

# RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

2023-2024

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 “ Radiobiyoloji” 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. Yerkabuğu radyoaktivitesi, bölgenin özelliğine göre değiştiğinden, yer yer daha az veya çok olabilir.

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.

Yerkabuğundaki radyoizotopların yaydığı gama ışınları nedeniyle organizma dış kaynaklı radyasyona maruz kalır.

Özellikle granit gibi volkanik kayalarda, fosfat kayalarda, tortularda yüksek radyoaktivite bulunabilmektedir.

Yapı malzemeleri taş ve topraktan üretildikleri için düşük oranda da olsa radyoaktivite içerebilirler. Yaşanılan bölgenin jeolojik özellikleri yanında, binalarda kullanılan yapı malzemeleri alınan radyasyon dozunu etkilemektedir. Betonarme binalardaki radyasyon dozu, ahşap yapılara oranla daha fazladır.

Alınan radyasyon dozu yaşanılan bölgenin jeolojik özelliklerine, binada kullanılan yapı malzemelerine bağlı olarak değişmektedir.

**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. Hem sigara içip, hem de yüksek dozda radona maruz kalmış 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.

Bölgeler arasındaki farklı ölçümler, bölgenin doğal radyoaktif kaynak bakımından jeolojik özelliğine, coğrafi bakımdan da aldığı güneş ışınına bağlıdır.

Güneşin aktif durumuna (güneş patlamalarına), yerin manyetik alanına ve yerküreden yüksekliğe (irtifa) bağlı olarak kozmik ışınların 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 zırlar. Bu nedenle, deniz seviyesine yaklaştıkça kozmik ışınların yoğunluğu, dolayısıyla doz miktarı da azalır. Yükseklik arttıkça alınan radyasyon da artar. Örneğin La Paz'da bu rakam küresel ortalamanın 5 katıdır.

Deniz kenarında haftada 2 - 2,5 mRem radyasyon alınırken, Avrupa'nın en yüksek tepesi olan Mont Blanc' da haftada 4-5 mRem radyasyon alınır.

İnsanların büyük çoğunluğu rakımı düşük bölgelerde yaşadıkları için kozmik radyasyon nedeni ile maruz kaldıkları dozlarda fazla farklılıklar gözlenmez.

Uçuş yüksekliğindeki kozmik ışın yoğunluğu, yer seviyesine oranla daha fazla olduğundan, uçak yolculuklarında daha fazla kozmik ışına maruz kalınır.

Atmosfer ile yerin magnetik alanı yeryüzünü kozmik radyasyona karşı korur ve ekvator dan kutuplara gidildikçe aynı zamanda deniz seviyesinden yükseldikçe kozmik ışınların yoğunluğu artar. Bu nedenle atmosfer içinde herhangi bir noktadaki kozmik radyasyon, yükseklik, magnetik alan ve güneşin aktif durumuna göre değişir.

**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 hastalıkların 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)
<b>Doğal Background</b>	
Radon	2.3
Uzay	0.3
Vücut içi radionüklidler	0.3
Yer kabuğu	0.2
<b>Toplam</b>	<b>3.1</b>
<b>Medikal</b>	
CT	1.5
Nükleer tıp	0.8
Girişimsel fluoroskopi	0.4
Konvansiyonel radyografi ve fluoroskopi	0.3
Dental	0.007
<b>Toplam</b>	<b>3.0</b>
<b>Tüketim malzemeleri ve diğerleri</b>	<b>0.1</b>
<b>Tümünün Toplamı</b>	<b>6.2</b>

(*Ionizing radiation exposure of the population of the US, NCRP Report 160, 2009*  
*Oral Radiology White SC, Pharoah MJ Ed 7 , 2014*)

**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.

### Doku Ağırlık Faktörleri (ICRP-103 - 2007)

Doku	Doku Ağırlık Faktörü $w_T$	$\Sigma w_T$
Kırmızı kemik iliği, kolon, akciğer, mide, meme, diğer dokular (*)	0.12	0.72
Gonadlar	0.08	0.08
Mesane, özefagus, karaciğer, tiroid	0.04	0.16
Kemik yüzeyi, beyin, tükrük bezleri, deri	0.01	0.04
	<b>Total</b>	<b>1.00</b>

(\*) Diğer dokular: Adrenaller, ekstratorasik bölge, safra kesesi, kalp, böbrekler, lenf düğümleri, kas, oral mukoza, pankreas, prostat (♂), ince barsak, dalak, timus, uterus/serviks (♀).

$$\text{Effektif doz} = E = \Sigma W_T \times H_T$$

$w_T$  doku ağırlık faktörü  
 $H_T$  her bir doku için eşdeğer doz

Her bir organ ve dokudaki eşdeğer doz,  $w_T$  ile çarpılır, bu veriler tüm vücut üzerinden toplanarak E hesaplanır.

İyonize radyasyon canlılarda moleküler ve hücresel düzeyde, fiziksel, kimyasal ve biyolojik çeşitli değişikliklere yol açar. (İyonize radyasyon, atomdan bir elektronu ayırabilecek güçteki radyasyondur. Moleküler değişme ve yeni kimyasal bağlar yaratma söz konusudur.)

Biyolojik etkilerin ortaya çıkmasındaki olaylar:

Radyasyon enerjisinin bir kısmının canlı doku tarafından absorpsiyonu, Atomların iyonizasyonu ve eksitasyonu (bir veya bir kaç elektronun atomdan ayrılıp hızla harekete geçmesi),

Harekete geçen elektronun, bir komşu atom yörüngesine girerek kimyasal reaksiyonları başlatıp, serbest radikaller oluşturması,

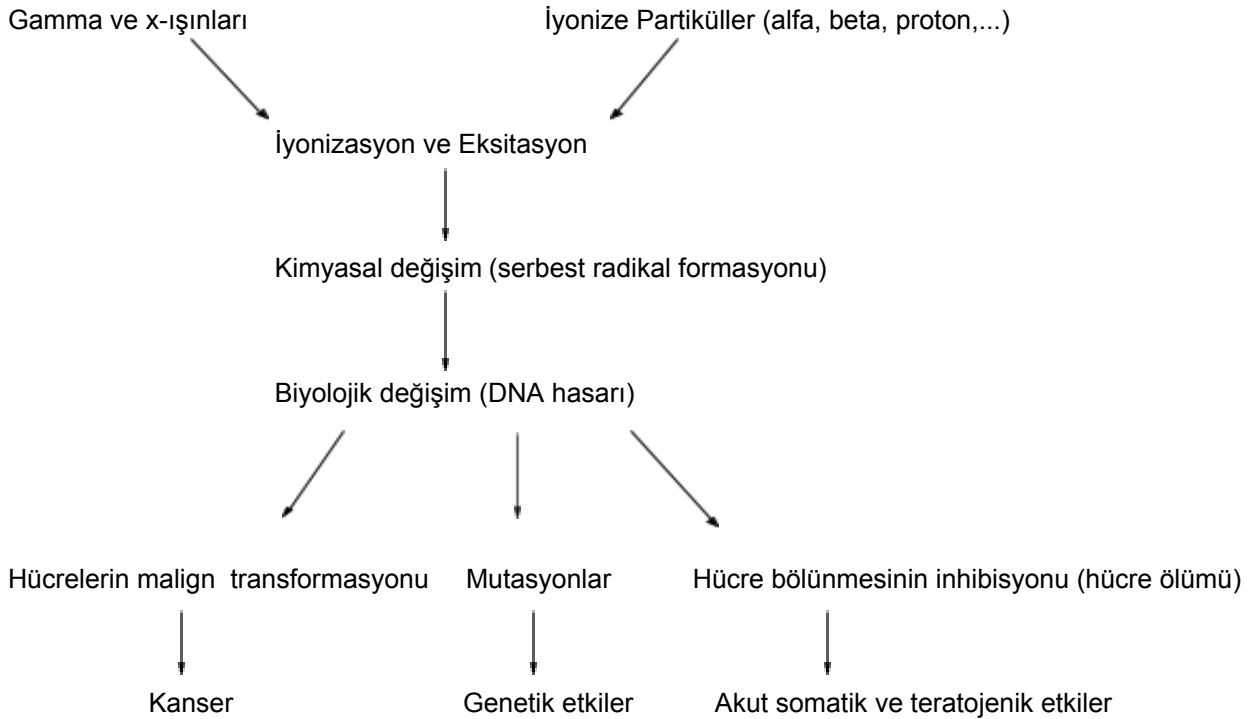
Bu kimyasal reaksiyonlar sonucu enzimlerin inaktive olması,

Genlerin mutasyonu, kromozomların zarar görmesi,

Hücre fonksiyonunda bozukluk,

Hücre ölümü.

### Radyasyon Zararlarının Gelişimi



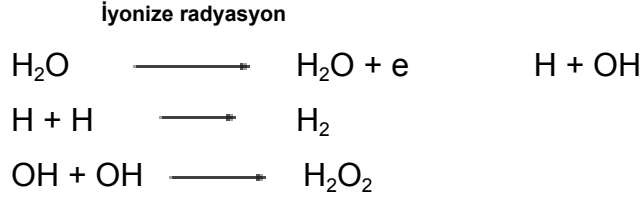
Radyasyona bağlı değişiklikler vücutta üreme hücrelerinde ortaya çıkarsa gelecek kuşaklara aktarılabilir.

**Radyasyonun moleküler düzeydeki etkileri :** Direkt veya indirekt yolla olur.

**Direkt yol,** iyonize radyasyona maruz kalan molekülün doğrudan doğruya molekül yapısının bozulup eksite duruma geçmesidir.

**İndirekt yolda** ise, iyonize radyasyon sonucu oluşan bazı ara ürünler, başka bir dizi kimyasal reaksiyona girerek, diğer moleküllerin değişmesine neden olurlar.

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



Biyolojik sistemdeki su, fotonları absorbe eder ve su molekülleri iyonize olur. Serbest radikal şeklindeki bu iyonlar molekül ile reaksiyona girerek değişikliklere neden olur.

Böylece oluşan ürünler (örn:  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 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 hiç bir 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, direkt etkiyle 1000 cGy'in üzerinde hasar oluşur.

Kromozom anomalileri, radyasyona maruz kalan hücrelerde, mitoz sırasında, DNA kromozomları oluşurken gözlenir. Radyasyonun DNA'da yaptığı hasar,

- hücre ölümüne,
- genetik mutasyonlara,
- kanser oluşumuna yol açar.

Tıbbi diagnostik işlemlerde radyasyona maruz kalmış hastaların periferik kan lenfositlerinde kromozom anomalileri saptanmıştır. Hiroşima ve Nagazaki' deki atom bombasında sağ kalanlar, dolaşımdaki lenfositlerinde radyasyon ekspozüründen sonra, iki dekattan daha fazla kromozom anomalisi gösterilmiştir. Kromozom anomalilerinin sıklığı, genellikle alınan radyasyon dozu ile orantılıdır.



Radyasyon etkileri, nucleus ve kromozomlardan başka diğer hücresel yapılarda da ortaya çıkar. Hücre kinetiği üzerinde en önemli radyasyon etkileri, mitoz 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 differansiyasyonları 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.

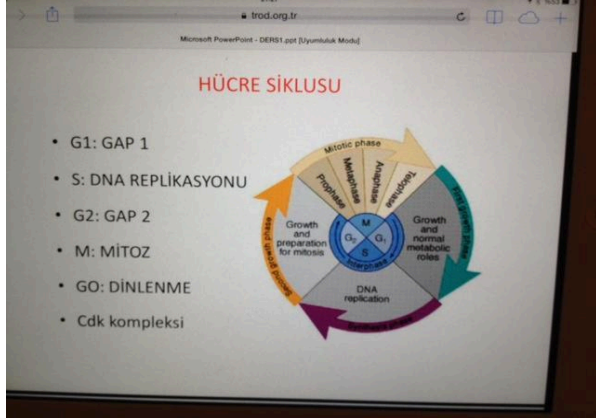
Oksijenden zengin ortamda radyasyonun oluşturduğu daha büyük hücre tahribatı, hidrojen peroksit ve hidroperoksil serbest radikallerinin miktarının artmasına bağlıdır.

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 radiosensitivitesini 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 : Hücre, dinlenme fazının son kısmında ve profazın erken kısmında radyasyona en duyarlıdır. G2, M fazında radiosensitivite artar, S fazında azalır.



Ortamla ilgili faktörler de önemlidir, ortamda bol oksijen varsa radyasyondan etkilenme az olur. Ortam sıcaklığı düşükse 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, bir kaç saat-gün ile bir kaç 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.

Vücuttaki atom ve moleküllerle etkileşen radyasyon enerjisi, organizma tarafından belli bir miktarda absorbe edildiği zaman iki tip etki meydana getirir: Somatik etkiler, Genetik etkiler

**Somatik Etkiler :** Radyasyonun biyolojik etkileri, ışınlanan kişinin kendisinde ortaya çıkar.

Organizmada, üreme sistemi dışında tüm doku hücrelerine somatik hücreler (vücut fonksiyonlarını yerine getiren) denir. Bu hücrelerin oluşturduğu dokularda radyasyon sonucu oluşan zarar, gelecek kuşaklara aktarılmaz.

Somatik etkiler, radyasyonun toplam dozuna, bu dozun süresine, ışınlanan vücut bölgesi ve bu bölgenin büyüklüğüne bağlıdır. Bir kaç 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.

Somatik etkiler, akut (erken) ve kronik (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.

Gecikmiş etkiler, uzun süre, aralıklı olarak düşük dozlarla, 2 ay - 20 yıl veya daha sonra ortaya çıkar.

**Akut Somatik Etkiler :** Büyük bir radyasyon dozuna bir defada maruz kalma sonucu ortaya çıkar, kişiden kişiye önemli ölçüde değişir.

Genellikle total vücut ışınlanması sonucu, 100 Rad'ın (1Gy) üzerindeki dozlarda görülür. Klinik görünümü orta ve ağır hastalıktan ölüme kadar değişebilir ve dakika, saat veya haftalar sonra ortaya çıkabilir.

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

**Akut Radyasyon Sendromu :** Tüm vücudun, birkaç dakika veya bir kaç 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 ortaya çıkar.

- 1. Başlangıç evresi :** 0 - 48 saat; iştahsızlık, bulantı, terleme, yorgunluk vardır.
- 2. Latent evre :** 48 saat ile 2-3 hafta arası; bu bulgularda düzelme görülür.
- 3. Ağır hastalık evresi :** 2-3 hafta ile 6-8 hafta arası; ateş, enfeksiyon, deri duyarlılığı, saç dökülmesi, hemoraji, diyare, letarji, bilinç ve algılama bozuklukları, kardiyovasküler kollaps görülebilir. Bu bulguların ortaya çıkması doza ve kişisel duyarlılığa bağlıdır.
- 4. İyileşme evresi :** 6 - 8 haftadan bir kaç aya kadar sürebilir.

Absorbe edilen doz (Gy)	Doku	Semptomlar
1-2		Prodromal belirtiler iştahsızlık, bulantı, kusma, halsizlik, yorgunluk
2-7	Kemik iliği	Hematopoetik belirtiler Ölüm 10-30 gün lökopeni, trombopeni, hemoraji, enfeksiyonlar
7-15	GİS	Gastrointestinal belirtiler Ölüm 2 hafta diyare, ateş, elektrolit dengesi bozukluğu
>50	KVS ve MSS	KVS ve MSS belirtileri Ölüm 1-2 gün kramplar, tremor, ataksi, letarji, görme bozukluğu, koma

**Kronik (Geç) Somatik Etkiler :** Düşük seviyede ve uzun süreli ışınlamalardan sonra, kansere dönüşüm, yaşamın kısalması, fizyolojik yaşlanma sürecinin kısalması, lösemi insidansında artış, iyi ve kötü huylu tümör insidansında artış görülebilir.

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.

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.

Radyasyona bağlı olarak en çok, kan, deri, akciğer, kemik ve kemik iliğinde kanser görülür.

**Genetik Etkiler :** Radyasyon, reproduktif hücrelerin genetik materyalinde zararlara neden olabilir. 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.

Model organizma olarak *D. melanogaster* Model organizmalar, insanlarla çalışmanın uygun ve etik olmadığı durumlarda tercih edilen, nörodejeneratif hastalıklar, kanser, immün sistem hastalıkları, enfeksiyon hastalıkları başta olmak üzere insanlarda görülen hastalıkların altında yatan mekanizma ve patolojilerin aydınlatılması, evrimsel biyoloji çalışmalarında taksonlar arasındaki filogenetik ilişkilerin (benzerlik ve farklılıklar) belirlenmesi, gelişim biyolojisi çalışmalarında omurgalı gelişim sürecinin aydınlatılması, ilaç tarama ve geliştirme çalışmaları gibi farklı alanlarda laboratuvar ortamında kullanılan canlılardır. Kısa sürede hızla çoğalmaları, düşük maliyetle yetiştirilebilmeleri, insan genomu ile kıyaslandığında daha basit bir genoma sahip olmaları, genom haritalarının çıkartılmış olması ve en önemlisi, insan hastalıklarına neden olan birçok genin model organizmalarla homoloji göstermesi, model organizmaları hastalıklarla ilgili araştırmalarda oldukça önemli kılmaktadır<sup>5,6</sup>.

Memelilerdeki radyasyon genetiği bilgileri, fareler üzerindeki deneylere dayanmaktadır.

Hemen bütün organizmaların kromozomu DNA ve proteinlerden ibarettir.

DNA, genetik bilgiler taşır, bütün canlılarda, sarmal şeklinde, birbiri etrafında dolanmış iki polinükleotid zincirinden oluşmuştur (çift heliks).

Kromozomların karakteristiği, replikasyon oluşturması, yani mitoz sırasında, her kromozomun kendisinin tam aynısını meydana getirmesidir.

Daha sonra, birbirinin aynı olan bu kromozom çiftinin her biri, bir yavru hücreye geçer.

Her kromozom, gen denilen kalıtsal birimlerden oluşmuştur.

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.

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

Üreme hücrelerinin maruz kaldığı radyasyonun dozu ve hızı arttıkça mutasyonlar artar.

Yapılan araştırmalar sonucu, radyasyonun genetik zararları olarak gebelerde düşük, doğacak çocuklarda kromozom anomalilerine bağlı çeşitli bozukluklar (Down sendromu gibi) görülmüştür.

Mutasyonlar bir defa olduktan sonra artık kalıcıdır. Radyasyonun oluşturduğu gen mutasyonunun eşik veya tolerans dozu yoktur. Küçük dozlar birikici olabilir ve etkileri birkaç nesil sonra ortaya çıkabilir.

### **Radyasyona bağlı genetik etkilerde;**

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.

Erkeklerin radyasyon duyarlılığı kadınlardan daha fazladır.

Radyasyona maruz kalma ile gebeliğin oluşması arasındaki süre arttıkça mutasyon oranı azalır.

### **Doku ve Organ Düzeyinde Radyasyon Etkileri:**

Doku veya organın radiosensitivitesi, radyasyona tepkisiyle ölçülür. Kayıp hücrelerin sayısı azsa, klinik etki görülmez. Kayıp hücrelerin sayısı arttıkça herkeste görülebilecek klinik belirtiler ortaya çıkar.

Bu değişikliğin şiddeti, doza ve buna bağlı hücre kaybına bağlıdır. Bu tip değişikliklere **deterministik (nonstokastik)** etkiler denir. Deride kızarıklık, xerostomia, osteoradionekroz, katarakt, fetus gelişiminin durması, radyoterapi sonrasında oral değişiklikler, deterministik etkilere örnektir. Deterministik etkiler, atrofiye yol açan doku hipoplazisi (hücre kaybı) ile ortaya çıkar. Deterministik etkilerin gözlenebilmesi için, eşik değere kadar doz alınması gerekir. Eşik dozu yüksektir, bunun altında zararlı etkiler görülmez, latent periyodu kısadır.

Radyasyona bağlı biyolojik etkilerin diğer bir şekli **sitokastik etkilerdir**, şiddeti değil, var olma olasılığı doza bağlı olan değişikliklerdir, ya vardır ya yoktur. Bir eşik dozu olmaksızın ortaya çıkması muhtemel etkilerdir. Lösemi, tiroid kanseri, tükrük bezi tümörleri, genetik bozukluklar sitokastik etkilere örnektir, çünkü daha büyük doz, şiddetini değil, ortaya çıkma olasılığını artırır.

Radyasyon hasarının onarımı tam olmazsa, değişim yavru hücrelere aktarılır, ışınlanan kişide kanser oluşumuna yol açar. Genetik bilgileri aktaran germ hücreleri etkilenirse kalıtsal bozukluklar meydana gelebilir.

**Stokastik karsinojenik etkiler** 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.

Lösemi:Kemik iliği ışınlanmasını takiben insidansı artar. 5 yılda ortaya çıkar.

Tiroid, kemik, beyin ve sinir sistemi, özefagus, tükürük bezi, deri, radyasyona bağlı malignitelerin görüldüğü diğer organlardır.

Radyasyona bağlı doku zararları iki mekanizma ile ortaya çıkar:

**Primer etki** : Işınların 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. Aynı bireyin farklı organlarındaki farklı hücreler, irradyasyona farklı derecelerde tepki gösterirler (Bergonie ve Tribondeau).

### **Hücrelerin İyonize Radyasyona Duyarlılığı**

Çeşitli hayvan türleri arasında irradyasyona duyarlılık bakımından farklar olduğu gibi, bir organizmadaki çeşitli hücre cinsleri arasında da farklar vardır: En radiosensitif hücreler, en fazla mitotik aktivitesi olan, aktif bölünme dönemindeki ve differansiasyonu düşük hücrelerdir.

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

Lenfositler ve lenfoid doku

Kan ve kemik iliğindeki kök hücreler

Mide, barsak epiteli

Ovarium ve testisin germ hücreleri

Embryonik dokular

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

Deri



Damar endoteli  
Akciğer  
Böbrek  
Karaciğer  
Lens (göz)  
Gelişmekte olan kemik ve kırık

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

Santral sinir sistemi  
Olgun kemik ve kırık  
Kaslar

Radyasyon, doku ve organın büyümesinde aksaklıklara veya ölüme neden olur. Doku ölümü tamir olunamayan hasardan ileri gelir, doku tamamen tahrip olmamışsa tamir olayı başlayarak normal hücre fonksiyonları geçici olarak durur ve ölen hücrelerin yenilenmesi için hücreler hızla çoğalır.

**Biyolojik Sistemler Üzerine Etkiler :**

**Hematopoetik Sistem :** Radyasyona en duyarlı hücre lenfosit, 25 Rad'lık bir ışınlamada bile, önce lökosit sayısında bir azalma, bir kaç gün sonra yavaş yavaş çoğalma görülür.

Trombositler daha dirençli, ancak 2. hafta sonunda kemik iliğinde yapımları aksadığından, minimum düzeydedir.

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

Plazma radyasyon etkisine dirençlidir.

Lökositlerin ışınlanması vücut direncini düşürür, enfeksiyona yatkınlık gelişir.

Trombosit hasarı pıhtılaşmayı bozar.

**Kemik iliğinde radyasyon etkisi;** 3 dönemde ortaya çıkar.

İnhibisyon, bir kaç günde başlar, bir kaç hafta sürer.

Hiperplazi, 4-6 hafta sonra başlar,

Lösemilerin 5 - 8 yıllık latent periyodu vardır.

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

Dalakta mitotik aktivite durur, timusun aktivitesi bozular.

Lenf bezlerinde fonksiyonel ve morfolojik anomaliler görülür.

**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. Gebelikte radyasyona en duyarlı dönem 18. - 45. günlerdir.

### **Fetal Radyasyon Riski**

Fetus, proliferatif bir sistemdir ve bir çok differansiye olmamış hücresi vardır, bu nedenle radyasyon etkilerine aşırı duyarlıdır. Embriyonal dokuların radyasyon toleransı, ortalama 25 Rad (0.25 Gy) olarak kabul edilir. Kromozom anomalileri ve embriyonal hücrelerin ölümü ile çeşitli klinik anomaliler oluşur. Risk, gebeliğin dönemi ve absorbe edilen doza bağlıdır.

Intrauterin 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 Nagazaki' de gebeliğin erken dönemlerinde radyasyona maruz kalan çocuklarda mikrosefali ve mental retardasyon en yaygın anomaliler olarak bulunmuştur.

Diğerleri ise düşük doğum ağırlığı, katarakt, genital ve iskeletsel bozukluklar, mikroftalmidir.

6. embriyonal haftadan sonra (Organogenesis sonrası) etkiler doğum sonrası etkilere benzer, organ düzeyinden çok doku ve hücre düzeyindedir, bu yüzden, büyük konjenital anomaliler beklenmez.

6. haftadan doğuma kadar olan dönemde radyasyona bağlı santral sinir sisteminde hasar sonucu düşük gelişebilir veya yaşam boyu genel gelişme geriliği görülür.

Dental radyolojide full-mouth incelemede kurşun önlük giyilince fetusun maruz kaldığı doz ortalama 0,25µGy' dir ve fetus için tanımlanan anomali dozundan oldukça düşüktür.

**Gastrointestinal Sistem** : Mukoza epiteli radyasyona oldukça duyarlıdır. İlk değişiklikler ince barsak epitelinde görülür. 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.

**Deri :** Zararın gözle görülebildiği ilk dokudur. Yüksek hücre bölünme hızı ve ışınlanma derecesi nedeniyle, epiderminin 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, telangiektazi (damar yapısının bozulması, damarlarda yer yer genişlemeler..)

olur. Radyoaktif materyal içeren şişe veya enjektörler, zırhlanmamış olarak elle tutulursa, kısa sürede deride eritem için eşik doza ulaşılır.

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

**Göz :** Radyasyona en duyarlı bölümü lens . Gecikmiş radyasyon etkisi olarak katarakt meydana gelir. ICRP (2011), göz lensi için eşik dozu 0.5 Gy. olarak belirlemiştir.

2 Gy'in üstünde lenste protein koagülasyonu .

2.5-6.5 Gy.lik tek doz için 2-35 yıl (ortalama 8 yıl) latent period.

2-5 Gy.lik tek dozda veya 10 Gy kümülatif dozda katarakt gelişebilir.

**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.

**Kemiklerde Radyasyon Etkileri :** Gelişmekte olan kemik ve kıkırdak dokusu radyasyona duyarlıdır. Çocuklarda epifiz kıkırdağı 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 kıkırdak 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 :** Radyasyona maruz kalan kemik hücrelerinde kan dolaşımı bozukluğu sonucu beslenme olmaz. Burada bir dış çekimi veya başka bir travmaya bağlı olarak osteoradyonekroz gelişir. Oluşması için ;

Kemik doku radyasyona maruz kalmalı,

Doz, damar endotelini etkileyecek miktarda olmalı,

Bölgede mukoza bütünlüğünü bozacak travmatik bir durum oluşmalı (dış çekimi, cerrahi, protez vuruğu, periodontal yıkım..)

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.

**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 ağzında kendisinin tutması sonucu el ve parmaklarda radyodermatit, çeşitli tırnak bozuklukları, karsinomalar görülebilir. Bu nedenle hasta mutlaka filmi kendisi ağzında 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, stomatit, 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 mikrofloranın 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 :** Erişkin dişler direkt etkiye dirençli, tükürükteki değişikliklere bağlı etkilenme olur. İntrauterin yaşamda ve çocuklarda gelişmekte olan dişlerde, maruz kalınan döneme, doza göre malformasyonlar, gelişimin durması, sürme ve kök gelişimi gecikmeleri, mine ve

dentinde bozukluk, kromda defektler, pulpada kanama, hiperemi, ödem, çok ince veya kısa kökler.

**Çiğneme kasları** Doza ve bölgeye bağlı, trismusla sonuçlanan enflamasyon, fibrozis

### **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.

Önce dişte renk değişikliği, parlak ve düz mine, mat-gri renk alır, bu renk kirli sarıya, kahverengi ve siyaha dönüşür. Diş kolesinde çürüğe benzer lokalize ve yüzeysel lezyonlar oluşur, koleyi tamamen sararak diğer yüzeylere yayılır.

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 hiç bir zaman ara yüzden başlamazlar.