**PROF.DR.CENGİZ KURTMAN**

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ RADYASYON ONKOLOJİSİ AD**

**DERS EKLEME**

**KÜTÜPHANE VE DÖKÜMANTASYON DB.**

**CV:** Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalında ve A.Ü. Dikimevi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu’nda Radyasyon Onkolojisi konusunda eğitim, öğretim faaliyetlerini sürdürmekte olup çok sayıda uluslar arası ve ulusal toplantı, kurs ve seminere konuşmacı, dinleyici ve bilimsel bildiri ve SCI, uluslar arası ve ulusal dergilerde basılmış çok sayıda yayınları mevcuttur. Yurt dışında; Amerika Birleşik Devletleri Duke Üniversitesi (Kuzey Karolina), North Carolina State Üniversitesi Kuzey Karolina), Memorial Sloan Kattering Cancer Center (New York) bünyesinde özellikle üç boyutlu konformal radyoterapi planlaması ve uygulamaları konusunda eğitim alıp deneyim kazandım, ayrıca steriotaksik radyoterapi ve diğer Radyasyon Onkolojisi konularında çalışmalar yaptım. Yine Almanya Berlin Frei Üniversitesi’nde üç boyutlu konformal radyoterapi planlaması ve uygulaması konusunda ayrıca vasküler brakiterapi ve total vücut ışınlaması konusunda eğitim alıp deneyim kazandım. Amerika Birleşik Devletleri Seatle Fred Hutchinson Cancer Research Center (Washington) ve Swedish Medical Center (Washington) bünyesinde total vücut ışınlaması konusunda, Kansas Üniversitesinde yeni radyoterapi teknikleri (IMRT) konusunda eğitim alıp deneyim kazandım.     Üç boyutlu konformal radyoterapi planlaması için gerekli olan CT simülatör, Voxel Q sanal simülatör, Cad-plan doz planlama bilgisayarı, MLC, RMS, Portal Vision ve C serisi Varian 2300 C/D lineer hızlandırıcısı Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı içinde mevcuttur.Üç boyutlu konformal planlamanın ilk versiyonu Target GE ile çalıştım, 1995 yılından günümüze kadar gelişmiş yeni versiyon CT simülatör, sanal simülatör, Cad-plan Varian üç boyutlu konformal planlama üniteleri ile çalıştım ve çalışmaya devam etmekteyim. Bu konuda gerek yurt dışı ve gerekse Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalında çeşitli uygulamalarda bulunup deneyim kazandım. Üç boyutlu konformal radyoterapi planlama konusunu içeren çok sayıda uluslararası dergilerde makaleler ve bildirilerim yayınlandı, yine aynı konuda birçok ulusal hakemli dergilerde basılmış makale ve bildirilerim mevcuttur. Üç boyutlu konformal radyoterapi konusunda çok sayıda ders, kurs ve seminer verdim.  Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalında hastalar için üç boyutlu konformal radyoterapi planlaması ve uygulamalarını devam ettirdim. Metastaz ve Kanser biyolojisi konusunda araştırmalara devam etmekteyim.

DERSLER;

**RADYOBİYOLOJİ DE HÜCRE SİKLUSU, 5R ve HASAR**

Radyasyon alanında görev yaparken temel biyolojik etkileri bilmek gerekir. İyonize edici radyasyonun canlıda direkt ve indirekt etkisi vardır. Dokularda çoğalma hücre siklusu ve fazlar halindedir. Hücrenin hangi fazda olduğu radyasyondan etkisinde önemlidir. Radyasyon alan dokuda 5R (Repair, Repopülasyon, Reoksijenasyon, Redistribüsyon, Radyasyona hassasiyet/Resistans) kavramı temel olarak bilinmelidir. Hücre siklusu ve 5R ile ilişkili olarak radyasyon hasarı tamir olabilir, birikebilir ve/veya ölüme neden olabilir. Tıpta radyasyon alanında çalışanların radyasyon biyolojisi temel konularını anlaması ve bilmesi yaptıkları görev ve sorumluluklarını daha iyi kavramalarına yarar sağlar. Bu nedenle İyonize edici radyasyonun biyolojik etkilerini anlamak için bazı temel kavramları bilmek ve anlamak gereklidir (1,2).

Yüksek enerjili radyasyonun iyonize edici etkisi vardır; yani atom ve moleküllerden elektronları koparabilir. İyonizasyon işlemi canlıda, doku ve hücrelerde meydana gelirse zarar verebilir. İyonize radyasyon; partiküler (elektron, proton, nötron, alfa partikül vbg) ve partiküler olmayan (fotonlar; x-ışını, gama radyasyon) olarak iki temel guruptadır. Partiküler radyasyonun kütlesi ve yükü vardır (nötron yüksüzdür), bu nedenle dokuya girince derinlere gidemez (0.01-40 mm) ve yüzey de bulunan kanserlerde kullanılması daha uygundur. Fotonlar ise yüksek enerjileri nedeniyle delicidir ve derinde yerleşen kanserlerin yok edilmesinde, tedavisinde kullanılabilir ve vücuttan geçip gittikleri için radyolojik görüntü almada da kullanılabilirler (3). İyonize radyasyon dokuya gelince iyonlaşma, radikal oluşumu, oksidasyon reaksiyonu oluşturur.

**DİREKT ETKİ** (%20), DNA da kopma kırılma ile hücrenin en önemli merkezine zarar verir.

**İNDİREKT ETKİ** (%80), elektron koparma, iyonlaşma, oksidasyon, hidroksil radikaller oluşur (10-8 sn). İnsan vücudu %70-80 oranda sudur. Radyasyon geldiğinde su molekülü ile etkileşme oranı fazladır ve hidroksi su radikalleri ve süper oksit oksijen radikalleri meydana gelir (H**.**, OH**.**, O**.**). Oksijen molekülü kolayca başka molekül ile reaksiyona girmektedir. Şayet radyasyon verildiği sırada ortamda oksijen fazla ise meydana gelecek radikallerin etkileri artar. Oluşan radikallerin %20’si zehirli-toksik, %80’i bu etkide değildir. Radikal zehirli etkide ise bağlandığı molekülün fonksiyonunu bozar. Şayet zehirli radikal DNA molekülüne ulaşır ve bağlanırsa hücrenin en önemli merkezine zarar verir.

**HÜCRE SİKLUSU:** Çoğalan normal hücreler veya kanser hücreleri çoğalırken belli fazlardan-aralıklardan (G: Gap-Aralık-Faz) geçerler. Her normal hücrenin ve kanserin çoğalma hızı ve süresi faklıdır. Sürenin uzunluğunu belirleyen aşağıda anlatıldığı gibi G1 fazıdır (4).



**G0 (Gap 0):** Bu faz hücrenin bekleme, dinlenme, uyku süresidir. Hücre burada yıllarca kalabilir. Bazı kanserlerin yıllarca sonra tekrar çoğalmaya başlamasında G0 fazı da etkili olabilir. Çoğalmayan hücreler esas olarak radyoterapi ve kemoterapiye daha dayanıklıdırlar. Bir hücre ne kadar fazla faaliyet ve çoğalma-bölünme içinde ise o derece daha hassastır.

**G1 (Gap 1):** Birinci aralık-faz’dır. Hücre siklusunun uzunluğu kısalığı burada bulunduğu süre ile çok ilgilidir. Burada amino asit temini, protein sentezi ve RNA sentezi yapılarak DNA sentezine hazırlık yapılmaktadır. G1 fazı ne kadar uzun olursa hücre o kadar yavaş ve uzun sürede bölünür, süre kısa olursa hızlı ve çabuk bölünür. Bu hücre kanser ise hızla büyür ve yayılır.

**S (Sentez):** Sentez yapılan aralık-faz’dır. Burada protein sentezi ve özellikle DNA sentezi yapılır.

**G2 (Gap 2):** İkinci aralık-faz’dır. Burada hücre mitoz yapmaya ve bölünmeye hazırlanmaktadır. RNA ve protein sentezi devam eder.

**M (Mitoz):** Hücre burada profaz, metafaz, anafaz, telofaz aşamalarından geçerek ikiye bölünerek çoğalmasını tamamlar. Bir hücreden iki hücre meydana gelir. Mitozu tamamlayan hücreler yenidir ve çoğalmak üzere tekrardan yeni hücre siklusuna girerek yeni hücrelerin meydana gelmesini devam eder, hücre kanser ise hızla büyür ve yayılır. Bu aşamadan sonra bazı hücreler çoğalmaz ve G0 fazına girerek saatlerce-günlerce-yıllarca beklemede kalabilirler.

Radyoterapi verildiğinde normal veya kanser hücresi G0, G1 ve S fazında ise hemen ölmez, radyasyon iyonlaşma, radikal oluşumu ile radyasyonun zarar verici, zehirleyici etkisini yapabilir ve ancak bu etkiler birikirse ve çok artarsa hücre çoğalamaz ve ölebilir. Bu etkiyi radyasyonun indirekt etkisi içinde tanımlarız. Normal veya kanser hücresi radyasyon uygulandığında G2 ve/veya M fazında ise hızla etkilenir çoğalamaz ve ölür. Bu etkiyi radyasyonun direkt etkisi içinde tanımlarız.

**RADYASYONUN DOKU İLE ETKİLEŞİMİNDE 5R KAVRAMI:** Önceleri radyasyonun biyolojik etkileri 4R kavramı (5) ile anlatılırken günümüzde 5R kavramı ile anlatılmaktadır.



1. **R**epair (Tamir): Hücreyi radyasyon etkilediğinde hemen tamir başlar ve normal doku hızla oluşan radyasyon hasarını organize olarak tamir etmek ister, ancak kanser hücresi organize değildir, tamiri daha yavaş ve daha etkisizdir.
2. **R**epopulasyon (Yeniden çoğalma): Radyasyon ile ölen dokudaki hücrelerin yerine zamanla yeni hücreler çoğalarak gelir. Bu işlem normal dokuda olursa iyidir ancak kanserde olursa kanserin tekrar dan büyümesi anlamındadır (6).
3. **R**eoksijenasyon (Yeniden ve artarak kanlanma ve oksijenlenme): Bu kavram daha çok kanser kitlesinin küçülmesi sırasında olan bir kavramdır. Büyük kanser kitlesinin dış yüzeyine ve çevresine doğru yer alan hücreler çevreden difüzyon ile beslenebilir veya yakınında ki damar dokudan gelen oksijen ve besin kaynaklarından yararlanır. Oysa kanserin merkezinde yeteri kadar damar doku oluşamadığından oksijen ve beslenme sorunu vardır ve hipoksik-nekroz alanları oluşur. Kanserdeki bu hipoksik alanlar radyasyonun öldürücü etkisinden çevrede ki oksijenlenen kanser dokuya göre daha az etkilenerek kanserin yaşaması ve çoğalması devam edebilir. Yukarda anlatıldığı gibi; şayet ortamda oksijen varsa radyasyonun oluşturduğu radikaller daha zehirli olmaktadır ve kanser hücreleri oksijen varlığında radyasyon ile daha kolay yok edilirler. Neticede; dışta oksijen alan ve kanlanan kanser doku radyasyon ile ölerek kanser kitlesi küçülmeye başlar ve oksijensiz merkez bölgelere kan akımı ulaşarak hipoksik hücreler oksijenlenir ve sonra ki seanslarda uygulanan radyasyon tedavisi (Radyoterapi, RT) ile kanser merkezindeki hücreleri de yok etmeye başlar.
4. **R**edistirübisyon (Yeniden dağılma): Çoğalan normal ve kanser hücreleri belli bir zaman siklusu ve aşamaları ile çoğalmaya devam ederler. Yukarda hücre siklusu konusunda detaylı anlatıldığı gibi, normal veya kanser dokusunda ki milyarlarca hücreye radyasyon uygulandığı sırada hücre siklusunun G0, G1 ve S faz içinde olan hücreler hemen yok olmaz iken, G2 ve Mitoz (M) aşamasında olan hücreler çok kolay etkilenerek zarar görürler ve yok olurlar, yani RT sonrası ortamda G2 ve M hücreleri kalmaz. Geriye kalan G0, G1 ve S fazında olan milyarlarca hücre sonra ki zaman periyodunda ilerleyerek bazıları tekrar G2 ve M fazına girerek yeniden hücre siklusu içinde dağılma sağlanmış olur.
5. **R**adyosensitif (Radyasyona hassasiyet) ve **R**adyorezistan (Radyasyona direnç): Bazı normal ve bazı kanser doku ve hücrelerin doğal olarak veya bulunduğu aşamaya göre radyasyona hassas olduğu veya bazılarının dirençli olduğu bilinir. Hemotolojik kök hücreleri, kan-bağışıklık hücreleri, epitel kök hücreleri, üreme sistemindeki kök-gamet hücreleri, embriyo hücreleri, çok hızlı çoğalan G2-M oranı fazla “blast” yapıda ki tümörler radyasyona hassastır (7), ancak patolojik olarak kötü farklılaşmış (az diferansiye) kanserlerin sağ kalım oranları kötüdür. Genel olarak histolojik yapısına göre nöronlar, bağ ve destek doku gibi normal dokular ayrıca patolojik yapısına göre (melanoma, sarkoma vbg) radyasyona dirençli (**R**adyorezistan) çok sayıda doku ve tümör vardır. Yukarda anlatılanlardan yeniden oksijenlenme, yeniden dağılım kavramları radyasyona hassasiyet kavramı içinde tanımlanabilirken, tamir ve yeniden çoğalma ise radyasyona direnç kavramı içinde tanımlanır.

**SUBLETHAL, LETHAL ve POTANSİYEL LETHAL HASAR:** Radyasyon dokuya yollandığında molekül ve atomun içinden hiçbir etkileşime girmeden, yani DNA’yı etkilemeden, elektron koparmadan, iyonlaşma ve radikal oluşturmadan geçip giderse hiçbir etki olmaz.

**Sublethal hasar;** radyasyonun hücre de DNA’yı etkilediği, molekül ve atomlarındaki elektronları kopardığı ancak bu etkilerin tam olarak hücrenin ölmesi için yeteri kadar olmadığıdır. Radyasyon ile oluşan hasarlar aynı aşamada ve sürede tamir edilebilmektedir bu nedenle de hücre ölmez, ancak hasar etkisi birikicidir (8). Şayet radyasyon verilmeye devam edilirse ve hasar etkileri birikerek artarsa nihayetinde hücre ölür. Burada söz konusu olan temel mekanizma radyasyonun indirekt etkisidir. Genelde G0, G1 ve S fazında ki hasarlar birikerek belli bir eşik noktadan sonra hücrenin yok olmasını sağlar. Partiküler olmayan radyasyon (fotonlar; x-ışını, gama radyasyon) ile, normal fraksiyone radyoterapide ve eksternal-uzaktan radyoterapide subletal hasarlar zaman içinde kanser hücresinde birikerek hücreyi öldürür. Normal hücrelerin tamir yetenekleri daha fazla olduğu için normal hücreler radyasyon alınmayan sürelerde subletal hasarları kanser hücrelerine mukayese ile daha güzel tamir ederler.

**Lethal hasar;** radyasyon alan hücre hemen veya kısa süre içinde ölür. Radyasyonun oluşturduğu hasarı hücre tamir edemez çünkü radyasyon hasarı çok fazla ve ciddidir. Burada söz konusu olan temel mekanizma radyasyonun direkt etkisidir. Radyasyon ile genelde G2 ve M fazında ki DNA ve kromozom hasarları ve hücre içinde ki diğer kritik yapı ve moleküllerde ki (mitokondri, RNA vbg) hızlı ve ciddi zararlar hücrenin yok olmasını sağlar (8). Partiküler radyasyon (elektron, proton, nötron, alfa partikül vbg) ile, hipofraksiyone radyoterapide ve brakiterapi-yakından radyoterapide lethal hasarlar hızla kanser hücresinde etki yaratarak hücreyi öldürür. Normal hücrelerin tamir yetenekleri daha fazla olmasına rağmen partiküler radyasyon (elektron, proton, nötron, alfa partikül vbg) ile hipofraksiyone radyoterapide ve brakiterapi-yakından radyoterapide normal hücreler de de ciddi öldürücü-lethal hasarlar meydana gelebilir (9,10). Bu nedenle radyoterapi planlamalarında normal dokuların korunması her aşamada çok önemlidir.

**Potansiyel Lethal hasar;** radyasyon alan hücre hasar görür ama ölmez ancak radyasyon alan hücrenin ortam ve şartlarını değiştirirseniz hücre ölümü potansiyel kazanır. Örneğin homeostaz ve dengeli bir ortamda yaşayan ve çoğalan normal hücreler veya kanserli dokuların olduğu yerde, radyasyon verildiğinde veya sonrasında asit-baz dengesini ve elektrolit seviyesini değiştirirseniz, örneğin; ortam hipoksik veya bol oksijenli ortama ulaşırsa, ısı artışı (hipertermi) veya ısı azalışı (hipotermi) olursa, kemoterapi-immünoterapi-antikorlar ile ek tedaviler uygulanırsa normalde ölmeyecek olan doku ve hücrelerin ölümüne potansiyel sağlanır (11).

**REFERANSLAR:**

1. Radiobiology and the role of the radiobiologist in the context of a teaching-oriented radiation oncology department. [Baker DG](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Baker%20DG%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=1223977). Radiol Clin. 1975; 44(6):579-86.
2. Radiation Biology: A Handbook for teachers and students. IAEA-International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010
3. Radiobiology for the radiologist. Hall E. J Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, 2000
4. Temel Radyasyon Onkolojisi, [M. Beyzadeoğlu, C. Ebruli](https://www.nadirkitap.com/kitapara.php?ara=kitaplari&tip=kitap&yazar=murat+beyzadeoglu,+cuneyt+ebruli),  [GATA](https://www.nadirkitap.com/kitapara.php?ara=kitaplari&tip=kitap&yayin_Evi=gata) Yayın evi, Ankara, 2008
5. Experimental results and clinical implications of the four R’s in fractionated radiotherapy. Trott KR. Radiat Environ Biophys. 1982; 20(3):159-70
6. Repopulation during fractionated radiotherapy: much has been learned, even more is open. Baumann M, Dörr W, Petersen C et al. Int J Radiat Biol. 2003; 79(7):465–67
7. Emami B, Lyman J, Brown A et al. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1991; 21(1):109-122
8. Repair of radiation damage to DNA. Willers H, Dahm-Daphi J, Powell SN. Br J Cancer. 2004: 90(7):1297-1301
9. Introduction to clinical radiation biology. Willers H, Held KD. Hematol Oncol Clin North Am. 2006; 20(1):1-24
10. The radiobiology of hypofractionation. [Nahum AE](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Nahum%20AE%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=25797579). [Clin Oncol.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25797579) 2015; 27(5): 260-9. Clinical principles and applications of chemoirradiation. In: Levitt SH, Purdy JA, Perez CA, Vijayakumar, S. Technical basis of radiation therapy, 4th revised edn. Springer, Berlin, 2006

**RADYASYON FİZİĞİ, RADYOTERAPİ**

Radyasyon tıp alanında kullanılan önemli bir fizik parametredir. Sağlık alanında meslekleri gereği radyasyon ile çalışacak bireylerin radyasyon kavramını anlamaları kullandıkları malzeme ve cihazların önemini ve radyasyondan korunma için önemlidir. RA kelime veya hecesinden anlam kazanır. Radyasyon elektro manyetik enerji biçimidir. Özellikle iyonize edici radyasyon tıp alanında hastalıkların tanısı ve kanserin tedavisinde yaygın kullanılır. Partiküler radyasyonun etkileri farklıdır. Radyasyonun madde ve doku ile etkileşiminde ki basamaklar ve dozlar iyi bilinmelidir. Bu derlemede radyasyon fiziği konusunda temel hususlara vurgu yapılmıştır. Radyoterapi, tıbbi görüntüleme, nükleer tıp konularında ki uygulamaları anlamak için radyasyonun tanımı ve radyasyonun temel fizik kuralları hakkında fikir sahibi olmak önemlidir. Radyasyon ışın olarak ta tanımlanabilir ve bir enerji türüdür. Elektro Manyetik Enerji (EME) olarak tanımlanır. Radyasyon kelimesi “RA” ile ilişkilidir ve tarihte ışık, göz, tanrı ve bunun gibi anlamlar yüklenmiştir. Türk dilinde ve yabancı dillerde “RA veya RE” hecesinden türemiş çok kelime vardır (Radyasyon, Radyoterapi, Radyoaktif, Radyoloji, Radyo, Radikal, Radiks, Ray, Radar, Renk, Resim, Rahmet, Rahim..vbg). EME geniş bir spektrumdadır; dalga boyu çok büyük, frekansı çok küçük ve enerjisi çok küçük olan uzun dalgadan sonra sırasıyla radyo, radyofrekans, mikrodalga, kızıl ötesi, görünür ışık, ultraviyole (mor ötesi), x-ışını, gama ışını, foton gibi dalga boyu çok küçük frekansı çok büyük ve enerjisi çok yüksek özellikte ışın türleri vardır (Khan ve ark., 2003). Temel olarak elektron koparmayan iyonize olmayan radyasyondan korkulmazken iyonize edici radyasyonun çok ciddi zararları oluşabilir ve radyasyondan korunma prensipleri çok önemlidir. Mor ötesi, x-ışını, gama ışını, foton gibi iyonize edici radyasyon tıp alanında; dermatoloji, nükleer tıp, tıbbi görüntüleme, radyoterapide kullanılır. İyonize edici radyasyon madde içinde ilerlerken atomların yörüngelerinden elektronlar kopararak ortamı iyonlaştırır ve bunun neticesinde canlı madde içinde istenilmeyen zararlar meydana gelir (Perez, 2013). Radyofrekans ve mikro dalga iyonize edici değildir ve tıp alanında fizik tedavide kullanılır. Diğer iyonize edici olmayan radyasyon tipleri radyo, televizyon, haberleşme, ısıtma vbg teknolojik alanlarda kullanılır.

İyonize edici radyasyon uzayda ve yerkabuğunda radyoaktif maddelerden oluşarak doğal olarak bulunur.

Tıp alanında kullanılan iyonize edici radyasyon ise (Beyzadeoğlu, 2008); 1) Nükleer santrallerde maddelerin nötron bombardımanına tutularak radyoaktif hale getirilmeleri ile elde edilebilir. Nükleer tıpta kullanılan çok sayıda kısa yarı ömürlü radyoaktif madde vardır, radyoterapi alanında ise kobalt-60 radyoaktif maddesi eksternal radyoterapide ve iridyum-192 radyoaktif maddesi özellikle jinekolojik kanserlerde kavite/lümen içine brakiterapi şeklinde kullanılır (Tinkle ve ark., 2015). Radyoaktif maddeler çekirdekten dışarıya özellikle gama radyasyonu yayarlar, ayrıca elektron (beta), pozitron, nötron saçılması da söz konusu olabilir. 2) Gelişmiş elektrik ve elektronik teknolojileri ile yüksek gerilimle çalışan röntgen, skopi, tomografi, lineer hızlandırıcı, proton, betatron makinalarından elde edilir. Tıbbi görüntülemede ve radyoterapide kullanılır. Yüksek gerilimle çalışan cihazlarda cihazın Katot uçundan Anot ucuna doğru vakumlanmış ortamda elektronlar kinetik enerji ile hızlandırılarak anotta bulunan hedefe yönlendirilir. Anot da atom yapıların içine ve arasına gelen elektron yön değiştirerek kinetik enerjisini kaybeder ve elektronların kaybettikleri enerji ile uyumlu ve orantısal miktarda partiküler olmayan EME, foton veya x-ışını elde edilir. Şayet anot geri çekilirse elektronlar doğrudan dışarıya alınarak elektron ile radyoterapiye uygun partiküler radyasyon elde edilir. EME dalga hareketi yapar, ışık hızında hareket eder. İsminden de anlaşılacağı gibi elektrik ve manyetik alan kavramlarını içerir. Ortamda ilerlerken ve elektron yanından geçerken bu elektrik ve manyetik alanlar nedeni ile elektronu yörüngesinden iterek veya çekerek koparır. Atom yörüngesinde yer alan her elektronun çekirdeğe bağlanma enerjisi vardır. Gelen EME bu bağlanma enerjisinden büyük ise yörüngeden elektronları koparabilir. Enerji (E): Plank Sabiti (h) x Frekans (f) veya Enerji (E): h x 1/Dalga Boyu (ʎ) veya Enerji (E): Kütle (m) x Işık Hızı (c)2 şeklinde formüle edilir.

Frekans arttıkça enerji artar ve derinlere gitme özelliği artar. Dalga boyu arttıkça enerji azalır ve derinlere gitme özelliği azalır. Tıp alanında kullanılan cihazlarda amper (A), milisaniye (ms), voltaj (V) düğmeleri vardır. Amper arttıkça ve milisaniye büyüdükçe cihazdan çıkan radyasyon sayısı (miktarı) artar, radyasyonun enerjisi ve delici özelliği değişmez. Voltaj arttıkça cihazdan çıkan radyasyonun frekansı artar, enerjisi artar, delme özelliği artar. Voltaj arttıkça nispeten cihazdan çıkan radyasyon sayısı da artar. Ancak Voltaj arttırmanın esas amacı delici radyasyon elde etmek içindir. EME madde veya ortamda ışık hızı ile ilerlerken;

1) Ortam ile etkileşmez, radyasyon geçip gider. Şöyle ki; Atomda çekirdek hacmi tenis topu boyutunda ve elektron toplu iğne boyutunda kabul edilirse çekirdek ile elektron arasında ki mesafe 10-20 kilometredir. Yani; aslında madde içinde büyük bir boşluk vardır ve bu boşluktan iyonize ve iyonize olmayan EME rahatlıkla geçebilir.

2) Ortam ile hafif uyarma etkisi olur, ancak elektron koparmaz. Isı oluşabilir.

3) Foto elektrik olay olur; bu olayda gelen EME atomun yörüngesindeki elektrona tüm enerjisini aktarır ve oradaki elektron koparak hareket eder, elektrona hız ve kinetik enerji vermiş olur. Gelen EME yok olur. Foto elektrik olay tıbbi görüntülemede belirgindir. Enerji Kinetik: Kütle (m) x Hız (v)2

4) Compton etkisi olur; bu olayda gelen EME atomun yörüngesindeki elektrona değişik açılardan yaklaşarak elektronu yörüngeden koparır bir kısım enerjisini kopan elektrona aktarır ve elektrona hız ve hareket verir. Gelen EME yok olmaz, sadece enerjisinin bir kısmını elektronu yörüngeden koparmak için harcar ve diğer bir kısmını elektrona hız ve hareket olarak aktarır, kalan EME ışık hızında frekansı azalmış ve dalga boyu artmış vaziyette yani enerjisi artmış halde saçılarak ve yön değiştirerek yoluna devam eder. Compton etkisi radyoterapide ve komputarize tomografide belirgindir (Glover, 1982).

5) Çift teşekkülü; en az 1.02 MeV EME ışık hızında atomun çekirdek alanına yaklaştığında yok olur ve negatif yüklü elektron ve pozitif yüklü elektron (pozitron) çifti meydana gelir. 1.02 MeV enejjiden daha fazlası varsa elektron ve pozitron üzerine hız ve hareket olarak aktarılır. Çok kısa süre sonrasında pozitron ortamda bulunan başka bir elektron ile etkileşime girerek pozitron ve etkileşime girdiği elektron yok olur ve en az 1.02 MeV ve daha üstü enerjide EME o bölgeden yayılır, bu son yok olma durumuna “anihilasyon” (annihilation) denir. Çift teşekkülü nükleer tıp pozitron emisyon tomografide (PET) kullanılır (Lu ve ark., 2016).

6) Dezentegrasyon; Çekirdek yarılması ve çekirdek yırtılması olayıdır. Burada olayı başlatan EME değildir. Burada elektron veya daha büyük partiküller yüksek enerjilerle ve yüksek hızlarla çekirdek içine girip çekirdek içi düzeni bozarak yarılma yırtılma etkisi yapar ve ortama nötron, proton, elektron, EME (gama ışını) tarzı enerjiler çıkar. Çok yüksek kinetik enerji ve ısı oluşur. Nükleer enerji ve nükleer kazalarda gündeme gelen çok ciddi bir durumdur. Tıp alanında bir işin ve işlemin gerçekleşebilmesi için gelen radyasyonun elektronları koparabilmesi gereklidir. İş elektronu koparmaktır. Burada işçi elektrondur. Elektron kopmaz ise iş gerçekleşmez, radyografi çekilmemiş olur, kanserli doku öldürülmemiş olur.

İyonize edici radyasyon partikül olmayan ve partikül olan radyasyon şeklinde iki temel guruptadır;

1) Partikül olmayan radyasyonlar; x-ışını, foton, gama ışınıdır ve ışık hızı ile hareket ederler, yüksek frekanslı olduklarında madde ve doku içinde çok derinlere giderler.

2) Partiküler radyasyonlar; elektron (beta), pozitron, alfa, proton, nötron, pi-mezon, ağır iyonlardır ve bilinen kinetik hız ile yani ışık hızından daha düşük hızlarda hareket ederler (Tommasino ve ark., 2015). Partiküllerin kütleleri ve yükleri vardır, sadece nötron yüksüzdür. Kütle ve yükleri nedeniyle bir ortamda ilerlerken ortam elektronları ve atom çekirdek alanı ile etkileşme olasılıkları çok yüksektir. Bu nedenle çok fazla iyonlaşma yaparlar, ortama enerji aktarırlar, madde ve doku içinde çok derinlere gidemez ve canlı dokuda ciddi zararlara neden olurlar. Yukarda bahsedildiği gibi; enerji aktarımı söz konusu ise elektron kopması şarttır. Elektron kopmamış ise enerji aktarımı ve radyasyon emilimi yoktur, iş yoktur. Lineer Enerji Transferi (LET): Belli mesafede ortama aktarılan enerjidir. Ortama enerji aktarımı ancak elektron koparılabilmesi ile mümkündür. Belli mesafe en fazla enerji aktarımını yani elektron koparmayı kinetik hızla hareket eden büyük kütleli ve yüklü partiküller daha fazla yaparlar ve LET değerleri yüksektir. Partikül olmayan ve ışık hızı ile hareket eden foto ve gama ışınlarının LET değeri düşüktür. Fotonun enerjisi düştükçe ortam ile etkileşimde foto elektrik olayın etki oranı artar ve elektron koparma artar, yani enerji aktarımı artmış olur. Düşük enerjili x-ışınlarının LET değeri daha fazladır.

Emilen Radyasyon Dozu (Radiation Absorbed Dose RAD): Birimi cGy dir. Maddenin 1 gr kütlesi tarafından emilen dozdur, 1 gr dokuya 100 erg enerji aktarmaktır. Yani 1 gr dokuda 100 erg karşılığı kadar elektronun koparılma işlemi için enerji harcanması gerekir. Elektron kopmamış ise radyasyon emilimi gerçekleşmemiştir. RAD veya cGy daha çok Radyoterapide ışınlama hesaplamalarında kullanılır. Kanserli veya normal dokuların aldığı doz miktarını tanımlar. Röntgen (R): Standart şartlarda 1 cm3 havada 1 esu yük birimlik akım meydana gelmesini ve iyon çiftleri oluşmasını sağlayan miktardır. Akımın meydana gelebilmesi için hava moleküllerinden elektronların kopartılarak iyonlaşma sağlanmalıdır. Röntgen havada isabet eden, maruz kalınan, hava ortamında ölçülen doz miktarıdır. Daha çok tıbbi görüntüleme işlemlerinde kullanılır. Rölatif Biyolojik Etki (RBE): Farklı radyasyon tiplerinin canlıda aynı etkiyi oluşturması için gerektirdiği dozu hesaplamada kullanılır. Standart olarak 250 keV x-ışının yaptığı etkinin aynısını elde etmek için başka radyasyon tipi ile kullanılması gereken dozun oranıdır. RBE değeri partiküler radyasyonda ve düşük enerjili fotonlarda artar, yüksek enerjili fotonlarda RBE değeri düşer. Memelilerde Eşdeğer Radyasyon (Radiation Equivalent Man-Mammalian REM): Birimi Sievert’dir. Memeli canlılarda değişik radyasyon tiplerinin memeli doku üzerinde yaptığı etkiyi eşleştirmek birbirine çevirmek için kullanılır. Değişik radyasyon tiplerinin rölatif biyolojik etkileri (RBE) üzerinden hesaplamalar yapılır. Burada alınan cGy (RAD) cinsinden değişik radyasyonların REM değeri bulunmak istenir. Temel hesapla 1 gr dokuya aktarılan erg üzerinden yapılır. Ancak bu aktarımı yapan radyasyonun tipi çok önemlidir ve biyolojik sonuç değişik olabilecektir. Daha çok nükleer tıp alanında, radyasyon alanında çalışanların uzun süre radyasyona maruz kalmalarında ve nihayet nükleer kazalarda çok önemlidir. Kazalarda birey veya çevre çok farklı radyasyon tiplerinden değişik oranlarda ve değişik sürelerde radyasyon alacağından hesaplama çok zor ama çok önemlidir

KAYNAKLAR

Khan F.M. The Physics of Radiation Therapy, 2003 Third Edition, LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS 530 Walnut Street Philadelphia, PA USA

Carlos A. Perez. Principles and Practice of Radiation Oncology, 2013 Sixth Edition, WOLTERS KLUWER/ LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, PA USA

Beyzadeoğlu M. Temel Radyasyon Onkolojisi, 2008 1. Baskı, GATA, Ankara, Türkiye Tinkle

CL, Weinberg V, Chen LM et al. Inverse Planned High-Dose-Rate Brachytherapy for Locoregionally Advanced Cervical Cancer: 4-Year Outcomes. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2015 Aug 1; 92 (5): 1093-100

Glover GH. Compton scatter effects in CT reconstructions. Med Phys. 1982 Nov-Dec; 9 (6):860-7.

Lu W, Chen W. Positron emission tomography/computerized tomography for tumor response assessment-a review of clinical practices and radiomics studies. Transl Cancer Res. 2016 Aug; 5 (4): 364-70.

Tommasino F, Durante M. Proton radiobiology. Cancers. 2015 Feb 12; 7(1): 353-81

Khare P, Nair P, Khare A, et al. The road to radiation protection: a rocky path. J Clin Diagn Res. 2014 Dec ;8 (12): 1-4.