

RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

2025-2026

Prof. Dr. Candan S. PAKSOY

İyonize radyasyon, canlılarda moleküler ve hücresel düzeylerde fiziksel, kimyasal ve biyolojik çeşitli değişikliklere yol açar. Bu değişiklikler, maruz kalınan iyonize radyasyonun cinsine, miktarına ve süresine göre geçici veya kalıcı olabilir.

Bütün canlılar doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından etkilenir ve bu etkiye karşı bir tepki gösterirler. Bu tepkiyi inceleyen bilim dalına “**Radiobioloji**” denir.

- 1895 X-ışınlarının Roentgen tarafından keşfi
- 1896 İlk deri yanığı bildirim
- 1896 X-ışınlarının kanser tedavisinde ilk kullanımı
- 1896 Becquerel: Radioaktivitenin keşfi
- 1897 İlk deri hasarı olguları bildirim
- 1902 X-ışını kaynaklı ilk kanser bildirim
- 1911 İnsanda ilk lösemi bildirim ve mesleki ekspozüre bağlı akciğer kanseri
- 1911 Almanya’da 94 tümör olgusu bildirim (50’si radyolog)

Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyon kavramı ilk kez 1896’da, H.Becquerel tarafından ortaya atılmıştır.

İyonize edici ışınlar, her canlının yaşadığı doğal çevre ortamında bulunurlar ve bu ışınlarla bir biyolojik dengenin var olduğu kabul edilmektedir. Doğal çevreden alınan radyasyon, her gün vücut hücrelerindeki on binlerce molekülü parçalar ve hücreler ölür. Bu hücre ölümünün yerine hücre yenilenmesi, belirli bir denge içinde olmaya alıştığından, her ek radyasyon, risk potansiyeli olarak görülmek zorundadır. Bunun için radyolojide ilk kural, gereksiz radyasyon uygulamalarından kesinlikle kaçınılmalıdır.

Doğal radyasyon kaynakları;

Yer kabuğunun radyoaktif maddelerinden oluşan gamma, alfa, beta ışınları ile

Uzaydan kozmik ışınlardır.

Yerkabuğundaki radyoaktif maddeler yakın çevrede bulunur ve vücuda solunum, içme suyu ve besin yoluyla girerek doğal radyoaktif yüklemeyi yaparlar.

Yerkabuğu ve kozmik radyoaktivitesi hemen hemen eşittir.

Solunum ve sindirim yollarıyla, hava, su ve tüm besinlerde az da olsa var olan radyoaktif maddeler vücuda girerek çeşitli organlarda birikmektedir.

Buna ek olarak kozmik ışıklardan ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden de etkilenen organizma, iç ve dış kaynaklı ışınlanmaya doğal olarak maruz kalmaktadır.

Güneş ışınları, 10-100° A dalga boylu (yumuşak ışınlar) içerirler ve deniz seviyesinden 15-20 km. yukarıda azot ve oksijen atomlarını etkilerler. Yüksek enerjili kozmik ışıklara ait nötronlar ve protonlar atmosferin alt tabakalarına kadar ulaşır, buradaki elementlerle etkileşerek radyoizotoplar oluşturabilmektedir. Atmosferden yeryüzüne inen bu radyoizotoplar, solunum ve besinler yolu ile iç ışınlanmaya neden olurlar.

İç ışınlanma, yeryüzünde, havada doğal olarak bulunan radyoizotopların solunum ve sindirim yolu ile alınmasından kaynaklanır. Solunum yolu ile iç ışınlanmanın en önemli bileşenini radon ürünleri oluşturmaktadır. Radon, tüm yüzey kaya ve toprak parçalarından ve yapı malzemelerinden ortama salınan radyoaktif bir gazdır.

Radon bozunma ürünleri, toz ve diğer parçacıklara tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturarak solunum yoluyla alınabilirler. Bu da, bronşial epitelde, akciğer dokusunda hasara, zaman içerisinde kansere neden olabilir. Yüksek dozda radona maruz kalmış, sigara içen kişilerde kansere yakalanma riski oldukça yüksektir.

Sigara içiminin az bilinen bir zararı da, içindeki radyoaktif maddelerin solunum yoluyla insan vücuduna alınmasıdır.

Vücutta bulunan radyoaktif elementlerden (özellikle Potasyum-40) dolayı da bir miktar radyasyon dozuna maruz kalınır.

Doğal radyoizotopların sindirim yolu ile vücuda alınması, yiyecek ve içeceklerin tüketim hızına ve radyoizotop konsantrasyonuna bağlıdır, besinlerde bulunan radyoizotop konsantrasyonu ise bölgenin doğal fon seviyelerine, iklimine, tarım uygulamalarına, beslenme alışkanlıklarına bağlı olarak değişir.

Güneşin aktif durumuna (güneş patlamalarına), yerin manyetik alanına ve yerküreden yükseklığe (irtifa) bağlı olarak kozmik ışıkların yoğunluğu değişir.

Protonlar elektrik yüklü parçacıklar olduklarından atmosfere ulaştıklarında dünyanın manyetik alanının etkisine girerler. Bu nedenle kozmik ışın yoğunluğu ekvator dan kutuplara gidildikçe artar. Bu ışınların büyük bir kısmı atmosferden geçmeye çalışırken tutulurlar.

Atmosfer kısmi olarak radyasyonu zırhlar. Bu nedenle, deniz seviyesine yaklaştıkça kozmik ışınların yoğunluğu, dolayısıyla doz miktarı da azalır. Ekvator dan kutuplara gidildikçe, aynı zamanda deniz seviyesinden yükseldikçe kozmik ışınların yoğunluğu artar. Örneğin La Paz'da bu rakam küresel ortalamanın 5 katıdır.

Deniz kenarında haftada 2 - 2,5 mRem (0.02-0.025 mSv),

Avrupa'nın en yüksek tepesi olan Mont Blanc' da haftada 4-5 mRem (0.04-0.05 mSv)

Yapay Radyasyon Kaynakları :

Radyodiagnostik, radyoterapi, nükleer tıp tanı araçları,

Atom reaktörleri, atom bombası deneyleridir.

Nükleer enerji günümüzde sivil veya askeri amaçlarla kullanılmakta, kullanıma hazır bulundurulmakta ve deneyler insanların yaşamadığı ortamda yapılırsa da doğayı ve atmosferi kirleterek tüm insanları etkileyeceği, çevre bilimciler tarafından vurgulanmakta, özellikle son yıllarda, kurulu biyolojik dengenin negatif yönde bozulduğu belirtilmektedir.

Tıpta radyasyon uygulamaları, radyasyonla görüntü elde edebilme (radyodiagnostik) ve radyasyonun hücre veya tümörleri yok edebilme özelliği (radyoterapi) temeline dayanır. Bu iki özelliğinden dolayı radyasyon hastalıklarının tanı ve tedavisinde önemli rol oynar.

Tanıda en yaygın kullanılmakta olan radyasyon, X -ışınlarıdır.

Nükleer Tıp alanında vücuttaki organ veya dokuların işlevlerini incelemek üzere bazı radyoaktif maddeler vücuda, radyoaktif maddenin incelenecek dokuda toplanmasını ve geçici bir süre buraya yerleşmesini sağlayacak bir kimyasal madde ile birleştirilerek verilir. Radyoaktif maddenin vücuttaki dağılımı veya akışı, vücuda verilen radyoaktif maddeden salınan gama ışınlarını algılayacak özelliklere sahip cihazlarla elde edilir.

Radyoterapi kanser hastalıklarının %50'sinin tedavisinde etkin olarak kullanılır. Yaygın olarak yüksek enerjili elektron hızlandırıcılar ve Co-60 radyoaktif kaynaklı cihazlar kullanılır. Tedavinin amacına ulaşması, bölgeye tedavi için gerekli doz verilirken, sağlam doku ve organların dozunun minimum düzeyde tutulmasıyla mümkün olur.

Nükleer Serpinti atmosferde gerçekleştirilen nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen radyoaktif serpintiler, radyoaktif çevre kirliliğine neden olan en büyük yapay radyasyon kaynağıdır. Yer üstü ve yer altında yapılan bu tür denemeler bölgesel kirliliğe neden olmaktadır.

Nükleer Güç Santralleri Uranyum gibi ağır radyoaktif atomların bir nötronun çarpması ile daha küçük atomlara bölünmesi (filyon) veya hafif radyoaktif atomların birleşerek daha ağır atomları oluşturması (füzyon) sonucu çok büyük miktarda nükleer enerji açığa çıkar.

Nükleer reaktörlerde filyon reaksiyonu ile elde edilen enerji elektriğe çevrilir.

Tüketici Ürünleri Televizyonlar, duman dedektörleri, fosforlu saatler, paratonerler gibi bazı tüketici ürünleri az miktarlarda da olsa radyoaktif madde içerirler. Kömür ve fosfat kayaları, uranyum, radyum, potasyum-40 ve toryum içerirler. Fosfatın gübre ve kömürün yakıt olarak kullanılması ile çevreye az da olsa belli bir radyasyon dozu verilir.

Yıllık ortalama efektif radyasyon dozu

Kaynak	Doz (mSv)	
	Global	USA
Doğal Background		
Radon	1.3	2.3
Uzay	0.4	0.3
Vücut içi radionüklidler	0.3	0.3
Yer kabuğu	0.5	0.2
Toplam	2.4	3.1
Medikal		
CT	0.35	1.37
Nükleer tıp	0.03	0.41
Girişimsel fluoroskopi	0.05	0.25
Konvansiyonel Radyografi	0.13	0.22
Dental	0.003	0.04
Toplam	0.56	2.2
Tüketim malzemeleri ve diğerleri	0.01	0.1
Tümünün Toplamı	3.1	5.4

Data for global population from United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations; 2010.

Data on patient doses from healthcare imaging from Mahadevappa M. et al. Patient Exposure from Radiologic and Nuclear Medicine Pro-cedures in the United States and Worldwide: 2009-2018. Radiology. 307:e221263. 2023.

Effektif Doz (Sv), ekspozürle ortaya çıkan riski sayısallaştırır, tüm vücut irradyasyonu ve uniform dağılımı olmayan doz arasında kıyaslama yapmayı sağlar, vücut dokularının radyasyona duyarlılıklarının ağırlıklı toplamıdır. Total radyasyon riskinin tek bir rakam ile hesaplanmasıdır.

Effektif doz = $E = \sum W_T \times H_T$

w_T doku ağırlık faktörü

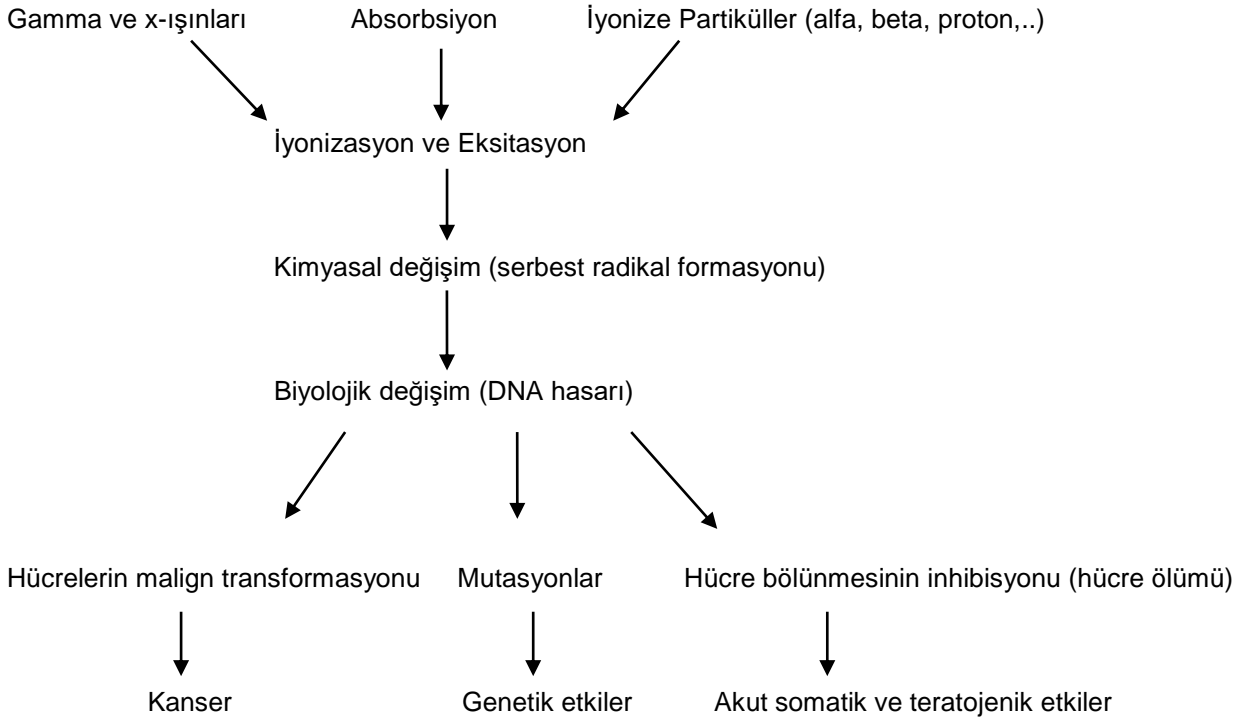
H_T her bir doku için eşdeğer doz

Her bir organ ve dokunun maruz kaldığı eşdeğer doz, farklı vücut dokuları için belirlenmiş doku ağırlık faktörü (w_T) ile çarpılır, bu veriler tüm vücut üzerinden toplanarak, E hesaplanır.

Biyolojik etkilerin ortaya çıkmasındaki olaylar:

Radyasyon enerjisinin bir kısmının canlı doku tarafından absorpsiyonu,
Atomların iyonizasyonu ve eksitasyonu (bir veya birkaç elektronun atomdan ayrılıp hızla harekete geçmesi),
Harekete geçen elektronun, bir komşu atom yörüngesine girerek kimyasal reaksiyonları başlatıp, serbest radikaller oluşturması,
Bu kimyasal reaksiyonlar sonucu enzimlerin inaktive olması,
Genlerin mutasyonu, kromozomların zarar görmesi,
Hücre fonksiyonunda bozukluk,
Hücre ölümü.

Radyasyon Zararlarının Gelişimi



Radyasyona bağlı değişiklikler vücutta üreme hücrelerinde ortaya çıkarsa gelecek kuşaklara aktarılabilir.

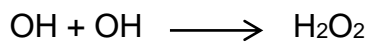
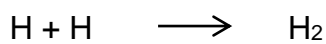
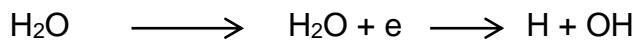
Radyasyonun moleküler düzeydeki etkileri: Direkt veya indirekt yolla olur.

Direkt yol, iyonize radyasyona maruz kalan molekülün doğrudan doğruya kritik hedeflerde hasar oluşturması ve molekül yapısının bozulmasıdır.

İndirekt yolda ise, iyonize radyasyonun su moleküllerini iyonize etmesi ile serbest radikallerin oluşması sonucu, bu toksik ürünlerin hasar oluşturmasıdır.

Yani radyasyon sonucu, hücrede bol miktarda bulunan su veya genel organik moleküller çok fazla aktif radikallere ayrılır, bunlar, hücrenin yapısını bozar.

İyonize radyasyon



Böylece oluşan ürünler (örn: H₂O₂) çok kuvvetli oksitleyici ajan olarak hücredeki önemli moleküllerle reaksiyona girer, onların yapı ve fonksiyonunu bozar.

Radyasyonun etkileyerek reaksiyona girdiği molekül, tamamen rastlantısaldır, herhangi bir karbonhidrat, lipit, protein, enzim, DNA ya da RNA gibi bir nükleik asit olabilir.

Radyasyonun hücresel düzeydeki etkileri

Radyasyona tamamen dirençli hiçbir hücre yoktur. Hücreyi oluşturan yapılardan çekirdek ve özellikle bölünme halindeki kromozomlar, radyasyona, hücre sitoplazmasına oranla daha fazla duyarlıdır. DNA'da etkilenme, doza ve hücrenin siklustaki durumuna bağlıdır. Kromozom anomalileri, radyasyona maruz kalan hücrelerde, mitoz sırasında, DNA kromozomları oluşurken gözlenir. Radyasyonun DNA'da yaptığı hasar,

hücre ölümüne,
genetik mutasyonlara,
kansere oluşumuna yol açar.

Tıbbi diagnostik işlemlerde radyasyona maruz kalmış hastaların periferik kan lenfositlerinde kromozom anomalileri saptanmıştır. Kromozom anomalilerinin sıklığı, genellikle alınan radyasyon dozu ile orantılıdır.

Radyasyon etkileri, nükleus ve kromozomlardan başka diğer hücresel yapılarda da ortaya çıkar. Hücre kinetiği üzerinde en önemli radyasyon etkileri, mitozun aksaması ve hücre ölümüdür. Radyasyonun hücre düzeyindeki en belirgin etkilerinden birisi, hücre büyümesini baskılamasıdır. Özellikle hücre bölünmesi sırasında (mitozda) radyasyona maruz kalan hücrelerde büyüme kesintiye uğrar. Bu konu 1906 yılında Bergonie ve Tribondeau isimli araştırmacılar tarafından "**Radyasyona karşı en duyarlı hücreler, en fazla mitotik aktivitesi olan ve differansiasyonu düşük (farklılaşma derecesi düşük, fonksiyon ve morfolojileri henüz belirlenmeyen) hücrelerdir**" şeklinde tanımlanmıştır.

Yani bu yasaya göre fizyolojik ve morfolojik olarak erişkin karakterini almış hücrelere kıyasla, immatür hücreler ve aktif bölünme gösteren hücreler, radyasyona daha duyarlıdır.

Lenfositler ve oositler bu kuralın istisnasıdır, yüksek radiosensitivite gösterirler, ancak differansiasyonları yüksektir ve bölünmezler.

Radyasyonun Biyolojik Etkilerinde Rol Oynayan Faktörler

Radyasyona bağlı (fizik) ve canlı dokuya bağlı (biyolojik) faktörlerdir.

Fizik Faktörler:

Radyasyonun cinsi (kalitesi)

Radyasyonun dozu (miktarı)

Radyasyonun hızı

Radyasyon alan bölgenin hacmi

Biyolojik Faktörler :

Dokunun duyarlılığı

Dokunun rejenerasyon özelliği

Dokunun yaşı

Radyasyonun biyolojik hasarı, dokuya aktarılan enerjinin büyüklüğü ile orantılıdır.

Radyasyonun enerjisini kaybetmesi, radyasyonun tipine ve enerjisine bağlı olduğundan, biyolojik etki de buna bağlı olarak değişir.

Aynı dozdaki farklı radyasyonlar, farklı biyolojik etkiler yaratır.

Aynı dozdaki radyasyonlar düşük hızlarda uygulandığı zaman, yüksek hızda uygulandığına oranla daha az biyolojik hasar oluşur. Zararın onarımı için daha fazla fırsat olur.

Örneğin: 10 Gy 'lik (1000 Rad) bir radyasyon dozu, bir kerede verilirse ölüme neden olduğu halde, aynı doz iki kerede; 5 + 5 Gy (500 + 500 Rad) olarak ve 24 saat ara ile verilirse ölüm oranı %40'a düşer.

Fiziksel faktörler:

Lineer enerji transferi (LET): İyonize radyasyonun içinden geçtiği maddede kat ettiği yolun birim uzaklığı başına aktardığı, kaybettiği enerji salımıdır.

LET arttıkça radiosensitivite artar.

Doz hızı arttıkça radiosensitivite artar.

Kimyasal faktörler

Oksijen, sitotoksik ilaçlar, radiosensitiviteyi artırır.

Sülfür (cys, cysteamine..) radiosensitiviteyi azaltır.

Biyolojik Faktörler

İnsan vücudundaki çeşitli doku ve organları oluşturan hücrelerin, şekil ve özellikleri farklı olduğu gibi, radyasyona duyarlılıkları da farklıdır.

Mitotik aktivitesi fazla olan ve olgunlaşmamış hücrelerde duyarlılık daha fazladır.

Metabolik aktivitesi daha fazla olan hücrenin duyarlılığı daha fazladır.

Kanlanma ve beslenmesi az olan hücrenin duyarlılığı daha azdır.

Dokuda oksijen az ise radyasyon etkisi de az olur.

İrradyasyon, hipoksinin çok fazla olduğu durumlarda uygulanırsa, pek çok biyolojik sistemin radyorezistansı 2-3 kat artar.

Oksijenden zengin ortamda radyasyonun oluşturduğu daha büyük hücre tahribatı, oluşan serbest radikallerinin miktarının artmasına bağlıdır.

Normal dokular, oksijene hemen hemen doymuş haldedir. Bununla birlikte bazı tümörler, santral nekrotik kısımlarında nispeten daha az vasküler desteğe sahiptir, bu yüzden oldukça hipoksiktirler. Tümör hücrelerinin radyosensitivitesini arttırmak için hiperbarik oksijen tedavisi uygulanabilir.

Radyasyonun etkisi vücudun radyasyona maruz kalan bölgesine ve büyüklüğüne de bağlıdır. Kalça üzerinde belli bir alana oldukça büyük doz verildiğinde sadece lokal deri reaksiyonları meydana gelirken, aynı doz, karın bölgesinde, aynı büyüklükte bir alana verilirse, deri reaksiyonlarının yanı sıra kusma, bulantı gibi sistemik bozukluklar da görülür.

Bunun yanı sıra, aynı miktar doz, daha küçük bir alanda daha az etki yaparken, alan büyüdükçe etkisi artar.

Hücre siklusunun durumu: Mitoz fazında radiosensitivite artar,

Ortamla ilgili faktörler de önemlidir, ortamda bol oksijen varsa radyasyondan etkilenme az olur. Ortam sıcaklığı düşüğe radyasyon etkisi az olur.

Bireyle ilgili faktörler, yaş, cinsiyet, genel sağlık durumu, doğuştan olan biyolojik farklılıklar da önemlidir.

Eşik Doz : Daha altında zararlı etkilerin görülmeyeceği dozdur.

Eşik dozun üstündeki bütün dozlar her insanda dozla orantılı zararlara neden olur.

Radyasyonun etkisi, ışınlamanın yapılmasından hemen sonra görülmez. Işınlama zamanı ile etkinin ortaya çıktığı zaman arasındaki süreye **Latent periyot** denir. Bu süre, birkaç saat-gün ile birkaç haftadan başlar, bazen 20 yıl sürebilir. Bu kadar uzun bir süreye hangi faktörlerin etkisinin olduğu kesin olarak bilinmemektedir. Konu ile ilgili bilgilerin kaynağı hayvan deneyleridir. Bilinen, yüksek radyasyon dozlarında latent periyodun kısaldığıdır.

Doku ve organ düzeyinde radyasyon etkileri;

Primer etki : Işınlardan doğrudan hücrelere zarar verir.

Sekonder etki : Dolaşım bozulur, damar endotelinde şişme, nekroz, trombüs, olay kronikleştikçe lümen daralır, dokuda iskemi.

Somatik Etkiler: Işınlanan kişinin kendisinde ortaya çıkar, organizmada, üreme sistemi dışında tüm sistemlere ait dokularda radyasyona bağlı oluşan zarar, gelecek kuşaklara aktarılmaz.

Somatik etkiler, radyasyonun toplam dozuna, bu dozun süresine, ışınlanan vücut bölgesi ve bu bölgenin büyüklüğüne bağlıdır. Birkaç gün içinde alındığında öldürücü olabilecek bir doz, uzun yıllar içinde küçük dozlar halinde alındığında, kanıtlanabilecek bir etki göstermeden kalır. Bu durum, dokunun kendini yenileme özelliğine bağlıdır.

Kalıtsal Etkiler: Germ hücrelerinde meydana gelen DNA mutasyonları, maruz kalan bireyden üreyen nesillerde hastalık olarak ortaya çıkabilir. Radyasyon kaynaklı mutajenik, kalıtsal etkiler Drosophila ve mısırdaki iyi incelenmiştir. Ancak, insanlarda radyasyon kaynaklı kalıtsal etkilere dair bir kanıt yoktur,

Kromozomlarda çeşitli nedenlerle yapı ve kimyasal olarak bazı yeni karakterler oluşabilir. Bu tür değişikliklere **mutasyon** denir.

Mutasyon hem üreme, hem de somatik hücrelerde olabilir. Somatik hücrelerdeki mutasyonlar tümörlere neden olabilir. Üreme hücrelerindeki mutasyonlar, sonraki kuşaklara geçer, kalıtsal özellikler gösterir.

Mutasyonların sıklığı dozla doğru orantılıdır.

Genetik mutasyonlar, çok yüksek dozlarda hayvan çalışmalarında gösterilmiştir, yumurta veya spermde zarar görmüş kromozomların hatalı onarımları ile, gelecek nesillerde ortaya çıkar ve kalıcıdır. 1927 yılında Müller, yaptığı deneyler sonucu, drosophilanın (meyve sineği) genetik materyalinde, iyonize radyasyona bağlı değişiklikler saptamıştır.

Memelilerdeki radyasyon genetiği bilgileri, fareler üzerindeki deneylere dayanmaktadır.

Radyasyona bağlı olarak ortaya çıkan kromozom anomalileri içinde en sık görülenler, kromozom kırıkları, kopma sonucu kromozomlarda eksiklikler, kromozomların parçalanması, parçalar arasında yeniden kaynaşmalardır.

Radyasyon yeni mutasyonlar oluşturmaktan çok, spontan mutasyonların sıklığını artırır.

Mutasyonların sıklığı, bir eşik doz olmaksızın, düşük dozlarda bile dozla doğru orantılıdır.

Mutasyonların çoğu organizmaya zarar verir.

Doz hızı önemlidir, düşük doz hızında oluşan mutasyon sıklığı daha azdır.

Erkek üreme hücrelerinin radyasyon duyarlılığı kadınlardan daha fazladır.

Radyasyon maruziyeti ile gebeliğin oluşması arasındaki süre arttıkça mutasyon oranı azalır.

Radyasyon kaynaklı biyolojik etkilerin sınıflaması:

Stokastik etkiler

Doku reaksiyonları (Deterministik etkiler)

Stokastik etkilerin bir eşik dozu yoktur. Daha büyük doz, şiddetini değil, ortaya çıkma olasılığını artırır.

Doku reaksiyonları, yalnızca radyasyon dozu belirli bir eşiği aştığında ortaya çıkar, daha büyük dozlar hasarın daha büyük olmasına yol açar.

Tanısız radyasyon dozları, doku reaksiyonlarına neden olma eşiğinin oldukça altındadır, ancak stokastik etkilere neden olabilir.

Stokastik etkiler:

Radyasyona maruz kalan hücrede, öldürücü olmayan DNA mutasyonları sonucu oluşur. İnsanlarda, karsinogenez tek stokastik etkidir.

DNA hasarı onarımının moleküler mekanizmalarına dayanarak, tek bir X-ışını fotonunun bile mutasyona neden olma potansiyeli olduğu, yani, en küçük radyasyon dozunun bile kansere neden olabileceği var sayılır.

Radyasyon dozu arttığında, DNA hasarı bölgelerinin sayısı artar ve kansere neden olan mutasyon riski daha yüksek olur. Dolayısıyla stokastik bir etkinin oluşma olasılığı dozla birlikte artar.

	Stokastik Etkiler	Doku Reaksiyonları
Nedeni	Subletal DNA hasarı	Hücre Ölümü
Eşik Doz	Yok Herhangi bir doz etkiye yol açabilir	Var Etki, eşik doz aşıldığında ortaya çıkar
Klinik etkinin şiddeti ve Doz	Etkinin şiddeti doza bağlı değil, Hep veya Hiç, Var veya Yok	Etkinin şiddeti dozla orantılı. Doz arttıkça etkinin şiddeti artar
Doz ve Etki arasındaki ilişki	Etkinin sıklığı dozla orantılı Daha yüksek dozda etkinin görülme riski artar	Etki olasılığı dozdan bağımsızdır; çoğu bireyde etki, eşik doz aşıldığında ortaya çıkar.
Tanısal radyolojide kullanılan dozlardan kaynaklanması	Evet	Hayır
Örnekler	Kalıtsal etkiler, Radyasyona bağlı deri kanseri	Osteoradionekroz Radyasyona bağlı katarakt Radyasyona bağlı deri yanıkları

Radyasyona Bağlı Kanser

Stokastik karsinojenik etkiler, radioaktivitenin keşfinden bu yana bilinmektedir, radyasyona bağlı ilk kanser olgusu 1902'de tanımlanmıştır.

Fetal yaşam, çocukluk ve adolesan dönemde risk, erişkin dönemdeki ışınlamaya göre 2-3 kat daha fazladır.

DNA mutasyonları sonucu, onkogenlerin aktivasyonu ve tümör baskılayıcı genlerin inaktivasyonu ile gerçekleşir.

Radyasyona bağlı kanserler, klinik ve histolojik olarak diğer nedenlerle oluşanlardan ayırt edilemez

Birçok etkileyen faktör nedeniyle, genetik değişiklikler ve kanser oluşumunun sadece radyasyon kaynaklı olduğu söylenemez.

Kadınlarda meme, tiroid bezi ve kırmızı kemik iliği gibi bazı dokular, radyasyona bağlı kanser etkilerine karşı daha hassastır.

Radyasyon maruziyeti ile kanser oluşumu arasında on yıllara varan uzun bir latent dönem vardır.

Radyasyon, kansere neden olan bir etken olmakla birlikte, kanseri tedavi de eder.

Çoğalan hücrelerin radyasyona duyarlılığı fazladır. Bu nedenle tedavide, kanserli ve sağlam dokular birlikte ışınlandığında, kanserli hücreler devamlı çoğaldıklarından, radyasyondan daha fazla etkilenirler.

Maksillofasiyal görüntülemede radyasyona bağlı kanser riskleri

Lösemi: Kemik iliği ışınlanmasını takiben insidansı artar. Risk çocuklarda en yüksektir, Radyasyona bağlı lösemilerin latent dönemi daha kısa, ortalama 6-8 yıldır.

Tiroid kanseri: Özellikle papiller tiroid karsinomlarının görülme sıklığı, radyasyon maruziyetinden sonra artar. Kadın ve erkek eşit duyarlıdır. Risk, 19 yaş altında var ve 4 yaştan önce en yüksektir.

Tükürük bezi tümörleri: İyi ve kötü huylu tükürük bezi tümörlerinin görülme sıklığı, baş- boyun RT gören hastalarda ve atom bombası mağdurlarında artmıştır. Tümörlerin çoğu iyi huylu Warthin tümörü, kötü huylu tümörlerin en sık görüleni mukoepidermoid tümördür.

Meme kanseri: Kadınlarda meme radyasyona bağlı kansere karşı oldukça hassastır.

İnsanlarda risk ve doz arasında, 20 yaştan önce maruziyette doğrusal bir ilişki vardır.

50 yaştan sonra maruz kalan kadınlarda ölçülebilir bir risk yoktur.

Beyin ve sinir sistemi kanserleri: Kafa bölgesi RT'de çocukların, menengiömler ve gliömler gibi beyin tümörleri açısından daha yüksek risk altında olduğu gösterilmiştir. Menengiömler uzun bir latent dönemden (17-20 yıl) sonra, gliömler nispeten daha erken (5-9 yıl) ortaya çıkar. Gliom riski, 5 yaş ve altı maruziyetlerde en yüksektir.

Doku Reaksiyonları (Deterministik Etkiler):

Doku veya organdaki hücre ölümünün sonuçlarıdır. Etkinin şiddeti dozla orantılıdır, doz ne kadar yüksekse, hücre kaybı ve etki o kadar şiddetli olur. Deride kızarıklık, xerostomia, osteoradionekroz, katarakt, fetus gelişiminin durması, radyoterapi sonrasında oral değişiklikler, deterministik etkilere örnektir. Bu etkilerin gözlenebilmesi için, eşik değere kadar doz alınması gerekir. Eşik dozu VARDIR, bunun altında zararlı etkiler görülmez, latent periyodu kısadır. Erken ve geç etkiler olarak ortaya çıkar.

Erken etkiler, tek bir büyük (100 Rad / 1 Gy), veya nispeten kısa sürede alınan daha küçük dozlarla, ~ 60 gün içinde ortaya çıkar.

Lethal doz 50/30: 30 günde populasyonun %50'sinde ölüme yol açabilen dozdur. İnsanlar için, tüm vücut irradyasyonunda 4-5 Sv kadardır.

Akut Radyasyon Sendromu: Tüm vücudun, birkaç dakika veya birkaç saat gibi kısa bir sürede radyasyona maruz kalması sonucu oluşan klinik belirti ve laboratuvar bulgularıdır. Vücudun total irradyasyonunda ve radyasyonla mesleki olarak uğraşanlarda görülür. Başlangıç semptomları 1-2 Gy' lik dozlarda 0-48 saatte ortaya çıkar, iştahsızlık, bulantı, terleme, yorgunlukla görülür, ateş, enfeksiyon, deri duyarlılığı, saç dökülmesi, hemoraji, diyare, letarji, bilinç ve algılama bozuklukları, kardiyovasküler kollaps gibi ağırlaşan semptomlarla devam eder. Bu bulguların ortaya çıkması doza ve kişisel duyarlılığa bağlıdır. İyileşme 6-8 haftadan bir kaç aya kadar sürebilir.

Geç Etkiler: Gecikmiş etkiler, uzun süre, aralıklı olarak düşük dozlarla, 2 ay - 20 yıl veya daha sonra ortaya çıkar. Uzun sürede alınan küçük dozlar daha iyi tolere edilir, onarım hızı, hasarın oluşma hızından daha büyük olursa hasar onarılır. Eşik doz aşılmadıkça, kalıcı hasar oluşmaz.

Radyasyona bağlı doku zararları iki mekanizma ile ortaya çıkar:

Primer etki: Işınlardan doğrudan hücrelere zarar vermesi ile olur.

Sekonder etki: Burada ana ilke dolaşım bozulmasıdır.

Damar endotelinde şişme, nekroz, trombüs, olay kronikleştikçe lümen daralır, bu bozukluklar dokuda iskemik zararlar doğurur.

Hücrelerin İyonize Radyasyona Duyarlılığı

Çeşitli hayvan türleri arasında irradyasyona duyarlılık bakımından farklar olduğu gibi, bir organizmadaki çeşitli hücre cinsleri arasında da farklar vardır: Aynı bireyin farklı organlarındaki farklı hücreler, irradyasyona farklı derecelerde tepki gösterirler Bergonie ve Tribondeau (1906) isimli araştırmacılar hücrelerin radyasyon duyarlılığı ile ilgili olarak "**RS LAWS**" **Radiosensitivite Kuralı**'nı ifade etmişlerdir;

"Radyasyona karşı en duyarlı hücreler,
en fazla mitotik aktivitesi olan,
differansiasyonu düşük,
immatür ve aktif bölünme gösteren hücrelerdir."

Lenfosit ve oositler bu kuralın dışındadır, çünkü yüksek diferansiye ve çok radiosensitifler.

1. Çok Duyarlı Hücreler (Radiosensitive): 2500 R (25 Gy) ve daha küçük dozlar, bu hücrelerin çoğunu öldürür veya ağır hasara uğrattır.

Lenfositler ve lenfoid doku
Kan ve kemik iliğindeki kök hücreler
Mide, barsak epiteli
Ovarium ve testisin germ hücreleri
Embriyonik dokular
Müköz membranlar

2. Orta Duyarlı Hücreler (Radioresponsive): 2500-5000 R (25-50 Gy)'de zarar görürler.

Deri
Damar endoteli
Gelişmekte olan kemik ve kırık
Tükrük bezleri

3. Dirençli Hücreler (Radioresistance): 5000 R (50 Gy) üzerindeki dozlarda zarar görürler.

Santral sinir sistemi
Olgun kemik ve kırık
Kaslar

Biyolojik Sistemler Üzerine Etkiler:

Deri: Zararın gözle görülebildiği ilk dokudur. Yüksek hücre bölünme hızı ve ışınlanma derecesi nedeniyle, epidermin bazal stratum hücreleri en radyosensitif hücrelerdendir.

İlk etkiler eritem, tırnak ve saç, kıllarda değişiklikler, kıllanmada azalma (alopecia), daha sonra depigmentasyon, ülserasyon, dermatitler ortaya çıkar.

Latent periyot geçtikten sonra doza paralel olarak görülen zararlar sırasıyla şunlardır:

1. *Eritem:* Işınlanan alanda kızarıklık
2. *Kuru deskuamasyon:* Deri kuru ve pul pul dökülür.
3. *Veziküller:* İçi sıvı dolu lezyonlardır.

Bunlar radyoterapide “**tolerans sınırı**”dır. Buraya kadar olay reversible'dir.

Devam edilirse irreversible olur.

Bundan sonra, nekroz, epilasyon, pigmentasyon, yağ ve ter bezlerinin tahrip olması, telengiektazi (damar yapısının bozulması, damarlarda yer yer genişlemeler..) olur.

Deride başka nedenlerle olan bir yara varsa radyasyon, yara kontraksiyonuna engel olur, granülasyon dokusu yapımını ve rejenerasyonu inhibe eder.

Gastrointestinal Sistem: Mukoza epiteli radyasyona oldukça duyarlıdır. Önce mitoz durur, ödem, dejenerasyon, epitelde nekroz, ülser görülür. Bu değişiklikler bulantı, kusma, ishal ve iştahsızlık belirtilerini ortaya çıkarır. Mukus, pepsin ve asit salgısı azalır, emilim bozulur.

Göz: Radyasyona en duyarlı bölümü lens. Gecikmiş radyasyon etkisi olarak katarakt meydana gelir. Dentomaksillofasiyal görüntüleme doz 0,02- 0,4 mGy; ICRP'nin katarakt için doz tahmininden en az 1250 kat daha düşüktür.

Merkezi Sinir Sistemi: Radyasyona en dirençli sistemdir. Beyin, medulla spinalise oranla daha duyarlıdır.

Akciğerler: Radyasyondan direkt veya dolaylı olarak etkilenirler.

Direkt etki, hava keseciklerinin veya bunları besleyen hücrelerin tahrip olmasıdır.

En tehlikeli olanı, solunum yoluyla alınan radyoaktif toz ve buharlardır.

İndirekt olarak, vücudun başka bir yerinde radyasyon etkisiyle oluşan toksik yan ürünler, kan dolaşımıyla akciğerlere gelir ve dolaylı olarak hasar yapar.

Üreme Sistemi: Gonadlar radyasyona çok duyarlıdır. Doza bağlı olarak erkekte geçici veya kalıcı sterilite görülebilir. Küçük dozlar, kadınlarda geçici olarak ovülasyonu ve menstrüel siklusu durdurabilir. Kadında hormon üretimi azalır, buna bağlı, sterilite ile birlikte yapay menapoz.

Hematopoetik Sistem: Radyasyona en duyarlı hücre lenfosit, kemik iliğinin kök hücreleri. Trombositler daha dirençli, ancak 2. hafta sonunda kemik iliğinde yapımları aksadığından, minimum düzeydedir.

Eritrositler en dirençli, ancak yüksek doz radyasyonla azalır ve anemi gelişir.

Lökositlerin ışınlanması vücut direncini düşürür, enfeksiyona yatkınlık gelişir.

Trombosit hasarı pıhtılaşmayı bozar.

Kemik iliği:

İnhibisyon, birkaç günde başlar, birkaç hafta sürer.

Lenfatik Sistem: Dalak, lenf bezleri ve timus radyasyona oldukça duyarlıdır.

Dalakta mitotik aktivite durur, timusun aktivitesi bozulur.

Lenf bezlerinde fonksiyonel ve morfolojik anomaliler görülür.

Kemiklerde Radyasyon Etkileri: Gelişmekte olan kemik ve kırık dokusu radyasyona duyarlıdır. Çocuklarda epifiz kırıkdağı 100 Rad (1 Gy) gibi, nispeten küçük dozlarda zarara uğrar, gelişim geçici olarak durur.

1000 R (10 Gy)' den fazla dozda nekroz ve kemik kırıkları görülür.

Erişkinlerde, kemik ve kırık dokusu radyasyona dirençlidir. Olgun kemikte hasar, periost ve kortikal kemiğin zaten seyrek olan damar yapısının hasarı sonucu beslenme bozukluğu ile oluşur, ayrıca osteoblastların yıkımı da rol oynar.

İçeriden ışınlama ile radyoaktif maddeler kemikte biriktiğinde osteoradyonekroz oluşabilir. İçten yapılan ışınlamanın etkisiyle, yıllar sonra kemiklerden sarkomalar (osteosarkoma, kondrosarkoma) gelişebilir.

Osteoradyonekroz:

Radyoterapinin geç bir komplikasyonudur, 6-12 ay sonra, aylar, yıllar sonra ortaya çıkabilir. Görülme sıklığı %5-7'dir. Radyasyona maruz kalan kemik hücrelerinde kan dolaşımı bozukluğu sonucu beslenme olmaz. Bölgede mukoza bütünlüğünü bozacak bir travma (diş çekimi, cerrahi, protez vuruğu, periodontal yıkım.) olduğunda osteoradyonekroz gelişir. Oluşması için;

Kemik doku radyasyona maruz kalmalı,

Doz, damar endotelini etkileyecek miktarda olmalı,

Bölgede mukoza bütünlüğünü bozacak travmatik bir durum oluşmalı

Doz 50 Gy'den azsa osteoradyonekroz olasılığı düşük, 66 Gy'in üstünde risk 11 kat artar. Dişlerin bulunduğu çenelerde osteoradyonekroz, genellikle alveol kemiğinde başlar, periodontal aralık harabiyete uğrar. Alt çenede, üst çeneden daha fazla görülür. Çünkü mandibula korteksinin hemen hemen tüm beslenmesi periost yoluyla olur. Periost da radyasyona oldukça duyarlıdır ve kolaylıkla özelliğini kaybedip kalınlaşır.

Mandibulanın yüksek mineralizasyonu nedeniyle radyasyon absorpsiyonunun daha fazla olmasının da bir neden olduğu ileri sürülmektedir.

Radyolojik bulgular; düzensiz sınır ve yapıda radyolüsent kemik yıkım alanı içinde düzensiz radyopak nekrotik kemik veya sekestr görülür.

Radyasyona maruz kalmış alt çenede, dişlerin periodontal ligament boşluğu genişleyebilir, ancak çevreleyen kemik sağlamsa herhangi bir tedavi gerektirmez.

Kemik yıkımı, patolojik kırığa neden olacak kadar şiddetli olabilir

RT öncesi diş bakımı, pulpa enfeksiyonlarının ışınlanmış dokulara yayılarak ORN'ye neden olmasını önlemek için önemlidir. Çürük dişler radyoterapiden önce restore edilmelidir.

İyi ağız hijyeni ve günlük topikal florür uygulaması gibi koruyucu önlemlere önem verilmelidir.

Yaygın çürük veya zayıf periodontal desteğe sahip dişler çekilebilir ve RT başlamadan önce çekim yaralarının iyileşmesi için 2-3 hafta beklenebilir.

Tedavi sonrası yönetim de aynı derecede önemlidir. Periyodik ağız muayeneleri ve radyografiler, çürüklerin ve periapikal inflamasyonun erken tespit edilmesini sağlar.

Tanısal radyasyon dozu, tedavi dozu ile karşılaştırıldığında önemsizdir, gerekirse radyolojik inceleme yapılmalıdır.

Işınlanmış kemik bölgesindeki çekimler minimum cerrahi travma ile yapılmalıdır.

Restorasyonlar, travma riskini en aza indirmek için kontrol edilmelidir.

Embryo/ Fetusun Radyasyon Riski

Fetus, proliferatif bir sistemdir ve birçok differansiye olmamış hücresi vardır, bu nedenle radyasyon etkilerine aşırı duyarlıdır. Embriyonal dokuların radyasyon toleransı, ortalama 25 Rad (0.25 Gy) olarak kabul edilir. Risk, gebeliğin dönemi ve absorbe edilen doza bağlıdır.

İntrauterin gelişme geriliği,

Embriyonik, fetal veya neonatal ölüm,

Konjenital malformasyonlar oluşabilir.

İlk 2 hafta en kritik dönemdir, doz yüksekse fetus ölür.

En yüksek malformasyon insidansı organogenesis döneminde (3.-8. hafta)

Eşik dozlar nispeten düşük; malformasyonlar için 0.1-0.2 Gy, beyin hasarı için 0.2 Gy

Hiroşima ve Nagasaki' de gebeliğin erken dönemlerinde radyasyona maruz kalan

çocuklarda mikrosefali ve mental retardasyon en yaygın anomaliler olarak bulunmuştur.

Embriyo ve fetüste doku reaksiyonlarına neden olan dozlar (eşik doz 100-300 mGy),

dentomaksillofasiyal görüntüleme için fetal dozdan 10.000 - 30.000 kat fazladır.

Radyasyonun Oral Kavitedeki Etkileri :

Deriye Etkisi: Derinin duyarlılığı, yaşı ve rejenerasyon özelliği gibi kişisel faktörlere bağlıdır. Yüz gelişimini olumsuz etkiler.

Diş hekimi veya teknisyenin filmi hasta ağızında kendisinin tutması sonucu el ve parmaklarda radyodermatitis, çeşitli tırnak bozuklukları, karsinomalar görülebilir. Bu nedenle hasta mutlaka filmi kendisi ağızında tutmalıdır.

Ağız Mukozası: Keratin tabakasının azlığı ve kapiller kan dolaşımının daha fazla olması nedeniyle, deriye göre mukoza radyasyona daha duyarlıdır, zararlar da daha kısa sürede ortaya çıkar. Alkol ve sigara bunu irrite eder.

2. haftadan sonra, kızarıklık, ödem, mukositis, pseudomembran, deskuamasyon, stomatitis, şiddetli ağrı, beslenme güçlüğü, sekonder mantar enfeksiyonları,

Kızarıklık, ödem ve ülserasyonla başlayan mukositis, ağız kuruluğu, atrofi, keratinizasyon artışı ve kan dolaşım bozuklukları ile kronikleşir. Tükürüğün azalması ve ağız hijyeninin bozukluğu, tabloyu ağırlaştırır.

Radyoterapi bitiminden 2 ay kadar sonra mukozada iyileşme olur, ancak doku direnci bozulmuştur, protez uygulamaları güçleşir, bölgedeki travmalar geç iyileşen ve kemiğe ulaşan ülserasyonlara yol açar.

Oral mukoza ile birlikte farinks, özefagus mukozaları da etkilenir, kalıcı olarak atrofik, incelmış ve nispeten avasküler mukoza, alttaki bağ dokusunda fibrozis, ülserasyon, protez uygulamalarında güçlük.

Tat Papillaları: Radyoterapi sırasında tat duyusu azalır. Xerostomia ve mukositise bağlı indirekt etki dışında, direkt olarak papillalarda histolojik yapı değişiklikleri olur. Radyoterapinin 2.- 3. haftalarında duyu azalması ortaya çıkar.

Tükürük Bezleri: Salgılamada azalmanın dışında, viskozite, pH, elektrolitler, Ig seviyesindeki değişiklikleri de kapsar. Tükürük miktarı azalınca oral mikroflarının kompozisyonu etkilenir, karyojenik mikroorganizmalarda artış olur. En çok, parotis bezi etkilenir.

RT'nin ilk birkaç haftasında, doza bağlı olarak tükürük azlığı belirginleşir, 60 Gy'de tamamen yok olabilir. Ağız kuruluğu, hassasiyet, yutma güçlüğü görülür.

RT sonrası kronik enflamasyon, asinüs ve kanalların kaybı, fibrozis, 1.5-3 ay sonra bezlerin kıvamı sertleşir. Damarsal bozukluklar ve parankimal dejenerasyonlar olur.

Periodontal hastalık, hızlı ve yaygın çürükler ortaya çıkarır, protez toleransı azalır.

Radyoterapiden sonra tükürükte Ig ve lizozim oranı artar.

Disfaji: Mide bulantısı, kusma ve gastrointestinal harabiyete bağlı beslenme sorunları, ayrıca tükürük azalması sonucu çiğneme ve yutmanın bozulması söz konusudur.

Radyasyon, farinks kaslarının atrofi ve fibrozisine neden olur. Alkol ve sigara kullananlarda disfaji daha da artar.

Dişler: Baş-boyun RT uygulanan çocuklarda dişlerdeki etkiler, diş gelişiminin aşamasına bağlıdır. Erken gelişim döneminde radyasyona maruz kalınırsa, diş tomurcuğu etkilenebilir. Kısmen gelişmiş dişlerde hücresel farklılaşmanın engellenmesiyle malformasyonlar olabilir ve genel büyüme durabilir, kök oluşumu gecikebilir veya durabilir, kalıcı dişlerde gecikmiş kök gelişimi, normalden küçük dişler veya bir veya daha fazla dişin oluşmaması gibi anomaliler görülebilir. Erişkin dişler direkt etkiye dirençli, tükrükteki değişikliklere bağlı etkilenme olur.

Çiğneme kasları Doza ve bölgeye bağlı, trismusla sonuçlanan enflamasyon, fibrozis gelişebilir.

Radyasyon Çürükleri:

Tükrük bezi hasarı ile tükrükteki değişiklikler sonucu görülür. Kalan tükrükte kalsiyum yoğunluğu azaldığı için, diş dokusunun remineralizasyonu azalır. Ayrıca tükrüğün temizleyici etkisi yok olur. 30 Gy'den yüksek dozlarda minede harabiyet başlar.

Radyoterapiden 1 ay kadar sonra, sıcak-soğuk, tatlı-ekşi hassasiyeti ile başlar, 10-18 ay içinde diş kronu tamamen harap olur.

Radyasyon çürükleri farklı tiplerde görülür. En yaygını, dişlerin bukkal, oklüzal, kesici ve palatinalinde yaygın yüzeysel lezyonlardır, diğer türü önce servikal bölgedeki sement ve dentini etkiler, dişte çevresel olarak ilerler, kron kaybı olabilir veya tüm kronunda koyu bir pigmentasyon olarak ortaya çıkar, kesici kenarlar belirgin şekilde aşınmış olabilir, bu lezyonlar ön dişlerden başlar, arkaya doğru gider, sonuçta kronlar tamamen harap olur, geriye kahve-siyah kökler kalır.

Radyasyon çürüklerinin histolojik görünümü normal çürüklerle aynıdır, farkları, bunların hızla ve genişleyerek büyümeleridir, ayrıca hiçbir zaman ara yüzden başlamazlar.

Radyasyon çürüklerini azaltmak için viskoz, topikal %1 nötral sodyum florür jel, hazırlanan özel kaşıklarla günlük olarak dişlere uygulanmalıdır. Ağız hijyeninin optimal hale getirilmesi, karyojenik gıdaların olmadığı bir diyet reçetesi, gerekli restoratif ve diğer dental tedavi işlemlerinin tamamlanması ve hasta ile sürekli iletişim ve kontrolün sürdürülmesi gerekir. İleri düzeyde patolojili, yıkımlı, risk oluşturan dişler RT süreci öncesinde çekilmelidir.

DOZ- RİSK

Her düzey iyonize radyasyon zararlıdır.

Hiçbir riskin olmadığı bir eşik değerinin varlığını gösteren bilimsel kanıt yoktur.

“ As Low As Reasonably Achievable ” ALARA

Radyasyonun, tek başına kanser riski oluşturduğu söylenemez.

Risk direkt olarak ölçülemez veya diğer kaynakların neden olduğu radyasyon riskinden (çevresel, kimyasal, biyolojik.) ayırt edilemez.

Bu yüzden, radyasyona bağlı kanserle ilgili çalışmalar, ortalama doğal radyasyon seviyesinden çok daha fazla bir doza maruz kaldıkları tespit edilmiş kanserli hasta grupları üzerinde yapılmaktadır. (atom bombasından sağ kalanlar, tıbbi ışınlamaya maruz kalan hastalar, mesleki ışınlamalar..)

Diş hekimliğinde kullanılan dozlar nispeten küçüktür.

1 periapikal film	0.0015 mSv - 0.005mSv, (1.5 µSv)	
21 periapikal film serisi ile ortalama	0.019 – 0.184 mSv	16 günlük çevresel doz
1 panoramik radyografi ile	0.008 - 0.024 mSv	7 günlük çevresel doz
4 bitewing radyografi ile ise	0.004-0.033 mSv	3 günlük çevresel doz

Buna göre dental radyolojide, maksimum izin verilen dozu aşmak için, 1 yılda 200 periapikal veya 40 panoramik film çekilmesi gerekmektedir. Bu nedenle dental radyolojide güvenlik sınırının aşılması zordur.

ICRP'ye göre,

Radyasyonla çalışmayan kişiler için izin verilen en yüksek doz **1 mSv**

Radyasyonla çalışanlar için **20 mSv**

Radyografik İncelemelerde Etkifif Doz ve Background Ekspozür Eşdeğeri

İnceleme	E (μSv)	Background Doz Eşdeęeri (gün)
Intraoral		
Dikdörtgen Kollimasyon		
Posterior Bite-wingler		
PSP-F Speed film	5	0.6
Full-mouth PSP-F Speed film	40	5
Full-mouth CCD sensör	20	2.5
Yuvarlak Kollimasyon,		
Full-mouth D-Speed film	400	48
Full-mouth PSP-F Speed film	200	24
Full-mouth CCD sensör	100	12
Extraoral		
Panoramik	20 μSv	2.5 gün
Sefalometrik	5 μSv	0.6 gün
CBCT		
Büyük FOV	120 μSv	15 gün
Orta FOV	100 μSv	12 gün
Küçük FOV	50 μSv	6 gün
Multislice CT		
Maksillofasial	650 μSv	2 ay
Kafa	2 mSv	8 ay
Abdomen	20 mSv	7 yıl
Göğüs	7 mSv	2 yıl

*WHITE AND PHAROAH'S ORAL RADIOLOGY: ISBN: 978-0-443-11871-5
PRINCIPLES AND INTERPRETATION, NINTH EDITION 2026 by Elsevier İne.*