler içeren tedavi kafası bölümlerinden oluşur (Şekil 1).



Şekil 1. LINAC blok şeması [2]

Elektronlar veya fotonlar kullanılarak yapılan çalışmalarda 7 MV'in üzerindeki enerjilerde çalışan LINAC'larda nötronların meydana geldiği görülmüştür [3]. Bunun sebebi genel olarak, foton ve elektronların LINAC tedavi kafası içerisinde bulunan (hızlandırıcı hedefi, düzleştirici filtre, saçıcı yapraklar, yönlendiriciler vb.) yüksek atom sayılı malzemeler ve zırlama amaçlı kullanılan parçalar ile etkileşmeleri verilebilir [4]. Elektronların nötron oluşturma tesir kesiti, fotonların nötron oluşturma tesir kesitinden yaklaşık 10 kat daha azdır. Bu nedenle, elektron demet terapisi sırasında nötron oluşumu, x-ışını modunda gerçekleştirilen terapilerdeki nötron oluşumundan oldukça azdır [3].

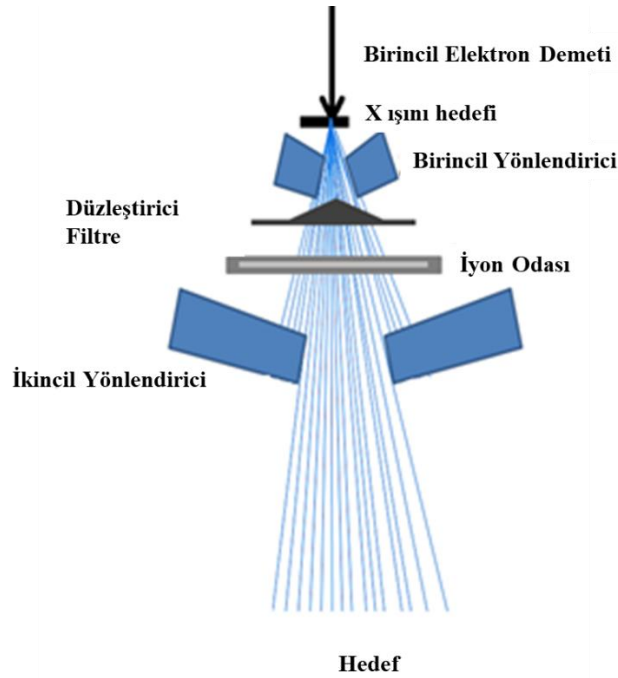
Termal nötronları ölçmek için bor tipi dedektörler, Lityum dedektörler, Helyum-doldurulmuş dedektörler, fisyon sayaçları gibi teknikler mevcuttur. Orta ve hızlı nötronların ölçülmesinde ise nötronları termal enerjiye yavaşlattıktan sonra bir termal nötron dedektörü ile ölçmek ve çeşitli aktivasyon folyolarından oluşan bir kombinasyon kullanarak doğrudan dedekte etmek mümkündür [5]. Yapılan bu çalışmada, nötron kirliliğini belirlemek amacı ile 18 MV enerjide kullanılan Elekta Synergy LINAC cihazında Thermo Scientific RadEye NL marka nötron dedektörü kullanılarak farklı alan açıklığında, eşmerkezde ve farklı uzaklıklarda, radyoterapi odası kapı içi ve kapı dışı ölçümleri ile kumanda odası ölçümleri alınarak karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada Elekta marka Synergy model LINAC cihazı kullanıldı. Cihaz, 6 ve 18 MV fotonların yanı sıra 6, 9, 12, 15 ve 18 MeV elektron enerjilerini üretebilmektedir. Tedavi cihazı eşmerkezde genişliği 0,5 cm olan 80 çok yapraklı yönlendirici (Multileaf

Collimator = MLC) ve Agility kafa yapısına sahiptir. Volümetrik Modülasyonlu Ark Tedavisi (VMAT), dinamik ve statik Yoğunluk Ayarlı Radyoterapi (YAR) , 3 boyutlu konformal radyoterapi gibi tedavi tekniklerini uygulayabilmektedir. İki boyutlu (2B), üç boyutlu (3B) ve dört boyutlu olarak, kV enerji seviyesinde x-ışını ile görüntüleme yapan bir sisteme sahiptir [6].

Radyoterapide, yüksek enerjili foton ve elektron demetlerinin kullanımını sırasında LINAC kafasında bulunan ağır metallere kaynaklı nötronlar ortaya çıkmaktadır. Bu durum hedef ve çevresel organlarda nötron kirliliğinden kaynaklı doz belirsizliğine ve ikincil kanser risklerine neden olabilir. Bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla 18 MV foton enerjisinde Elekta Synergy LINAC cihazında Thermo Scientific RadEye NL marka nötron dedektörü kullanılarak nötron kirliliği ölçümleri yapılmıştır. Kullanılan foton enerjisini doğrulamak için PTW marka iyon odası kullanılmıştır. Kaynak dedektör mesafesi (Source to skin distance = SSD) 100 cm olarak ayarlanmıştır. 5×5 , 10×10 , 20×20 , 30×30 ve 40×40 cm² alan açıklarında, eşmerkezde ve farklı uzaklıklarda, radyoterapi kapı içi ve kapı dışı ölçümleri ve konsol ölçümleri alınmıştır.



Şekil 2. X-ışını modunda kullanılan LINAC tedavi kafası şematik gösterimi [7].

Tedavi kafası (Şekil 2) Kurşun, Tungsten veya Kurşun-Tungsten alaşımı gibi yüksek atom sayısına sahip zırhlama malzemesinden oluşan kalın bir kabuğa sahiptir. İçerisinde bir x ışını hedefi, saçıcı foil, düzleştirici filtre, iyon odası, sabit ve hareket edebilir yönlendiriciler ve ışık kılavuz sistemi mevcuttur [2].

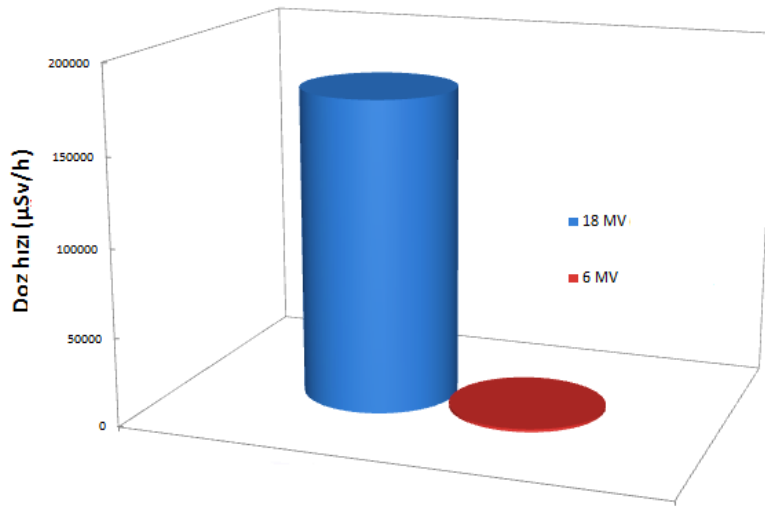
Nötronlar yüksüz olduklarından madde içindeki davranışları yüklü parçacık veya gama ışınlarından çok farklıdır ve bu yüzden dedeksiyonları, madde ile etkileşimlerinde oluşan ikincil parçacık/ ışınlar vasıtasıyla ölçülür. ³He nötron dedektörleri orantılı sayıcılar, oluşan yükün toplam miktarı, orijinal nötronlardan çıkarılması gereken yük miktarıyla orantılı olarak değişir. Gazlı dedektörler ise hem nükleer reaksiyonla çıkarılan termal, hem de geri saçılma etkisiyle oluşan hızlı nötronları algılar [8].

Kullanılan nötron dozimetresinde ölçülen nötron akısı, foto-nötron doz eşdeğeri veya ortam dozu eşdeğerini belirlemek için bir akı-doza eşdeğeri dönüşüm katsayısı veya akı-

ortam dozu eşdeğeri dönüşüm katsayısı ile çarpılır. Bu yaklaşımı kullanırken, yüklü parçacıklara tüm nötron etkileşimlerinde aynı ortalama enerjinin aktarıldığı varsayılmaktadır.

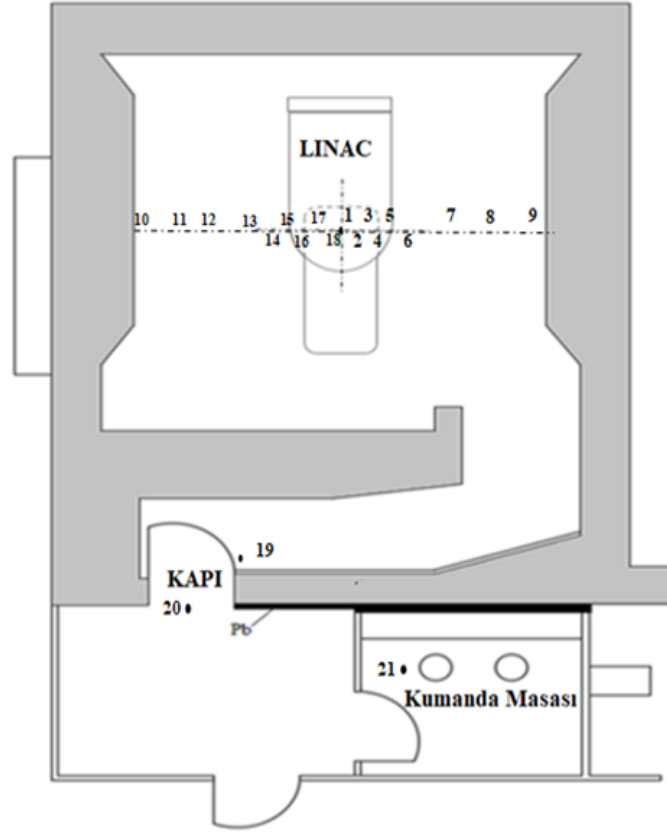
3. Bulgular

Radyasyondan kaynaklı ikincil kanser riskini artıran en önemli etkenlerden biri de 8-10 MeV'den yüksek enerjili foton ve elektron demetlerinin kullanımı sırasında nükleer reaksiyonlar sonucu açığa çıkan nötronlardır. $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alan açıklığında, 6 MV ve 18 MV'de üretilen fotonların neden olduğu nötron kirliliği ölçümleri Şekil 3 'te verilmiştir. LINAC, 6 MV'de maksimum doz hızında çalışılsa dahi elde edilen nötron kirliliği değerleri $\sim 0,01 \text{ Sv/h}$ iken, bu değer 18 MV'de $\sim 0,18 \text{ Sv/h}$ 'e ulaştığı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada Elekta Synergy cihazında yapılan ölçümlerde 6 MV'den kaynaklı doz değeri klinik olarak ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen tüm ölçümler yalnızca 18 MV foton enerjisinde alınmıştır.



Şekil 3. $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alan açıklığında, eşmerkezde alınan nötron doz ölçümleri

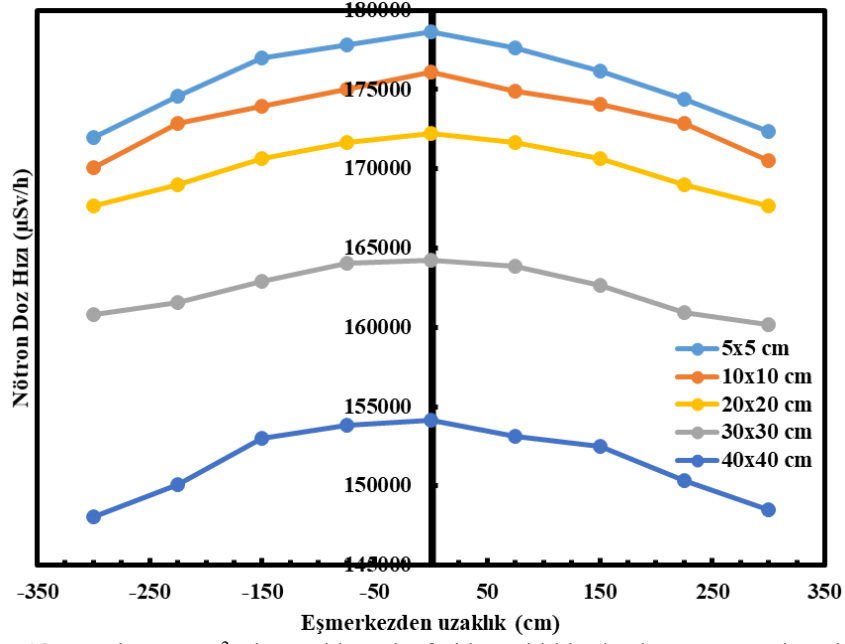
Elekta Synergy LINAC SSD = 100 cm'de, $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alan açıklıklarında, eşmerkezde ve eşmerkezden farklı uzaklıklarda (10, 20, 30, 40, 50, 75, 150, 225 ve 300 cm mesafe uzaklıklarda), nötron kirliliğinden kaynaklı doz belirsizliklerini ortadan kaldırmak amacı ile RW3 katı su fantomunda Thermo Scientific RadEye NL dedektör kullanılarak ölçümler alınmıştır (Şekil 4). Şekil 4.'de gösterilen noktalarda Thermo Scientific RadEye NL Nötron dedektörü kullanılarak nötron doz ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. LINAC odasında gerçekleştirilen nötron doz ölçüm noktalarının şematik gösteri [9].

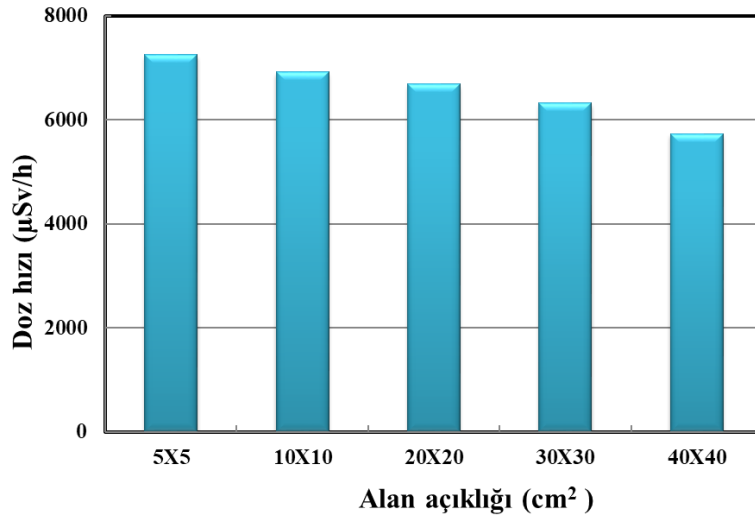
Tablo 1. LINAC odasında alınan ölçüm noktaları

Ölçüm noktası	Uzaklık (cm)	Ölçüm noktası	Uzaklık (cm)
0	Eşmerkez	11	-225
1	10	12	-150
2	20	13	-75
3	30	14	-50
4	40	15	-40
5	50	16	-30
6	75	17	-20
7	150	18	-10
8	225	19	LINAC odası kapısının iç kısmında alınan ölçümler
9	300	20	LINAC odası kapısının dışında alınan ölçümler
10	-300	21	Kumanda masası ölçümleri



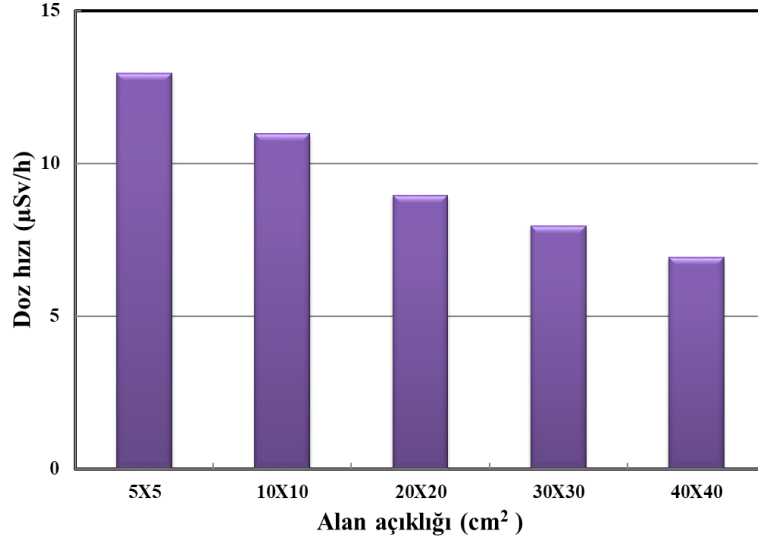
Şekil 5. 18 MV’de 5x5 cm² alan açıklığında farklı uzaklıklarda alınan nötron doz ölçümleri

Alan açıklığı 5×5 cm²’den 40×40 cm²’ye değiştirildiğinde nötron doz hızı eşmerkezde düştüğü görülmektedir. İzomerkezden uzaklaştıkça nötron doz hızının azaldığı Şekil 5.’te görülmektedir.



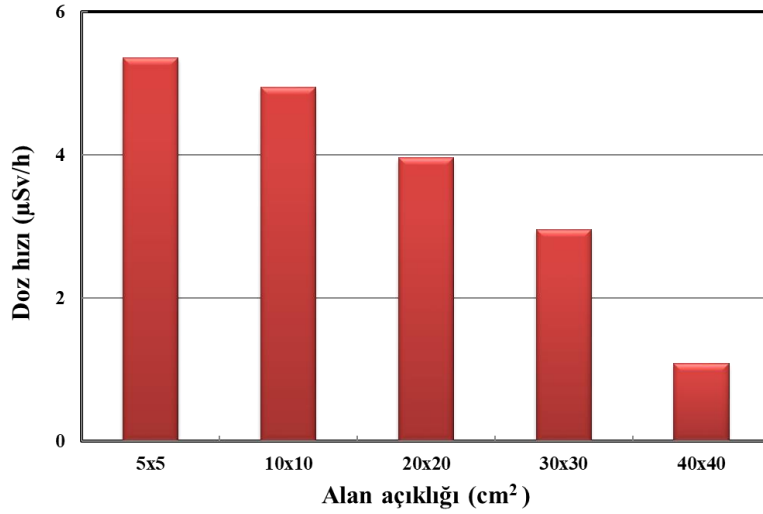
Şekil 6. 18 MV’de farklı alan açıklıklarında 19 numaralı ölçüm noktasında alınan nötron doz ölçümleri

19 numaralı ölçüm noktasında farklı alan açıklıklarında ölçülen nötron kirliliği ölçümleri sonucu Şekil 6.’da verilmiştir. Şekil 5.’deki 5×5 cm² alan açıklığında, eşmerkezde alınan nötron doz ölçümleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık 25 kat azalma olduğu görülmektedir. Buradan alan açıklığı arttıkça doz miktarının azaldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. 18 MV’de farklı alan açıklıklarında 20 numaralı ölçüm noktasında alınan nötron doz ölçümleri

20 numaralı ölçüm noktasında farklı alan açıklıklarında ölçülen nötron kirliliği ölçümleri sonucu Şekil 7.’de verilmiştir. Şekil 5.’deki 5×5 cm² alan açıklığında, eşmerkezde alınan nötron doz ölçümleri ile karşılaştırıldığında oda tasarımında kullanılan zırh sayesinde yaklaşık 10000 kat azalma olduğu görülmektedir. Şekil 6. ile karşılaştırıldığında 20 numaralı ölçüm noktasında ihmal edilecek düzeyde doz miktarı olduğu saptanmıştır. 20 numaralı ölçüm noktasında yapılan deneysel çalışma aynı zamanda zırhlamanın önemini ortaya koymuştur. Alan açıklığı arttıkça doz miktarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 8. 18 MV’de farklı alan açıklıklarında 21 numaralı ölçüm noktasında alınan nötron doz ölçümleri

21 numaralı ölçüm noktasında farklı alan açıklıklarında ölçülen nötron kirliliği ölçümleri sonucu Şekil 8.’de sunulmuştur. Şekil 6. ile karşılaştırıldığında 21 numaralı ölçüm noktasında da ihmal edilecek düzeyde doz miktarı olduğu saptanmıştır. 21 numaralı ölçüm noktasında yapılan deneysel çalışma aynı zamanda iyi bir zırhlama ile doktor, teknisyen, hastane çalışanları ve hasta yakınlarının nötron kirliliğinden korunmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Alan açıklığı arttıkça doz miktarının azaldığı görülmektedir.

4. Sonuç ve Yorum

Günümüzde kanser tedavisinde sıkça kullanılan tedavi yöntemlerinden biri radyoterapidir. Bu nedenle, radyoterapi ünitelerinde, radyasyondan kaynaklanan ikincil kanser risklerinin belirlenmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada, Antalya Eğitim ve Araştırma Hastanesi Radyasyon Onkolojisi, Radyoterapi ünitesinde ki nötron kirliliğinin tespiti hedeflenmiştir. Asıl amaç, radyoterapi ünitesinde, tedavi sırasında açığa çıkan ve ikincil kanser riskini artırabilen, nötron sızıntılarının tespiti ve alınabilecek önlemlerin belirlenmesidir. Konuyla ilgili son dönemde yapılan süreli yayınlar incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Literatürde, 18 MV foton enerjisinde, Elekta SL75/25 LINAC'ta açığa çıkan nötron doz eşdeğerinin farklı alan açıklıkları ile değişimini Monte Carlo MCNPX kodu kullanarak hesaplanmıştır. Elde edilen modelleme sonuçlarına göre, nötron doz eşdeğerinin artan alan açıklığı ile azaldığı sonucuna varılmıştır [10].

Jahangiri ve arkadaşları 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, 18 MV foton enerjisinde, Elekta SL75/25 LINAC'ta açığa çıkan nötron doz eşdeğerinin farklı alan açıklıklarında ve farklı uzaklıklara bağlı olarak değişimini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek nötron doz eşdeğerinin $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alan açıklığında olduğunu tespit edilmiştir [11].

Kralik ve arkadaşları (2008) ile Hashemi ve arkadaşları (2008) eşmerkezden 50 cm uzakta, nötron doz eşdeğeri ölçümü gerçekleştirmişlerdir [12,13]. Her iki değer de bu çalışmanın sonuçlarıyla benzer sonuçlar göstermiştir.

Yukarıda bahsedilen tüm çalışmalar nötron üretiminin yüksek enerjili x-ışını üretilen LINAC'larda ($> 7 \text{ MV}$) meydana geldiğini ve ihmal edilebilir olarak değerlendirilemediğini göstermektedir [10-14]. Yüksek enerjili LINAC'lardan meydana gelen foto-nötronlar, ikincil kanser tetiklenmesi riskini oluşturur. Elde edilen sonuçlar, 18 MV enerjili fotonların neden olduğu nötron kirliliğinden kaynaklı doz belirsizliği ve ikincil kanser riski ihmal edilemez düzeyde olduğunu kanıtlamıştır. Bu nedenle, x-ışını radyoterapisi sırasında ikincil nötronlardan kaynaklanan, özellikle tedavi hacmini çevreleyen sağlıklı dokuda soğurulan dozu ve karşılık gelen doz eşdeğerini doğru bir şekilde ölçmek önemlidir.

Çalışmada 18 MV'de oluşan doz değerleri için farklı noktalarda ölçümler alınmıştır. Doz eşdeğeri alan büyüklüğü ile ters orantılı olarak değişmiştir. Alan büyüdükçe nötron doz eşdeğeri de azalmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmada, en küçük $5 \times 5 \text{ cm}^2$ demet alanına sahip ışınlamalarda en yüksek doz değerleri bulunmuştur. Bunun yanında, alan büyüklüğü arttıkça nötron doz eşdeğerinin düştüğü tespit edilmiştir. Radyoterapi ünitesi için artan nötron varlığıyla, hasta dozuna ek olarak nötron radyasyonuna maruz kalındığının hesaba katılması gerektiği ve tedavi sırasında da ikincil kanser riski hesaplanması göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle bu çalışma ile ortaya konmuş olan bu durum, radyoterapide çalışan hekim ve uzmanlara alınacak tedbirler açısından yararlı olabilecektir.

Yapmış olduğumuz ölçümlerin, diğer bir önemli sonucu ise kapı önü, kapı arkası ve operatör odası dozlarının beklenen kabul edilebilir değerlerde ortaya çıkması olmuştur. Aynı zamanda radyasyondan korunma kurallarına uyulması amacı ile nötronlar için özellikle yüksek enerjili radyoterapi odası ve kapıların zırhlanması ve tasarımı önem arz eder. Çalışmada kullanılan model, metotlar kullanılarak ve geliştirilerek rutin klinik

tedavi işlemlerinde doz değerlerinin tahminleri yapılabilir. Nötron doz eşdeğerinin azaltılması için zırlama ve LINAC bileşenlerinde düşük nötron tesir kesitine sahip materyallerin kullanılması yönünde çalışmalar yapılması tavsiye edilmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Onur KARAMAN: Araştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynak/Materyal/Malzeme Temini
Ayşe Güneş TANIR: Veri İyileştirme, Orijinal Taslak Yazımı

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Onur KARAMAN'ın doktora tezinden türetilmiştir. Yazarlar olarak çalışmanın yapılması sırasındaki katkılarından dolayı Yiğit ALİ ÜNCÜ ve Hasan ÖZDOĞAN'a teşekkür ederiz.

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Etik Kurul Onayı ve/veya Aydınlatılmış Onam Bilgileri

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Kaynakça

- [1] J. I.Spicka, H. S.Kim, D. W. Oh, V. Marable, and K .Fleury, "Equal surface dose compensation," *Med. Dos.*, 14 (4), 287-290, 1989.
- [2] F. M.Khan, *The Physics of Radiation Therapy*. Philadelphia, PA:Lippincott Williams&Wilkins, 2003, pp. 42-43-92-413
- [3] *Neutron Measurements Around High Energy X-Ray Radiotherapy Machines*, American Association of Physicists in Medicine, *AAPM - Report 19*, 1986, pp.19-21
- [4] A.Ma, J. Awotwi-Pratt, A. Alghamdi, A. Alfuraih, and M. N. Spyrou, "Monte carlo study of photoneutron production in the varian clinac 2100c linac,"*J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 276 (1), 119-123, 2007.
- [5] J. E. Martin ,Physics for Radiation Protection,Mörtenbach,Germany:Wiley-VHC,2006, (çev. A.G.Tanır, M.H. Bölükdemir, K. Koç). Ankara: Palme Yayıncılık (Eserin orijinali 2006'da yayınlandı), pp- 203.
- [6] ELEKTA. (2019, Dec 3). Available: <https://www.elekta.com/radiotherapy/treatment-delivery-systems/elekta-synergy.html>
- [7] C. J. Karzmark, and R. J. Morton, Primer on theory and operation of linear accelerators in radiation therapy (No. FDA--82-8181). Bureau of Radiological Health, 1981, pp.42.
- [8] Neutron Dedection and Counting (2019, Decm 2). Available: <http://www.canberra.com/literature/fundamental-principles/pdf/Neutron-Detection-Counting.pdf>
- [9] O.Karaman, A.G.Tanır, C.Karaman, "Investigation of Photoneutron Contamination From The 18-MV Photon Beam in A Medical Linear Accelerator, " *Mater. Tehnol.*, 53 (5), 699-704, 2019.
- [10] A. Mesbahi, H. Ghiasi, and S. R. Mahdavi, "Photoneutron and capture gamma dose equivalent for different room and maze layouts in radiation therapy, " *Radiat. Prot. Dosim.*, 140 (3), 242-249, 2010.
- [11] M. Jahangiri, P. Hejazi, S. M. Hashemi, A. Haghparast, and B. Hajizadeh, "The effect of field size and distance from the field center on neutron contamination in medical linear accelerator, " *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research (IJABBR)*, 3 (1), 97-104, 2015.
- [12] M. Kralik, K. Turek, and V. Vondracek, "Spectra of photoneutrons produced by high-energy x-ray radiotherapy linacs," *Radiat. Prot. Dosim.*, 132 (1), 13–17,2008.
- [13] S. M. Hashemi, B. Hashemi-Malayeri, G. Raisali, P. Shokrani, A. A. Sharafi, and F. Torkzadeh, "Measurement of photoneutron dose produced by wedge filters of a high energy linac using polycarbonate films, " *J. Radiat. Res.*, 49 (3), 279–283,2008.
- [14] A. Kaplan ve İ. Akkurt, "Foton Radyoterapide Medikal LINAC'da Oluşan Fotonötronların Ölçümü," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (1), 1-4, 2006.