

Osmangazi Journal of Medicine e-ISSN: 2587-1579

Afterloading Brakiterapi Sistemlerinde Kaynak Kalibrasyonu ve Radyasyon Güvenliği

Source Calibration and Radiation Safety in Afterloading Brachytherapy Systems

Nural Öztürk

Aydın Adnan Menderes University Faculty of Medicine, Department of Radiation Oncology, Aydın, Türkiye

ORCID ID of the authors
NÖ. [0000-0002-7405-2693](https://orcid.org/0000-0002-7405-2693)

Correspondence / Sorumlu yazar:
Nural ÖZTÜRK

Aydın Adnan Menderes University Faculty of
Medicine, Department of Radiation Oncology,
Aydın, Türkiye

e-mail: nural.ozturk@adu.edu.tr

Abstract: Brachytherapy helps to deliver radiation directly to the location of cancer cells through the placement of small radioactive sources inside the body. Today, irradiation with it is considered an essential part of treatment for almost all cancerous areas. Based on the improved localization techniques and treatment planning systems, it is now possible to have precise and reproducible dose distributions. In therapeutic applications, doses are high and deviation from the prescribed level can lead to serious or even fatal consequences. However, the desired clinical results can be achieved only with good clinical and dosimetric practice, in other words, with the comprehensive Quality Assurance (QA) program implementation that includes detailed Quality Control procedures. The most basic element in QA can be achieved by determining the source information accuracy. One of the most necessary elements for source calibration works correctly by means of the equipment that is needed for this calibration according to the existing setup in the center (well-type ion chamber, jig phantom, special calibration phantom, suitable ion chambers, and electrometers). In addition, among the necessary duties for QA are the determination of the task's distribution, responsible persons' authorization, and appropriately training of all relevant personnel. In addition, the existence of a center-specific quality control and radiation safety procedure is the basis for correct and high-quality practices.

Keywords: Brachytherapy, radiation, radiation protection, quality control and assurance

Informed Consent: No informed consent was needed for this review.

Copyright Transfer Form: Copyright Transfer Form was signed by the authors.

Authorship Contributions: Data collection and writing; NÖ design, literature review, writing and supervision; NÖ

Conflict of Interest: No conflict of interest was declared by the authors.

Financial Disclosure: The authors declared that this study received no financial support.

Funding: This study has not any funding.

Özet: Brakiterapi, kanserli hücrelerin bulunduğu yere doğrudan ışın verebilmek için radyoaktif kaynakların doku içi, vücut yüzeyi ve boşluklarına yerleştirilerek yapılan tedavidir. Günümüzde, brakiterapi ile ışınlama, neredeyse tüm kanser bölgeleri için tedavinin temel bir parçası olarak kabul edilmektedir. İyileştirilmiş lokalizasyon teknikleri ve tedavi planlama sistemleri ile artık hassas ve tekrarlanabilir doz dağıtımına sahip olmak mümkündür. Terapötik uygulamalarda dozlar yüksektir ve reçete edilen dozdan sapma ciddi veya hatta ölümcül sonuçlara yol açabilir. Yüksek dozlar lokal olarak hedefe verilirken çevredeki normal dokularda hızlı doz düşüşü sağlanır. Küçük hacimlerde kısa sürede yüksek doza ulaşıldığı için kalite kontrolü oldukça önemlidir. Ancak, istenen klinik sonuçlar yalnızca iyi bir klinik ve dozimetrik uygulama ile, yani kısaca ayrıntılı Kalite Kontrol prosedürlerini içeren kapsamlı, uygulanabilir ve tekrarlanabilir bir Kalite Güvence (KG) programının uygulanmasıyla elde edilebilir. Bu KG' nin en temel unsurlarından birisi de kaynak bilgilerinin doğruluğunun tespit edilmesi ve Tedavi Planlama Sistemine (TPS) girilmesidir. Bu kalibrasyon için merkezde mevcut olan düzeneğe göre ihtiyaç duyulan ekipmanların (Kkuyu-tipi iyon odası, jig fantom, özel kalibrasyon fantomu, uygun iyon odaları ve elektrometreler) doğru çalışıyor olması kaynak kalibrasyonu için en gerekli unsurlardan biridir. Ayrıca görev dağılımının belirlenmesi, sorumlu olacak kişilerin yetkilendirilmesi, ilgili tüm personelin görevleri için uygun şekilde eğitilmesi KG için gereklidir. Bunlara ilave olarak merkeze özgü kalite kontrol ve radyasyon güvenliği prosedürünün mevcudiyeti doğru ve kaliteli uygulama yapmanın temelidir.

Anahtar Kelimeler: Brakiterapi, radyasyon, radyasyondan korunma, kalite kontrol

Received 11.10.2024

Accepted : 20.12.2024

Published : 30.12.2024

How to cite/ Atf için: Öztürk N, Afterloading Brakiterapi Sistemlerinde Kaynak Kalibrasyonu ve Radyasyon Güvenliği, Osmangazi Journal of Medicine, 2025;47(1):163-175.

1. Giriş

Kanser, küresel çapta önde gelen ölüm nedenlerinden biridir. Dünya Sağlık Örgütü (*World Health Organization-WHO*), 2012 yılında 7,6 milyon kişinin kanserden öldüğünü ve ölümlerin oranlarının artmaya devam ettiğini bildirmiştir (1). 2025 yılına kadar bu sayının yıllık 11,4 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir. WHO'ne göre kanserle ilişkili tüm ölümlerin %70'inden fazlasının, önleme, teşhis ve tedavi kaynaklarının sınırlı veya hiç olmadığı düşük ve orta gelirli ülkelerde (LMIC'ler) meydana gelmektedir. Ayrıca yüksek gelirli ülkelerde, kanser vakalarının yaklaşık %50'sinin en az bir kere radyoterapi ile tedavi edildiği belirtilmektedir. WHO verilerine göre, düşük ve orta gelirli ülkelerde kanser tanısı konulduğundaki vakaların ileri düzeyde olması ve kaynak eksikliği nedeniyle, radyoterapi gerektiren vaka sayıları gelişmiş ülkelere göre daha yüksektir. Global bazda düşük doz oranlı ekipmanların sınırlı üretiminin durdurulması, düşük ve orta gelirli ülkelere Yüksek Doz Oranlı (High Dose Rate=HDR) brakiterapi ekipmanlarına olan talebin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, WHO bültenlerinde brakiterapi ile tedavi için uygun olan bazı kanser türlerinin (serviks, özofagus ve nazofarenks) düşük ve orta gelirli ülkelerde daha sık görüldüğünden bahsedilmektedir (1).

Curie'ler tarafından 1898'de radyoaktif radyumun keşfedilmesinden beş yıl sonra Radium (Ra) -226, brakiterapide başarıyla kullanılmaya başlandı (2). Sonraki 50 yıl boyunca radyum, brakiterapi uygulamaları için tercih edilen izotop oldu ve sonrasında çok daha kısa yarı ömürlere sahip kobalt, sezyum ve iridyum gibi reaktörde üretilen radyonüklitlere yerini bırakmıştır. Günümüzde, brakiterapi ile ışınlama, neredeyse tüm kanser bölgeleri için tedavinin temel bir parçası olarak kabul edilmektedir (3).

Brakiterapi (BT), kapalı bir radyoaktif kaynağın interstisyel, intrakaviter, intraluminal veya yüzey uygulamasıyla radyasyonu iletmek için kullanıldığı manuel ve afterloading olarak uygulanabilen terapötik radyasyon tedavi yöntemidir. Afterloading tekniğinde, aplikatörler hastaya yerleştirildikten sonra radyoaktif kaynaklar aplikatöre uzaktan kumanda ile sonradan yüklenmektedir. Bunun amacı uygulama sırasında çalışan maruziyetini azaltmaktır. Brakiterapide kanserli doku ve hücreler hedef hacimden kısa bir mesafede küçük kapsüllü radyoaktif kaynaklarla ışınlanır (4). Doğru kaynak

yerleşimi brakiterapi ile iyi sonuçlar elde etmek için en önemli faktördür (5).

Işınlanan hacim ile sağlıklı doku komplikasyon olasılığını değerlendiren tedavi modelleri, ışınlanan hacim ile komplikasyon riski arasında bağlantı olduğunu kabul ederler (6,7).

BT'de tanımlanan klinik target volüm (CTV), planlanan target volüm (PTV) ile aynı olduğundan eksternal RT'ye göre hedeflenen hedef volüm belirgin olarak küçüktür. Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU), ICRU 50 (1993) (8), ve ICRU 62 (1999) (9) protokollarına göre target volüm tanımlamalarında doz verildiği izodoz %95–107 aralığındadır. -%5 ve +%7 aralığındaki sapmalar homojen kabul edilir. Brakiterapide ise küçük bir hacim son derece heterojen bir doz dağılımı ile tedavi edilir. Tümör bölgesi yüksek doza maruz kalırken, hızlı doz düşüşü sebebi ile sağlıklı dokular ve kritik organlar (mesane, rektum) daha iyi korunmaktadır.

a) Brakiterapide kullanılan kaynak tanımlamaları

Radyoaktif kaynaklar, kaynak aktivitelerine göre düşük doz hızı, orta doz hızı ve yüksek doz hızı olarak tanımlanır. Kanser tedavilerinde son yıllarda sıklıkla HDR kaynaklar kullanılmaktadır. Brakiterapi tedavileri primer tedavi olarak uygulanabildiği gibi, eksternal radyoterapi sonrası ek tedavi (boost) tedavi veya cerrahi ve kemoterapi gibi diğer terapilerle birlikte kullanılabilir (10-12). ICRU 38. raporunda (11), brakiterapi uygulamalarını doz hızına göre 3 kategoriye ayırmıştır (12,13).

- Düşük Doz Hızlı (Low Dose Rate: LDR): Kaynak doz hızı 0.4–2 Gy (Gray) / saat dir. Klinik uygulamalarda genellikle 0.4–1 Gy/saat aralığında doz hızları kullanılır. LDR kaynaklar manuel ya da otomatik afterloading sistemleri ile uyumludur.
- Orta Doz Hızlı (Medium Dose Rate: MDR) nin doz hızı 2–12 Gy/saat arasındadır. Manuel ya da otomatik afterloading sistemler ile verilebilir. Bununla birlikte modern uygulamalarda çok nadir kullanılır.
- Yüksek Doz Hızlı (High Dose Rate: HDR) kaynakların doz hızı ≥ 12 Gy/ saat >20 cGy/dk'dır. Son yıllarda brakiterapi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır

- Kaynak aktivitesi çok yüksek olduğundan sadece afterloading yükleme ile uygulanır.

Son yıllarda cerrahi işlemle, anestezi altında manuel kalıcı “seed”ler kullanılarak uygulanan brakiterapiler ise çok düşük doz hızlı (Very Low Dose Rate: VLDR) brakiterapi olarak adlandırılır. Bu kaynaklar <0.4 Gy/saat gibi çok düşük bir doz hızına sahiptir. HDR brakiterapi uygulamaları için en önemli referans protokolleri için Amerikan Tıp Fizikçileri Derneği (American Association of Physicists in Medicine, AAPM) Task Grup Rapor 59 (13), Task Grup Rapor 56 (2) ve Task Grup Rapor 40 dikkate alınmaktadır (14). Sistem kurulumlarında ve hasta alımları sırasında dikkat edilmesi gereken kural ve tavsiyeler bu referanslardan yararlanarak elde edilebilir.

Bu çalışmanın amacı; brakiterapide kullanılan kaynakların, aktivitelerinin doğruluğunu hangi yöntemlerle kontrol edilebilirliğini örneklerle açıklayarak, kaynak güvenliğini içeren yaptırımları araştırmaktır.

b) Brakiterapinin Amacı

Brakiterapi uygulamanın amacı, kullanılan iyonize radyasyon kaynaklarının sadece yakın çevresindeki alanı etkilemesidir. Doz kaynaklara yakın bölgede hayli yüksekken, kaynaktan çevreye doğru uzaklaştıkça hızla (uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak) düşer. Bu da sağlıklı kritik organ dozlarının korunması anlamına gelmektedir. Ayrıca, hasta hareket ederse veya tedavi sırasında tümörün vücut içinde herhangi bir hareketi olursa bile radyasyon kaynakları tümöre göre doğru pozisyonlarını korur. Brakiterapinin bu özelliği, Eksternal Radyoterapi (EBRT)'ye göre avantajlar sağlar. BT uygulamaları sırasında tümör bölgesi yüksek dozlarla ışınlanırken, hızlı doz düşüşü nedeni ile çevredeki sağlıklı dokular gereksiz radyasyona daha az maruz kalır(5, 6, 15).

Fraksiyonlar halinde uygulanan Brakiterapi tedavileri diğer radyoterapi tekniklerinden daha kısa sürede tamamlanabilir. Bu, hayatta kalan kanser hücrelerinin her radyoterapi dozu arasındaki aralıklarda bölünüp büyüme şansını azaltmaya yardımcı olur (16). Ayrıca harici radyoterapi (EBRT) ile karşılaştırıldığında fraksiyonlar az olduğu için merkeze gelişler az ve tedavi ayaktan hasta olarak tamamlanabilmektedir. Bu, tedaviyi birçok hasta için erişilebilir ve kullanışlı hale getirir (17,18).

c) Kalite Güvencesinin Gerekliliği

HDR brakiterapilerde çok yüksek aktiviteye (10 Curie (Ci)) sahip kaynaklar kullanılır. Gerekli dozimetrik ve planlama ekipmanını kullanarak KG prosedürlerini, uygulayacak eğitilmiş bir ekibin olması son derece önemlidir. KG, mümkün olan en iyi tümör kontrolünü elde etmek, gereksiz yan etkilerden kaçınmak ve HDR BT'yi doğru ve güvenli bir şekilde gerçekleştirmek için gereklidir. KG son derece önemlidir, çünkü HDR BT uygulamaları kısa bir sürede hızlı bir şekilde gerçekleştirilir. Bu uygulama esnasında kısa bir zaman diliminde yüksek dozlar verilir ve düzeltme için çok az fırsat vardır (1). Günümüzde, brakiterapi ile ışınlama, neredeyse tüm kanser bölgeleri için tedavinin temel bir parçası olarak kabul edilmektedir. İyileştirilmiş lokalizasyon teknikleri ve tedavi planlama sistemleri ile artık hassas ve tekrarlanabilir doz dağıtımına sahip olmak mümkündür. Radyasyon terapisindeki amaç iki yönlüdür: tümör kontrolü için yeterli olan ancak aynı zamanda normal dokulardaki komplikasyonları en aza indiren bir doz ve doz dağılımı sağlamak. Ancak, istenen klinik sonuçlar yalnızca iyi bir klinik ve dozimetrik uygulama ile gerçekleşebilir. Bu da ayrıntılı Kalite Kontrol prosedürlerini içeren kapsamlı bir KG programının uygulanmasıyla elde edilebilir. Brakiterapide KG konusunda kullanılabilecek, pratik çözümler sunan referanslar mevcuttur (16-19).

Bu referanslar kullanılarak merkeze özgü kapsamlı kalite güvence programı oluşturmak mümkündür. Mevcut BT gurup raporlarında da özetlendiği gibi, brakiterapi uygulamalarındaki kazalar, kaynakların izlenebilir kalibrasyonunun olmaması, miktarların ve birimlerin yanlış kullanılması veya doz hesaplama prosedüründe yapılan hatalar nedeniyle meydana gelmektedir.

Kalite kontrol programının genel amacı, kabul testleri tamamlanmış ve klinik kullanım için hazır halde bulunan bir sistemin zamana ve kullanıma bağlı olarak başlangıçtaki standartlara göre karşılaştırılması ve rutin klinik uygulamalarda kullanım için hazır halde bulundurulmasıdır (20).

d) Brakiterapi Kalite Kontrolünde Kaynak Kalibrasyonunun Önemi

Uygulama karmaşıklığı ve hassasiyetine ek olarak radyoaktif kaynak kullanımından dolayı, hem hastanın doğru tedavisi hem de hastaların, hastane çalışanlarının ve toplumun radyasyon güvenliği açısından brakiterapide rutin kalite kontrol programının titizlikle uygulanması çok önemlidir.

Kalite temininin sürdürülebilir olması için programın sorumlu medikal fizik uzmanı tarafından ölçüm periyotlarını ve yöntemlerini de içerecek şekilde belirlenmesi ve her kontrol sonunda ölçülen sonuçların dokümantasyonu gerekmektedir.

Genel olarak kalite kontrol programı kapsamında yapılması gereken testler iki grupta toplanabilir: Mekanik ve dozimetrik testler. Mekanik testler, cihazın özelliklerine bağlı olarak fiziksel parametrelerin kontrolü ve güvenlik sistemlerinin kontrolleridir. Dozimetrik testler ise her kaynak değişiminde, radyoaktif kaynağın aktivitesinin ölçülmesini ifade eder.

HDR Brakiterapilerde sıklıkla kullanılan kaynak İridyum-192 (Ir-192) kaynağıdır. Ir-192, 73,827 günlük bir yarı ömre sahip olan iridyumun radyoaktif bir izotopudur. Radyoaktif bozunmasını ve radyobiyojik etkisini de göz önüne alarak kaynağın tedavide her üç ila dört ayda bir değiştirilmesi gerekmektedir. Her merkez bölüme özgü (merkezde mevcut olan cihaz, kalibrasyon fantomları kuyu tipi veya farmer tipi iyon odaları vb.) uygun mevcut ölçüm aletlerinden yararlanarak kalite kontrol prosedürleri hazırlanmalıdır. Ayrıca hazırlanan prosedürlerden yararlanarak KG programı tasarlanmalıdır. Brakiterapi uygulamaları yapan merkezler, farklı bir yarı ömre ve dolayısıyla farklı bir değişim aralığına sahip kaynaklar için, yılda en az üç kez kapsamlı bir KG test sıklığı gerçekleştirilmelidir.

2. Tartışma

Brakiterapi Sistemlerinde Kaynak Test ve Kalibrasyonu

Sonradan yüklemeli HDR brakiterapi sistemlerinde sıklıkla Ir-192 kaynağı kullanılır. Bütün testler önemli olsa da kaynak testleri ve özellikle aktivite testi tedavi doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Brakiterapi dozimetrisi için KG programının önemli bir parçası kaynak kalibrasyonudur. Bazı brakiterapi kaynakları için, satıcılar belirtilen kalibrasyon değerlerin de $\pm 10\%$ 'a kadar belirsizlikler bildirir. Brakiterapi kaynaklarının son kullanıcı kalibrasyonu, yalnızca satıcının belirttiği kalibrasyonu kontrol etmek için değil, aynı zamanda uluslararası kabul görmüş standartlara göre izlenebilirliği sağlamak için de gereklidir. Afterloader'ın sızıntı radyasyonu güvenli bir cihaz için 0,1 m mesafedeki doz hızı 1 $\mu\text{Sv/h}$ 'dir (mikro sievert/saat) (21,22).

a) Kirlenme testi

Brakiterapi kaynağı ilgili ilk yapılacak uygulama kirlenme testidir. Kirlenme testi sırasında; Kaynak, kaynak kablosu, sahte ve sahte kablo radyasyon kirliliğinden arındırılmış olmalıdır. Maksimum doz seviyeleri ulusal düzenlemelerde ve ayrıca afterloader cihazı ile birlikte gelen dokümanda belirlenmiştir. Hem eski hem de yeni kaynakta silme testi ile kaynak değişimi gerçekleştirilir (18,19).

b) Referans Air Kerma (RAKR) Testi

Her yeni kaynak ile birlikte Referans Air Kerma (RAKR) belirten doz değeri, kaynak üreticisinden bir sertifika ile birlikte gelir. Bu sertifika kullanılarak, ölçüm ile bu RAKR değerinin doğruluğu ölçülerek tespit edilir. Kaynak değişiminden sonra ve klinik kullanımdan önce kaynak aktivite değeri yerel protokole göre ölçülmeli ve sertifikada belirtilen değerle karşılaştırılmalıdır. ICRU raporları 38 (11) ve ICRU 58 (23) brakiterapi kaynaklarının dozimetrik olarak kontrol edilmesini önermektedir.

Kaynak sertifikası

Ölçülen değer, belirtilen değerden % 5'ten fazla saptığında veya sertifikası olmayan kaynaklar kesinlikle klinik kullanıma alınmamalı ve kaynak üretici firma ile iletişime geçilmelidir. Ayrıca ölçüm sonucunda tespit edilen %3'ten büyük tutarsızlıklar araştırılmalıdır (18,24). Kaynak aktivitesi, her kaynak değişiminden sonra ölçülüp kaynak sertifika değeri ile karşılaştırılıp tedavi planlama bilgisayarına girilmelidir. HDR brakiterapi kaynaklarının aktivite ölçümünde kullanılan iki referans protokol Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yayınlanan Tec Doc 1274 (22) ve Tec Doc 1079 numaralı raporlardır (25).

Üç farklı yöntem kullanılarak kaynak aktivitesi ölçülür (18,19,26).

Aktivite ölçümü

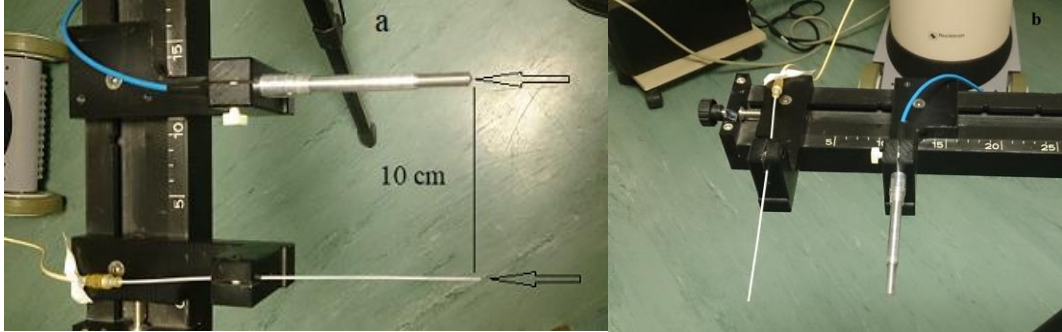
- Havada iyon odası ile ölçüm
- Kuyu tipi iyon odası ile ölçüm
- Özel fantomlar ile ölçüm

1) Havada iyon odası ile ölçüm

Kaynak gücünü ifade etmek için kullanılan nicelik hava kerma gücüdür. Birim zamandaki hava kerma hızı olarak tanımlanır. HDR brakiterapi kaynakları

için kullanılan birimi μGy (mikro gray) /h'tir. HDR brakiterapi kaynakları için üretici tarafından kaynak sertifikasında verilen değer görünür kaynak

aktivitesidir (A_{app}). Havada iyon odası ile ölçümde kullanılması önerilen iyon odaları 0,6cc hacimli Farmer tipi iyon odalarıdır.



Resim 1. a) Havada Brakiterapi kaynak ölçümü için özel üretilmiş kalibrasyon jig'i **b)** jig üzerine ölçüm sisteminin konulması.

Bu iyon odaları ile kullanılacak elektrometrelerin mutlaka İkincil Standart Dozimetri (Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL) laboratuvarlarında, ülke protokolüne göre belli periyotlarda kalibre edilmiş olması gerekmektedir. Ölçüm için özel üretilmiş kalibrasyon jig'leri de mevcuttur. Ölçüm sırasında iyon odası çevresinde metal herhangi bir şeyin olmamasına ve yerden gelecek saçılmalar göz önüne alınarak yerden yüksekte ölçüm düzeneğinin kurulması gerekir (Resim 1a,b). Pozisyonlama belirsizliğini ve kalibrasyon jig'i saçılma faktörün azaltmak için

kaynak iyon odasının geometrik orta noktasına gelecek şekilde, ölçüm uzaklığı ise plastik katater ve iyon odası arasındaki mesafe 10cm olacak şekilde ayarlanır (21).

Barometre ve termometrenin ortama uyum sağlayabilmesi için en az bir saat önce ölçüm yapılacak olan odaya konulması gerekir. Elektrometre ve iyon odası bağlantısı yapıp 60 sn'lik sürede elektrometreden elde edilen okuma değeri IAEA-Tec Doc-1079 ve IAEA-Tec Doc-1274'te belirtildiği üzere Denklem1 ve Denklem2'de yerine konarak kaynak aktivitesi bulunur (22,25-28).

$$K_R = N_K \cdot (M_u / t) \cdot K_{air} \cdot k_{scatt} \cdot k_n (d / d_{ref})^2 \quad (1)$$

$$\text{Aktivite} = K_R / (\Gamma_\delta) \cdot (W/e)_{air} \quad (2)$$

Denklemden,

K_R = Kaynağın referans hava kerma oranı

N_K = Gerçek foton enerjisinde iyonizasyon odasının hava kerma kalibrasyon faktörü

M_u = "t" süresinde toplanan ve kaynak transferi sırasında ortam sıcaklığı ve basıncı, rekombinasyon kayıpları ve geçiş etkileri için düzeltilen ölçülen yük.

t = Kaynak başlangıcından itibaren geçen zaman

K_{air} = Hava azaltma düzeltmesi

k_{scatt} = Oda Saçılma Faktörü

k_n = Gradient Faktörü

d = Ölçüm mesafesi, yani kaynağın merkezi ile iyonizasyon odasının merkezi arasındaki mesafedir

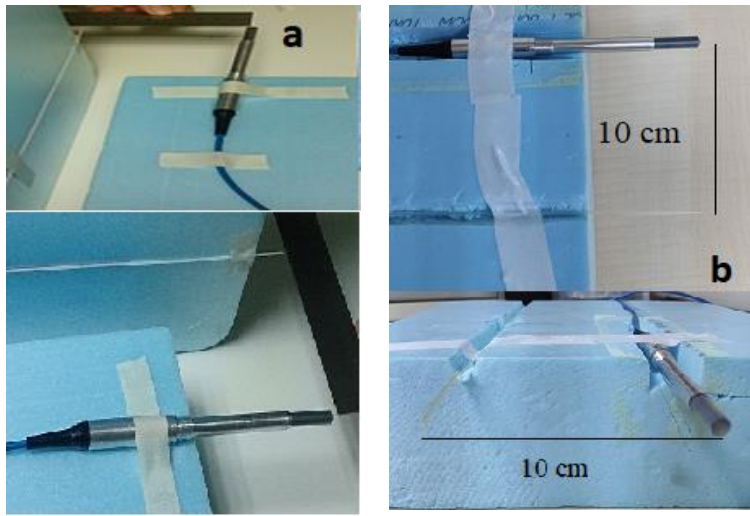
d_{ref} = Bir metrelik referans mesafesi

Γ_{δ} = Referans Hava Kerma

$(W/e)_{air}$ =Havada tek iyon çiftini üretmek için ihtiyaç duyulan ortalama enerji (8,730 mGy/R(miliGray/Röntgen)) göstermektedir.

Eğer merkezde özel jig fantomu yoksa strafor köpük üzerine iyon odası ucu dışarda kalacak şekilde farmer tipi iyon odası sabitlenir. 10 cm yanına kaynak Kalite Kontrol (Quality Assurance- QA) aplikatörü konumlandırılır. 10 cm iyon odası

merkezi ile aplikatörün merkezi arasındaki mesafedir. İyon odası kaynak merkezi eksene dik konumda ve iyon odası efektif kaynaklar yerine paralel olmalıdır.



Resim 2. a) İyon odası ve QA aplikatörü strafor köpüğün üzerine (Resim Med Fiz Uz. Halil Küçükük). **b)** İyon odası ve QA aplikatörü strafor köpüğün içine gömülerek konumlandırma sağlanabilir.

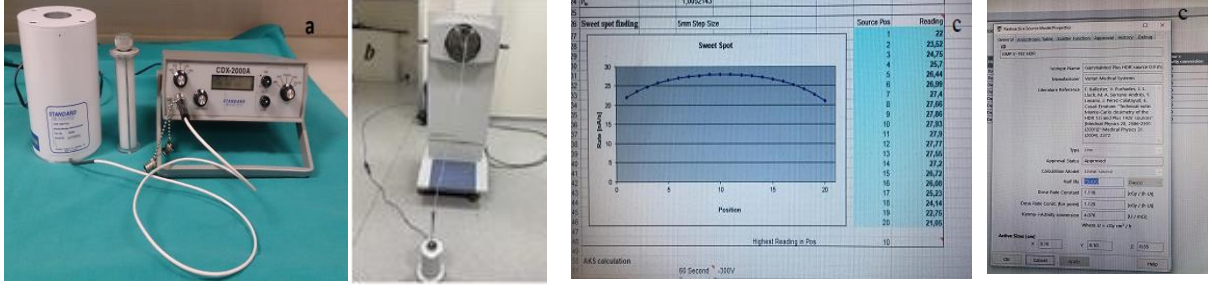
Bu düzenekle ölçüm alınırken konumlandığı yer, saçılmaya sebep verebilecek yapılardan arındırılmış (metal aksamdan ve yerden yeterince uzak) olmalıdır. Resim 2a, b’de farklı ölçüm düzenekleri görülmektedir.

2) Kuyu Tipi İyon Odası ile Ölçüm

Brakiterapi kaynak kalibrasyonları için kuyu tipi oda (Resim 3a), hem LDR hem de HDR kaynaklarının RAKR ölçebilen radyoterapi uygulamaları için özel olarak tasarlanmış tipte olmalıdır. Sadece atmosfere açık kuyu tipi odaların kullanılması tavsiye edilir. Hazne sızdırmaz hale getirilmişse ve gazın basıncı ortamın atmosfer basıncından daha yüksek bir seviyede ise, gazın yavaş sızması sorunu gelişebilir. Bu durumda, kalibrasyon faktöründe bir değişiklik meydana gelir. Atmosfere açık odaların sıcaklık ve basınç için düzeltmeye ihtiyacı vardır, çünkü kalibrasyon faktörü, genellikle 20 C° ve 101,3 kPa (kilopaskal) olmak üzere standart ortam koşullarına karşılık gelen hava yoğunluğuna dayanır. Odalar sadece aktivite birimlerinde ölçülür. Kuyu tipi oda ve elektrometrenin bağımsız kalibrasyon faktörlerine

sahip olabileceğine dikkat edilmelidir. Bu durumda, kuyu tipi oda ve elektrometre sisteminin toplam kalibrasyon faktörünü oluşturmak için kalibrasyon faktörleri birlikte çarpılmalıdır. Kuyu tipi bir odanın kalibrasyon noktası, kalibrasyon prosedürü sırasında kaynağın merkezinin konumlandığı nokta olarak tanımlanır. Bu nokta, kaynak uzunluğuna bağlı olarak bir kaynaktan diğerine farklılık gösterebilir. Bazı odalarda kuyuda sabit, çıkarılamayan bir ara parçası bulunur ve kaynak uygulama sırasında, uygun şekilde ara parçanın üstüne yerleştirilir. Diğer modellerde ise kaynak tutucuyu farklı yüksekliklere hareket ettirilip-sabitlemek için hareketli mekanizma bulunur. Kalibrasyon işlemleri sırasında kaynak daha sonra hareketli tutucunun altına yerleştirilir. Kalibrasyon noktasının konumu, iyon odasının

kalibrasyon sertifikasında belirtilmiş olması gerekir (22,23).



Resim 3. a) Kuyu tipi iyon odası b) kuyu tipi iyon odası ölçüm set-up pozisyonu c) Etkin kaynak yeri tespiti (22,25).

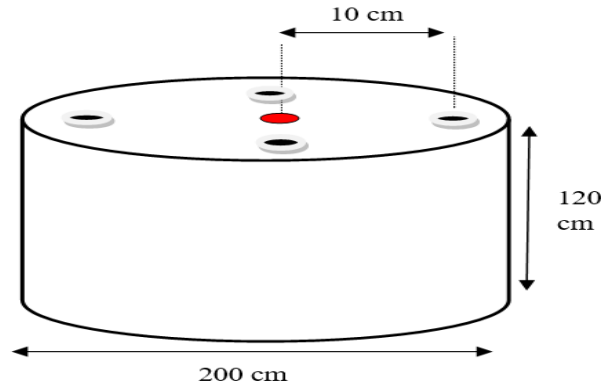
Ölçüm için, kaynak transfer kablosu ile kuyu tipi iyon odası ve elektrometre bağlantısı yapılır (Resim 3b). Barometre ve termometrenin ortama uyum sağlayabilmesi için en az bir saat önceden ölçüm yapılan odaya konulması gerekmektedir. Dikkat edilmesi gereken nokta, iyon odasının en yüksek sinyali verdiği ölçüm mesafesinin belirlenmesidir (Resim 3c). Ayrıca ara transfer kablolarının mümkün olduğu kadar düz hat üzerinde olmasına gayret edilmesi gerekir. Çoklu ölçümler alınarak maksimum okuma değeri ve pozisyonu bulunur. 1cm duruşlar ile 10 okuma değeri alınır.

En yüksek değer okunduğu mesafenin olduğu aralıkta 0,5 cm duruşlar ile ardaşık 10 okuma alınır. Okuma aralığı daraltılarak 0,2 cm duruş aralığı ile

10 okuma alınarak en yüksek okuma değeri ve pozisyonu hassas olarak belirlenir. Basınç, sıcaklık ve en yüksek okuma değerleri ile birlikte aktivite hesaplanır ve sertifika değeri ile karşılaştırılır. Fark % 5 in içerisinde olmalıdır (17,21,22).

3) Özel Fantomlarla Ölçüm

Kaynak aktivitesi, iyon odası, elektrometre ve silindirik katı fantom kullanılarak ölçülebilir. Silindirik fantomun geometrisi merkezde kaynağın gideceği kateter kanalı ve kanal çevresinde birbirine dik açı ile (0° , 90° , 180° , 270°) konumlanmış dört kanaldan oluşur (Resim 4). Kateter çevresindeki dört kanala iyon odasını sırayla yerleştirip 60 sn'lik okumalar alınır. Tüm geometrideki okumaların ortalaması alınıp aktivite hesaplanır (18,19).



Resim 4. Silindirik PMMA özel fantomun şematik gösterimi. Radyoaktif Ir-192 kaynağı merkezi eksenindeki kırmızı ile gösterilen kaynak kalibrasyon aplikatörüne uygun yere yerleştirilmektedir. Çevredeki siyahla gösterilen 7 cm uzaklıktaki 4 delik iyon odası girişini göstermektedir.

Merkezlerin imkanları doğrultusunda yukarıda tanımlanan farklı düzeneklerden, uygun olan ölçüm

düzenegi kullanılarak kaynağın aktivite değeri tespit edilir. Bunun için Türkiye Cumhuriyeti Fizik

Mühendisleri Odası- Kalite Uygunluk Belgesi (TC FMO-KUB) dökümanlarında aktivite tayini maddesindeki Tablo 1 örnek olarak kullanılabilir. Örnek olarak Tablo 1 de Elektrometre olarak Standart Imaging CDX-2000B ve İyon Odası olarak

Extradin-A19 kullanılarak yapılan ölçümler referans alınarak Denklem(3), Denklem(4), Denklem(5), Denklem(6), Denklem(7)'den yararlanarak nasıl hesap yapıldığı ayrıntılı anlatılmıştır.

Hava Kerma(HK)

$$(HK) = Mu * Nk(Ir - 192) * kair * kscatt * kn * Ctp \quad (3)$$

$$HK = 0,70 * 45,428 * 1,001 * 1 * 1,009 * 1,01473 = 32,5909$$

Basınç – sıcaklık düzeltmesi(Ctp)

$$(Ctp) = \{273.2 + T/273.2 + 20\} * \{1013/P\} \quad (4)$$

SERTİFİKA BİLGİLERİ

Tablo 1. Aktivite Tayini	
Üretici Firma	
Kaynak	Iridium -192
Ölçüm Tarihi	24.05.2012
Referans Hava Kerma	
Yarı Ömür - Aktivite	73,8 gün
Sertifikada belirtilen ölçüm tarihine göre geçen süre (kaynakla birlikte gelen fabrikadaki kaynak aktivite raporundan temin edilir)	109 gün
Bozunma Faktörü	0,3593

ÖLÇÜM BİLGİLERİ

TARİH :	
Elektrometre : Standart Imaging CDX-2000B	İyon Odası: Extradin - A19
Fantom	Havada build-up cap
Basınç : 1016 mBar Sıcaklık: 25,5°C	Ctp :1,01473
Nk (Co-60 (iyon odası ve dozimetrenin birbirlerine göre SSDL kalibrasyonu)	45,428 mGy/nC
Nk (Ir-192)	1.007
k_n (Gradient Faktörü)	1.009
k_{scatt} (Oda Saçılma Faktörü)	1
k_{air} (hava azaltma düzeltmesi)	1.001
Ölçüm mesafesi	10 cm
Ölçüm Zamanı (t) s	60 s
OKUMA (nC)	0,70nC
RHK (Referans Hava Kerma)	
(Γ_x) (Ir-192)	0.4658 R m ² /hCi ⁻¹
(Γ_x) (Co-60)	1.307 R m ² /hCi ⁻¹
Ölçülen Aktivite (Ci)	4,789 Ci Fark= %2,1
Ölçülen / Sertifika (%)	4,789 / 4,6889 = %2,1

HK= Hava Kerma

$C_p = 1,01473$ (Basınç,sıcaklık faktörü)

$\mu^0 = 0,70 \text{ nC}$ $T = 25,5$ Sıcaklık (C°) $P = 1016 \text{ mBar}$

$$\text{Referans Hava Kerma (RHK)} = \frac{HK * 60}{100} = 19,554 \quad (5)$$

$$\text{Aktivite} = \frac{RHK}{\Gamma * 8,764} = \frac{19,554}{0,4658 * 8,764} = 19,554 / 4,08227 = 4,789 \text{ Ci (Ölçümle bulunan aktivite değeri)} \quad (6)$$

$$A = A_0 * e^{-\lambda t} \quad (7) \quad A_0 * e^{-\left(\frac{0,693}{73,8}\right) * 109} = 13,05 * 0,3593 = 4,6889 \text{ Ci (Sertifika değerleri kullanılarak bozunma denklemleri ile bulunan aktivite değeri)}$$

Denklem 7 deki ;

A_0 = Başlangıçtaki aktivite, t = zaman, λ = Bozunma sabiti dir.

Kalite Kontrol Programı Test Sıklığı Ve Müdahale Seviyeleri

Hastaların güvenli ve doğru bir şekilde tedaviye girebilmeleri için klinik yoğunluğu göz önüne alınarak uygulanabilir kalite güvence programı oluşturulmalı ve protoller çerçevesinde zamanında titizlikle uygulanmalıdır (15,20).

Brakiterapide Radyasyon Güvenliği ve Emniyet

a) Radyasyon Güvenliği:

Ir-192 ile HDR ve PDR brakiterapisi, yaklaşık olarak 10 Ci 'ye kadar yüksek aktiviteye sahip radyoaktif kaynakları kullanır. Bu kaynaklarla çalışırken radyasyon güvenliğini sağlamak hem çalışan hem de hasta için büyük önem taşımaktadır. Güvenliğin dikkate alınmadığı durumlarda gereksiz radyasyona maruziyet kaçınılmazdır. Radyasyon güvenliği; çalışma ortamı, sızıntı radyasyonu, Afterloader ve acil durum prosedürlerini kapsamaktadır. Uluslararası kuruluşların bu konularla ilgili yayın ve bültenleri mevcuttur (18).

b) Ir-192 kaynaklarıyla çalışma için radyasyon riski analizi

Ir-192 kaynaklarıyla çalışma için radyasyon riski analizi için yapılması gerekenler aşağıda sıralanmıştır (20,24,29) .

İşlemler ve etkinlikler; radyasyon güvenliği gerekliliği ile ilgili 2014 yılında yayımlanan iki

çalışma bu konuya açıklık getirmektedir (30,31). Bu rapor tıp, tarım, endüstri, araştırma ve eğitim sırasında radyasyon kullanımı ve geçmiş faaliyetlerden kalan kalıntılar gibi kazalar veya kronik maruziyet durumlarında müdahale dahil olmak üzere tüm uygulamaları kapsamaktadır. Raporda brakiterapi uygulamalarında hasta güvenliği sorumluluğu hükümet, düzenleyici kurum, lisans sahibi veya kayıtlı kişi ve üreticiler arasında paylaşılmaktadır. Ancak, hastaların korunması ve güvenliği için birincil sorumluluk, radyasyon dozunun uygulanmasından sorumlu Radyasyon Onkolojisi Uzmanına aittir. Rapora göre kurumun uygulamalardan önce tedavi ve kaynak uygulama gerekliliklerini nasıl yerine getirebileceği, neler yapılacağı ile ilgili rehberlik sağlayacak kılavuzları oluşturması gerekmektedir.

Sorumluluklar

IAEA raporunda ilk sorumluluk hükümete aittir.

1) Hükümet sorumlulukları; Yasal ve düzenleyici çerçeveyi oluşturmak ve sürdürmek, yönetmelikler ve kılavuzlar oluşturmak ve teftiş ve uygulama eylemleri gerçekleştirmektir. Hükümetler halkı ve çevreyi korumaktır.

2) Düzenleyici kurum sorumlulukları; Uygulamanın yapıldığı ülkeye ait radyasyon güvenliği kurumlarını içermektedir. 2 hedefi vardır.

- İlk hedef, güvenli olmayan uygulamaları ve güvenli olmayan ekipman kullanımını önleyerek halk sağlığı ve güvenliğini korumak.
- İkinci hedef, halk sağlığını ve güvenliğini artıracak güvenli ve etkili uygulamaları ve ekipmanları teşvik etmektir.

Bu uygulama; Yetkilendirme, Gerekçeleştirme, Radyasyon Koruması ve Optimizasyonu ile Doz kısıtlamalarını kapsar. IAEA(25)'in ve ICRP'nin 60 numaralı (29) raporunda uygulama sırasında bu maddeler ayrıntısı ile açıklanmıştır. Raporunda, Justification, Optimizasyon ve Doz Sınırlamasından oluşan üç ilkesiyle birlikte radyasyondan korunma sistemi daha da kapsamlı hale getirilmiştir. Bu tavsiyelerin başlıca özellikleri (28) ;

- Etkin doz kavramının ve radyasyona maruz kalmanın canlı dokuda Radyobiyojik olarak meydana getirdiği zararların güncellenmesi;
- Komisyonun radyolojik korunmaya ilişkin üç temel ilkesini benimseyerek, bu ilkelerin iyonize olan radyasyon kaynaklarına nasıl uygulanacağını ve radyasyona maruz kalan bireyler açısından iyonlaştırıcı radyasyonun sağlık üzerindeki etkilerini tanımlanmasıdır.

Yetkilendirme; Düzenleyici kurumlar radyoaktif maddelerin kullanımını yetkilendirmekten sorumludur. Bu yetkilendirme, düzenleyici kurum faaliyeti desteklemek için gerekli bilgileri inceledikten ve faaliyetin güvenlik ve emniyet açısından gerekli değerlendirmesini yaptıktan sonra verilir.

Gerekçeleştirme; Maruz kalma olasılığının değiştirebilecek yeni bir radyasyon kaynağının tanıtımı, cihazın bulundurulmasının ve kullanılmasının zararlarının bireysel ve toplumsal faydalar tarafından ağır bastığından emin olmak gerekir. Sorulması gereken gerçekten brakiterapi uygulamasına ihtiyaç var mı? Kesinse uygulamaya izin verilir.

Radyasyon koruması ve optimizasyonu; Hastaya verilen dozun protokoller ve çalışmalar doğrultusunda kesin olması ve kritik organlar için doz sınırlayıcı kriterler tanımlanmış olarak tedavi için yeterli olmalıdır. Planlama ve uygulama

sırasında doz sınırlamalarına dikkat ederek, ihtiyaç duyulan radyasyon miktarı aşılmamalıdır.

Doz kısıtlamaları; mesleki ve kamusal maruziyeti kontrol etmek için kullanılır. HDR brakiterapi uygulamalarında, halkın maruz kalma ihtimali olan dozların optimizasyonu bu kısıtlamaların başında gelmektedir.

Diğer bir kısıtlamada çalışan personelin maruziyetinin engellenmesidir. Radyasyon sızıntısının olmadığı özel proteksiyonlu odalarda, tümörlü bölgeye uygun aplikatör yerleştirmeden sonra radyasyon onkoloğu, tıbbi radyasyon fizikçisi, radyoterapi teknisyeni ve eğitilmiş brakiterapi hemşiresinin tedavi öncesinde odadan ayrılması ile ve tedavinin dışarıdan kontrol konsolları ile birlikte kullanılan kameralar aracılığıyla yapılması personelin radyasyona maruziyetini kısıtlayıcı yaptırımlardandır.

Tedavi gören hastalar için doz kısıtlamaları yoktur. Dozlar Radyasyon Onkologları tarafından kritik çevre organ dozları da göz önünde bulundurularak protokoller çerçevesinde tanımlanır.

c) Emniyet

HDR brakiterapi kaynaklarının aktiviteleri yüksek olduğundan, güvenlik, hırsızlık, sabotajın önlenmesi, tespiti ve bunlara müdahale edilmesi, yetkisiz erişim, yasadışı transfer veya radyoaktif materyalleri içeren diğer kötü niyetli eylemler emniyeti kapsamındadır (30-32) . Alınması gereken güvenlik önlemleri, kaynağın ait olduğu IAEA tanımladığı kaynak kategorisine bağlı olarak tanımlanır (33). Bu kategoriye göre, radyoaktif kaynakların güvenliğini sağlamak için bir dizi güvenlik önlemlerinin alınması ve tanımlanması gerekmektedir. Bunlar;

- Hırsızlık veya kötüye kullanım riskini en aza indirecek önlemler.
- Radyoaktif kaynağın denetimi, şahsen veya elektronik ortamda kişisel denetim uygulayacak kişilere lisans sahibi tarafından yetki verildiğinde uygulanır.
- Radyoaktif bir kaynak kişisel gözetim altında değilse, elektronik güvenlik önlemleri alınarak herhangi bir hırsızlık veya kötüye kullanma girişimi takip edilmelidir.

- Bir alarm durumunda hırsızlık veya kötüye kullanım tespit edilirse, yetkili makama bildirmek zorunludur.

Kısaca lisans sahibinin, kaynağın nasıl korunacağına ilişkin açıklamayı da içeren bir güvenlik planına sahip olması gerekir

1) Ir-192 Kaynağının Kaydı

Kayıt tutma işlemi sırasında aşağıdaki prosedürün izlenmesi gerekmektedir.

- Yüksek aktiviteli bir kaynak bulunduğu konumdan başka bir kişiye veya transfer edilecekse yapılacak herhangi bir transfer yetkili makama bildirilmelidir.
- Alınan kaynağın ve kullanılmayan kaynağın kaynak verilerinin yetkili makama bildirilmesi için bütün birimin aynı standartlaştırılmış formları kullanması gerekir.
- Yüksek aktiviteli kaynak kullanılmıyorsa, kaynağın bulunduğu merkez, kaynağı güvenli bir şekilde bertaraf etmekle (ya depolanmak üzere IAEA'nın bünyesindeki yerel kuruma veya kaynağın alındığı ülke veya santrale yollamak şeklinde) yükümlüdür.

2) Kaynakların Güvenli Kullanımı

Brakiterapide kullanılan cihazların kullanımı ve KG 'sine ilişkin sorumluluklar;

- Tıbbi cihaz kullanıcılarının ve teknik personelin eğitimi ve sertifikasyonu
- Bu tıbbi cihazların bakımının yapılması
- Tıbbi cihazların kayıt altına alınması ve bakım durumunun genel görünümü,
- Tekrar kullanılabilir tıbbi cihazların temizlenmesi/sterilizasyonu
- Tıbbi cihazları içeren olayların kaydı
- Tıbbi cihazların devre dışı bırakılması

şeklinde özetlenebilir.

3) Personel Eğitimi

HDR programında yer alan klinik personel arasında yetkili kullanıcı hekimi, yetkili tıbbi fizikçi, radyasyon güvenliği görevlisi, dozimetrist, hemşire ve radyoterapi teknisyeni bulunur. Bu rollerden bazıları birleştirilebilir. Örneğin, tıbbi fizikçi aynı zamanda radyasyon güvenliği görevlisi olarak da görev yapabilir ve bir dozimetrist yerine tedavi planlamasını yapabilir. Yetkili hekim ve tıbbi fizikçi, ilgili tıbbi uzmanlık kurulu tarafından sertifikalandırılmalı ve brakiterapi konusunda özel eğitim almış olmalıdır. En önemli husus, HDR tedavilerine katılan tüm personelin aldığı radyasyon güvenliği eğitimidir. Bu eğitim yeni personele ve ardından HDR programındaki herkese yıllık olarak verilmelidir. Bu eğitimlere, tedavi tamamlandıktan sonra veya elektrik kesintisi olduğunda kaynağın yükleyici kasasına geri çekilememesi gibi büyük bir acil duruma uygun müdahale konusunda eğitim de dahildir.

3. Sonuç

Yıllar içerisinde Brakiterapi, bakım standartları olarak 4D görüntüleme ve sofistike planlama yöntemlerini içeren yüksek teknoloji bir radyoterapi modalitesine dönüşmüştür. Bununla birlikte, klinik BT belirsizlikleri yeterince ele alınmamıştır. Bu belirsizliklerin başında kaynak aktivitesinin doğruluğu ve radyoaktif kaynağın optimum kullanımı için kaynak kalite programlarının uygulanmasının ele alınması gerekir. Bu programların mevcut BT cihazın yapısına uygun, merkezde mevcut olan ekipmanlar doğrultusunda yapılması gerekir (34). Günlük nokta kontrolü, uygun ekipmanın (çıkarma kiti ve kurşun konteynır) yerinde olduğundan ve basit acil durum talimatlarının kolayca erişilebilir olacak şekilde asılması gerekmektedir. Herhangi bir şekilde kaynak mekanizmasındaki sorun nedeni ile kaynağın elle geri çekilmesi gerekiyorsa, radyasyon güvenliğinin standart ilkeleri, yani zaman, mesafe ve koruma izlenmelidir. Brakiterapi ekibimizin her bir üyesinin çeşitli acil durumlarda neler yapacağını yıllık eğitim sırasında gözden geçirmesi gerekmektedir. Ayrıca hataların incelenmesi, çoğunun insan hatasından kaynaklandığını göstermektedir

KAYNAKLAR

1. IAEA Human Health Series No.30. Implementation of High Dose Rate Brachytherapy in Limited

Resource Settings. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015.

2. American Association of Physicists in Medicine. Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. *Med Phys.* 1997;24(10):1557–98.
3. Gerbaulet A, Pötter R, Mazeron JJ, Meertens H, Limbergen EV, editors. *The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy*. Leuven, Belgium: European Society for Therapeutic Radiology and Oncology; 2002.
4. Supe SS, Ganesh KM, Vaithianathan H, Sankar BN. Radiobiological quality of high dose rate interstitial brachytherapy treatments of carcinoma of the cervix. *Rep Pract Oncol Radiother.* 2006;11(1):13–22.
5. Kishan A, Cook R, Ciezki J, et al. Radical prostatectomy, external beam radiotherapy, or external beam radiotherapy with brachytherapy boost and disease progression and mortality in patients with Gleason score 9-10 prostate cancer. *JAMA.* 2018;319(9):896–905.
6. Zaider M, Hanin L. Tumor control probability in radiation treatment. *Med Phys.* 2011;38(2):574–83.
7. Kutcher GJ, Burman C. Calculation of complication probability factors for non-uniform normal tissue irradiation: the effective volume method. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1989;16(6):1623–30.
8. Jones D. ICRU Report 50—prescribing, recording and reporting photon beam therapy. *Med Phys.* 1994;21:833–4.
9. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 62. Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (Supplement to ICRU Report 50). Bethesda, MD: ICRU; 1999.
10. Pieters BR, De Back DZ, Koning CC, Zwinderman AH. Comparison of three radiotherapy modalities on biochemical control and overall survival for the treatment of prostate cancer: A systematic review. *Radiother Oncol.* 2009;93(2):168–73.
11. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 38. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology. Bethesda, MD: ICRU; 1985.
12. Saynak M, Çukurçayır F, Arlı A, Okumuş D. Yüksek Doz Hızlı Brakiterapi Radyobiolojisi. *Turk J Oncol.* 2017;32(Suppl 1):11–22.
13. Kubo HD, Glasgow GP, Pethel TD, Thomadsen BR, Williamson JF. High dose-rate brachytherapy treatment delivery: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 59. *Med Phys.* 1998;25:375–403.
14. Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, et al. *Comprehensive QA for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40.* *Med Phys.* 1994;21:581–618.
15. Gerbaulet A, Pötter R, Mazeron JJ, Meertens H, Limbergen EV, editors. *The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy*. Leuven, Belgium: European Society for Therapeutic Radiology and Oncology; 2002. OCLC 52988578.
16. Edai BY. Radiation therapy techniques in cancer treatment. In: Post TW, editor. *UpToDate*. Waltham, MA: UpToDate; 2022. p. 1–15. Available from: https://www.uptodate.com/contents/radiation-therapy-techniques-in-cancer-treatment?search=radiotherapy&source=search_result&selectedTitle=1~150&usage_type=default&display_rank=1
17. Venselaar JLM, Pérez-Calatayud J. *A Practical Guide to Quality Control of Brachytherapy Equipment. European Guidelines for Quality Assurance in Radiotherapy*; 2004. Available from: <http://www.estro.org/binaries/content/assets/estro/school/publications/booklet-8---a-practicalguide-to-quality-control-of-brachytherapy-equipment.pdf>
18. Thomadsen BR, Erickson BA, Eifel PJ, Hsu IC, Patel RR, Petereit DG, et al. A review of safety, quality management, and practice guidelines for high-dose-rate brachytherapy: Executive summary. *Pract Radiat Oncol.* 2014;4(2):65–70.
19. Nath R, Anderson LL, Meli JA, Olch AJ, Stitt JA, Williamson JF. Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. *Med Phys.* 1997;24(10):1557–98.
20. International Atomic Energy Agency. *Setting Up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects*. Vienna: IAEA; 2008.
21. Ballester F, Puchades V, Lluch JL, Serrano-Andrés MA, Limami Y, Pérez-Calatayud J, et al. Technical note: Monte-Carlo dosimetry of the HDR 12i and plus 192Ir sources. *Med Phys.* 2001;28(12):2586–91.
22. International Atomic Energy Agency TECDOC-1274. *Calibration of Photon and Beta Ray Sources Used in Brachytherapy*. Vienna: IAEA; 2002. ISSN 1011-4289.
23. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 58. *Dose and Volume Specification for Reporting Interstitial Therapy*. Bethesda, MD: ICRU; 1997.
24. Commissie N, Stralingsdosimetrie V. *Code of Practice for Quality Assurance of Brachytherapy with Ir-192 Afterloaders Disclaimer regarding NCS reports*. 2018 May.
25. International Atomic Energy Agency Tec Doc1079. *Calibration of Brachytherapy Sources: Guidelines on Standardized Procedures for the Calibration of Brachytherapy Sources at Secondary Standard Dosimetry Laboratories (SSDLs) and Hospitals*. Vienna: IAEA; 1999.
26. Bidmead AM, Sander T, Locks SM, Lee CD, Aird EGA, Nutbrown RF, et al. *The IPEM code of practice for determination of the reference air kerma rate for HDR 192Ir brachytherapy sources based on*

- the NPL air kerma standard. *Phys Med Biol.* 2010;55(11):3145–59. doi:10.1088/0031-9155/55/11/011.
27. Hanson WF. Calibration of brachytherapy sources. *Int J Radiat Oncol.* 1979;5(April):114–5.
 28. Küçük H. Brakiterapi sistemlerinde kalite kontrol. In: Becerir H, editor. *Radyoterapi Fiziği.* 1st ed. İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık; 2020. p. 921–31.
 29. Allisy A, Jennings WA, Kellerer AM, Müller JW, Rossi HH, Seltzer SM. ICRP-60. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. *Int J Radiat Oncol.* 1998;31(1):1–31.
 30. International Atomic Energy Agency. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. Vienna: IAEA; 2007. Available from: <http://www-ns.iaea.org/standards/>
 31. International Atomic Energy Agency. Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources. Vienna: IAEA; 2004.
 32. Of C, On C, Safety THE, Of S, Sources R, Sur CDEC, et al. Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources. IAEA. 2004 <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20485104>
 33. International Atomic Energy Agency. Safety Standards for Protecting People and the Environment: GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014. Available from: http://ec.europa.eu/dgs/communication/services/visual_identity/index_en.htm
 34. Wilkinson DA. High dose rate (HDR) brachytherapy quality assurance: A practical guide. *Biomed Imaging Interv J.* 2006;2(2).