

YONLA TIRICI RADYASYONLARIN B YOLOJ K **ETK LE ME MEKAN ZMALARI**

Ahmet Cangüzel Taner

Fizik Yüksek Mühendisi

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (acant@taek.gov.tr)

G R

yonla tırıcı radyasyonların biyolojik etkileri; fizik, kimya ve biyoloji temel bilimlerle, tıp ve mühendisliklere kadar uzanan uygulama alanlarında faaliyet gösteren çok önemli bilim dallarını da kapsayacak şekilde, geniş bir bilim sahasını içine almaktadır. Yonla tırıcı radyasyonlar; üzerlerinde bulunan enerjilerini dokulara aktarmak suretiyle onlara zarar verebilmekte, yüksek dozdaki zararlar, ölüm, nesilden nesile geçen genetik etkiler, bir bakıma deyimle, kuantal kuantaya geçen kusurlar veya kanser gibi daha sonra ortaya çıkan habis hastalıklar şeklinde olabilmektedir. Yüz ile bin rem veya rad mertebesinde alınan dozlardan sonraki ani iddetli (akut-ivegen) etkiler, sadece atom bombası kurbanları ile az sayıdaki nükleer yada radyolojik kazaların bir sonucu olarak gözlenmektedir. Yazıda; radyasyon veya ıın sözcükleri ifade edildiğinde “iyonla tırıcı radyasyon” kastedilmektedir. Kanserler, II. Dünya savaşında Hiroshima ve Nagasaki’ye atılan atom bombaları kazazedelerinde, az sayıdaki nükleer kazalarda iyonla tırıcı radyasyonlara maruz kalan kişilerde, 10 ila 100 rem arasında radyasyon yada ıın tedavisi gören onkoloji hastalarında ve sanayide radyografi filmleri çekiminde vukubulan kazalarda yüksek düzeyde ıınlanan kişilerde izlenmektedir. Böyle ıınlanmaların sonucu oluşacak olan kanserlerin gelişme olasılıkları rasgele olmayıp, son varsayımlar tüm vücut ıınlanmaları için, rem başına milyonda yaklaşık 125 öldürücü kanser olayı ile tutarlılık sağlamaktadır. Radyasyonla nesilden nesile geçen etkiler, diğer bir deyimle, genetik etkiler, belirli bir doz düzeyinde insanda gözlenmemektedir. Bu gibi etkilerin tahminleri, deney hayvanları üzerinde yapılan çalışmaları baz alınarak yapılmakta, böyle yapılan değerlendirilmeler de, oldukça belirsizliklere neden olmaktadır. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (**I**nternational **C**ommission on **R**adiological **P**rotection-ICRP) tarafından nesilden nesile geçtiği varsayılan riskin en son boyutu; ömür boyunca tüm

vücut ınlanmalarında, canlı do an bebeklerin gelecek tüm ku aklarında, rem ba ına milyonda 80 genetik bozukluk eklindedir. Di er varsayımlar 5 faktörlü bir belirsizlikle ifade edilebilmekle beraber, atom bombası kazazedelerinin çocuklarında nesilden nesile geçen zararlarda herhangi bir ipucunun olmaması nedeni ile, en alt düzeyde öngörüde bulunan ICRP sayısına güvenmek olası de ildir. Yılda 100 mrem ile rem mertebesinde, nükleer sanayide çalı an i çiler tarafından alınan radyasyon dozlarından olu an zararlı etkileri aç ı a çıkaran güvenilir bir gözlem yoktur. Radyolojik korunma amaçları için dü ük doz etkileri; etkilerin önemli oldu u ve bu nedenle ihmal edilemedi i, e ik de eri olan, yüksek doz etkilerinin lineer ekstrapolasyonu göz önüne alınarak önceden tahmin edilebilir. Dü ük doz düzeylerinde ınlanmanın gerçekçi varsayımları dü ünülerek, bu temele dayalı ekilde üretilen tüm etkiler için risk katsayıları, ICRP tarafından saptanmaktadır. Bu görü ; genellikle, radyasyonun tüm türleri için, ku aktan ku a a geçen tehlikeler ile, nötron, proton, alfa ve di er a ır parçacıklarla ınlanmalardan ileri gelen kanser tehlikeleri için benimsenmektedir. Bununla beraber; X-ı ınları, gama ı ınları ve elektronlardan ileri gelen kanser tehlikeleri (riskleri) için, beklenenin çok üstündeki risk katsayıları kabul edilerek, derinli ine bilimsel ara tırmalar yapılmaktadır.

RADYASYONUN ETK LE ME MEKAN ZMALARİ

Temel olay, madde ile etkile en iyonla tırıcı radyasyonun enerjisini kaybetmesi ile olu maktadır. Çarpı malarla, iyonla tırıcı radyasyon tarafından kaybedilen enerji, radyasyonun geçti i madde içerisinde uyarma ve iyonla ma enerjisi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu i lem, biyolojik madde durumunda, organizmanın daha sonraki geli imini etkileyebilen moleküllerin, yeniden düzenlenmesi eklinde olmaktadır. Moleküler de i iklik; ya radyasyonun kendisi ile do rudan do ruya ya da yakın moleküllerle etkile melerin ve daha sonra vuku bulan ikincil i lemlerin bir sonucu olarak geli ebilmektedir. Tüm moleküller radyasyondan zarar görebilmekte olup, etkile meler son derece karma ık olmakla beraber, ya ayan madde içinde hücrenin bölünmesi ve geli imi ile ilgili genetik bilgileri ta ıyan DNA makro molekülleri en olası hedeflerdir. Radyasyon DNA molekülünün küçük bölümünü (örne in bir tek geni) veya ta ınan

bilginin bir kısmını tahrip ederek yada de i tirerek, bir veya pek çok yerinde, DNA'nın tek yada iki ba ını kırabilir. Zarar; çok defa onarılabilmeyle birlikte, bazı durumlarda, hücrenin ölümü veya ekil de i tirmesi tarzında izlenebilir. Ölen hücreler, normal olarak organizma tarafından so urulur veya reddedilir. Bununla beraber, öldürülen hücrelerin sayısı yeteri dereceye ula tı ında ise, organizmanın fonksiyonlarını etkilemek sureti ile onu öldürebilmektedir. Hücre de i imleri veya ekil de i iklikleri mutlaka organizmada zararlı etkiler olu turmamakta, gerçekte bu gibi çok sayıda hücreyel de i imler, organizmanın ya amı boyunca normal olarak meydana gelmektedir. Çok az sayıda kanser veya üreme ile ilgili hücreler olması halinde, daha sonraki ku aklarda, genetik hasar olarak ortaya çıkabilmektedir. Radyasyonla ı ınlanma sonucu izlenen kanser olu umu ve di er hücrelerin ekil de i tirmesi ile ilgili insan ve hayvanlar üzerindeki çalı malar hakkında, oldukça bariz ip uçları bulunmaktadır. nsan üzerindeki bulgular; Hiroshima ve Nagasaki bomba kurbanlarındaki çalı malardan, tıbbi amaçlarla radyasyon dozu alan hastalardan, radyasyonla yüksek düzeylerde ı ınlanan az sayıdaki (özellikle radyum saatleri onaran ve yetersiz havalandırılmalı madenlerde çalı an) i çiler üzerinden olu turulmu tur. Konu hakkındaki bilimsel incelemeler, insan üzerinde radyasyonun etkilerinin varolan ip uçları ile, muhtemel dü ük düzeyli tesirleri üzerinde yapılmı öngörülere dayandırılmaktadır.

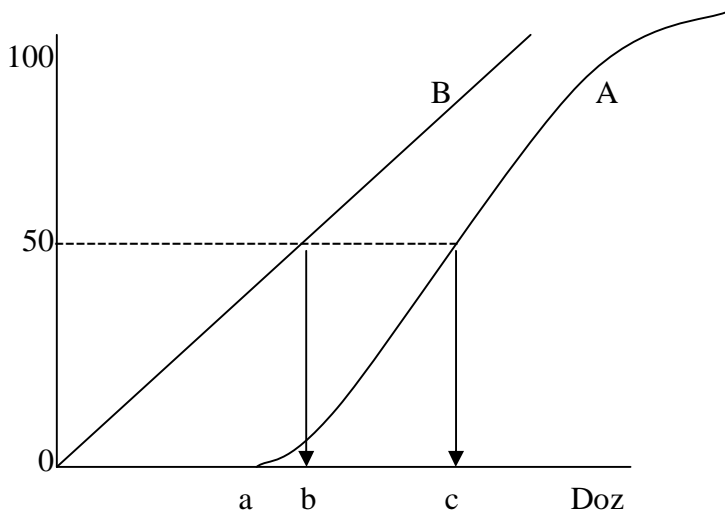
yonla tırıcı radyasyonların biyolojik etkileri; yaygın ekilde istatistiksel (e iksiz-olasılıklı-linear) etkiler ve istatistiksel olmayan (e ikli-kesin-linear olmayan) etkiler olmak üzere, iki ekilde incelenmektedir. statistiksel (e iksiz-linear) etkilere; kanser ve nesilden nesile intikal eden genetik mütasyonlar, istatistiksel olmayan; bir ba ka deyi le, e ikli veya somut etkilere de, deri kızarıklıkları yada saç dökülmeleri, örnek olarak verilebilmektedir.

Yapılan deneyler ve eldeki verilerle doz-yanıt veya doz-etki e rilerinin saptanmasında; %50'lik doz, ı ınlanmı deney hayvanlarının %50'sinden elde edilen istatistiksel veriler, en güvenilir sonuçlar olarak ifade edilmektedir. Yukarıda ifade edilenden dolayı, %50'lik doz, belirli bir etkinin izah edilmesinde, oranlı etkinli in göstergesi ekinde dü ünülmektedir.

Deney hayvanlarında görülen etki ölümle sonuçlandı ında, %50'lik doz, ba ka bir deyi le, 1 ınlanan 100 deney hayvanının en az 50 sinin ölmesi için gerekli olan doz, LD-50 (**L**ethal **D**ose: Öldürücü Doz) olarak gösterilmektedir. Di er taraftan, ölümün olu tu u zaman da ehemmiyetli oldu undan, dozla beraber ifade edilmektedir. Yukarıda belirtilen ifade, LD-50/30 gün doz olarak tanımlanmakta olup, bu tanım veya gösterim, geni bir ekilde kullanılmaktadır.

ekilde gösterilen A e risi; a e ik dozu ile ba layan bir biyolojik etkinin karakteristik ekli olup, iyonla tırıcı radyasyonların istatistiksel olmayan (e ikli-kesin-lineer olmayan) etkilerini temsil etmektedir. B e risi ise, iyonla tırıcı radyasyonların istatistiksel (e iksiz-olasılıklı-lineer) etkilerine örnek te kil etmektedir. E ikli etkiyi temsil eden A e risinde %50'lik etkinin olu tu u doz c ; ve e iksiz etkiyi gösteren B e risinde ise %50'lik etkinin olu tu u doz b olarak görülmektedir. Grafikten izlendi i gibi, e ikli doz e risi, yana yatmı bir S eklinde ortaya çıkmaktadır. %50'lik etkinin olu abilmesi için gerekli olan e ikli dozun (c'nin), aynı etkinin meydana gelebilmesi için e iksiz dozun (b'nin) 1.5 katı oldu u, bir ba ka deyi le, her iki e rinin izdü ümleri olan c'nin b'den büyüklü ü açıkça gözlenmektedir.

Yüzde
cinsinden
yanıt veya etki



E iksiz, di er bir deyimle, lineer dozlu radyasyon etkisinde (B e risi); iyonla ma,uyarma ve bunları izleyen molekül çözülmesi ile do rudan

do ruya hasar olu tu u varsayılmaktadır. Bir tek genin de i iminde hasıl olan en küçük mütasyonlar, böyle etkinin gözlenebilmesi için, iyi bir örnek te kil etmektedir. DNA molekülündeki bir atomda iyonla ma veya uyarma ile meydana gelen çözülme, bir genin ihtiva etti i bilginin gelecek nesile aktarılmasını önler. Bu gibi en az düzeydeki bir de i im, gelecek ku a a en küçük bir mütasyonu geçirebilir veya olu um hücresindeki bir mütasyonla somatik hücrelerde görülebilir. Mütasyona u ramı genin ba ka sebeplerle de i ime u ramadı 1, ve de, en küçük mutasyonların gelecek nesillere aktarıldı mını varsayarsak, çok dü ük düzeyli radyasyon dozu bile, yapıda bir de i iklik olu turabilir. Bu olayın sayısal olarak açıklanabilmesi için, 1 mlanan ki ilerin ku aklarında, genetik de i imin, istatistiksel olarak gözlenmesi gerekmektedir. 250 mGy (25 rad) üzerinde genetik mütasyonların görülmesi dozla orantılıdır. 250 mGy'in altında deney hayvanları üzerinde yapılan yo un çalı malarda, iyonla tırıcı radyasyondan ileri gelen bir mütasyon görülmemi tir. Bu nedenledir ki, 0-250 mGy arasında genetik de i imler hakkında, güvenilir deneysel veriler bulunmamaktadır.

yonla tırıcı radyasyonların derinli ine etkilerini anlayabilmek ve ayrıca da kanser tedavilerinde nasıl kullanıldı na açıklık getirebilmek için, hücre yapılarındaki moleküllerle **direkt** ve **dolaylı etki**, bir ba ka deyi le, **kimyasal etkile me** mekanizmalarının izah edilmesi gerekmektedir.

Direkt Etki: Yüksek dozda iyonla tırıcı radyasyonlara maruz kalınması sonucu ortaya çıkan biyolojik etkiler, organizma içindeki birkaç molekülün iyonla ma veya uyarılması ile, uzun ve karma ık bir olaylar dizisi ekinde meydana gelmektedir. Örne in, bir ki inin öldürücü olan LD-50/30 gün dozda yakla ık 4 Gy'lik (400 rad'lık) gama 1 mını ile 1 mlandı mını dü ünelim. 1 Gy'lik 1 mlama için 1 J/kg (6.25×10^{18} eV/kg) (J = Joule; metrik sistemde enerji birimidir.) ve tek bir iyonla ma için 34 eV'luk enerji harcandı ndan, dokunun kilogramında olu an doz, aynı zamanda dokuda kilogram ba ma meydana gelen iyon sayısı;

$$\frac{4 \text{ Gy} \times 6.25 \times 10^{18} \text{ eV kg}^{-1} \text{ Gy}^{-1}}{34 \text{ eV/iyon}}$$

$$= 7.35 \times 10^{17} \text{ iyon/kg} \text{ olmaktadır.}$$

Herbir iyonla ma için, hemen hemen di er dokuz atomun da uyarıldı nı varsayarsak, öldürücü iyonla tırıcı radyasyon dozu ile direkt yada do rudan do ruya etkilenmi dokuların kilogramı ba na atomların sayısı takribi 7.35×10^{18} atom/kg olarak bulunur. Yumu ak dokudaki atom sayısı 9.5×10^{25} atom/kg dır. Böylece direkt etkilenen atomların kesri,

$$\frac{7.35 \times 10^{18}}{9.5 \times 10^{25}} \\ = 1 \times 10^{-7}$$

bir ba ka deyimle, yakla ık 10 milyonda 1 atomun etkilendi i hesaplanabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken, gözönüne alınan dokuda, etkilenen atomların hemen hemen olmamasıdır. Bu durum ise, iyonla tırıcı radyasyonun direkt etkisine kar ı, dokularda bulunan hücrelerin direnç göstererek ölmediklerini i aret etmektedir. Hücreler; iyonla tırıcı radyasyonun direkt tesirini bertaraf edebilmekle beraber, dolaylı etkisine (kimyasal etkisine) kar ı direnç veya dayanma gücü gösterememektedir. Böylece, tıpta iyonla tırıcı radyasyonların yo un ekilde kullanılmalarına olanak sa lanarak, özellikle de Nükleer Tıp ve Onkoloji Ana Bilim Dallarında, kanserli hücrelerin yok edilmeleri sureti ile, onkoloji yada kanser hastalarının iyile tirilmesine, bu yolla bir imkan temin edilmektedir.

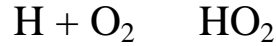
Dolaylı (Kimyasal) Etki: Radyasyonun direkt etkisi iyonla ma ve uyarma ekinde insan vücudunun herhangi bir yerinde olu abilir. Hücre asidindeki bir molekül veya protein molekülündeki atomda, do rudan do ruya belirli etkiler izlenebilir. Vücudun büyük bir kısmının, yakla ık %70'nin su olması nedeniyle, radyasyonun do rudan etkile mesi, yüksek bir olasılıkla su ile olmaktadır. Suyun enerjii so urması sonucunda, kimyasal olarak serbest radikaller olu mak sureti ile, di er moleküllerin bozulmasına sebep olunmaktadır.

Saf su ı inlandı nda, H^+ ve OH^- iyonları olu ur. Aslında bunlar, ı nlanmadan önce de, vücut içinde bulunmaktadır. H ve OH serbest radikalleri, di er serbest radikaller ile birle ebilir veya di er moleküllerle etkile ebilir. Bunların en muhtemel durumları, radyasyonun **lineer enerji transferi (LET)** ile açıklanabilmektedir.

Lineer enerji transferi yüksek oranda oldu u takdirde, özellikle alfa parçacıkları için, serbest OH radikalleri, H radikalleri ile tekrar biraraya gelmeden, kendi aralarında birle erek,



eklinde hidrojenperoksit moleküllerini olu tururlar. Bu arada, serbest H radikalleri de birle erek, hidrojen gazını meydana getirirler. Bu reaksiyonların olu umları ve nispeten kararlı hidrojenperoksitin meydana gelmesi, mikrosaniye mertebesindedir. Lakin, bu birle ik meydana geldi i yerden daha uzak yerlere gitmemektedir. I ınlanmı su çözülmü oksijen ihtiva ederse, serbest hidrojen radikali oksijen ile birle erek,



tepkisel yada reaktif etki olu turmayan ve serbest OH radikaline göre daha uzun ömürlü olan, hidrojenperoksit radikalini meydana getirir. Bu ekilde, daha büyük kararlılıkla, hidrojenperoksit radikali, serbest hidrojen radikali ile birle mek sureti ile, radyasyonun etkisini önemli ölçüde artıracak olan ve son derece yüksek oksitleme özelli ine sahip, hidrojenperoksiti olu turur. Hidrojenperoksit meydana geldi i yerdeki hücrelerin etrafını oksitleyerek, o bölgede bulunan dokuların veya hücrelerin beslenmesini engellemektedir. Böylece beslenemeyen ve di er organlardan yalıtılan dokuların yada hücrelerin ölmesine neden olunmaktadır. Oksitleme özelli ine sahip hidrojenperoksit sadece o bölgede kalmakta, ba ka bir yere gitmemektedir. **te iyonla tırıcı radyasyonların dolaylı (kimyasal) etkisi ile olu an hidrojenperoksitin bu çok önemli özelli i nedeni ile, söz konusu ı mların günümüzde kanser tedavisinin ehemmiyetli unsurlarından biri olan Radyoterapi'de (ı m tedavisinde) kullanımlarına olanak sa lanmaktadır.** imdiye kadar, iyonla mayı ve uyarılmayı müteakip moleküllerin ayrı ması eklinde **direkt etki** ile, vücut içindeki suyun serbest radikaller ve hidrojenperoksit olu ması eklindeki **indirekt (kimyasal) etki** olarak, iyonla tırıcı radyasyonların biyolojik etkileri iki mekanizma gözönüne alınarak incelenmi tir.

I- yonla tırıcı Radyasyonların Biyolojik Etkilerine Tesir Eden

Faktörler: yonla tırıcı radyasyonla etkile me; radyasyonun karakteristi ine, bir ba ka deyimle, enerji, iddet ve içeri ine; ı nlanan dokunun yapısı ile radyasyona maruz kalan ki inin ya ı, cinsiyeti, ve de, genel sa lık durumu gibi hedefin karakteristiklerine ba lıdır.

a) Radyasyonun Karakteristikleri

Radyasyonun biyolojik maddeye zarar verme yetene i, genel anlamda dokuya geçirilen enerjinin etkinli i ile orantılıdır. Parçacıkların enerji kaybetme ekli, parçacı ın tipine ve enerjisine ba lıdır. Proton, nötron ve alfa () gibi a ır parçacıklar, aynı enerjili gama () ve beta () parçacıklarından daha kısa uzaklıklarda enerjilerini kaybederler. Parçacı ın birim yolda kaybetti i ortalama enerji, **linear enerji transferi** veya LET olarak adlandırılır. Radyasyonla hedefin birim kütlesine geçirilen enerji, absorblanmı (so urulmu) doz (D) olarak ifade edilir. Absorblanmı doz birimi “rad” dır. Rad (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose); absorblanmı doz birimi $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$ dir. Rad; daha ziyade hayvanlar için kullanılmakta olup, insanlarda rad yerine yaygın kullanım rem (**r**oentgen **e**quivalent **m**an) olup, “röntgenin insan için doz e de eri” ekinde ifade edilmektedir. Uluslararası birim sisteminde yani SI birimlerinde doz birimi yine ço unlukla hayvanlar için gray (Gy) ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$) $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ ve insanlar için doz e de eri sievert kullanılmakta olup, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ rem}$ dir.

Absorblanan doz, parçacı ın yava latıldı ı yol boyunca sürekli olarak de i ir. Buna ilaveten doku da, parçacı ın yolu boyunca olu an ikincil parçacıklarla ı nlanır. Böylece, absorblanmı dozu de erlendirmek oldukça kolay olmasına ra men, radyasyonla ı nlanmanın toplam etkisinin tam bir tanımının yapılabilmesi, radyasyonun tipinin ve ı nlama ko ullarının tüm olarak bilinmesini gerektirir.

Radyolojik korunma amaçlarında, radyasyonun çe itli tiplerinin farklı biyolojik etkinliklerini hesaba katmak için, Q kalite faktörünü

kullanmak, yeteri derecede doz ruluk sa lamaktadır. Kalite faktörü ile absorblanmı dozun çarpımı, doz e de eri olarak adlandırılmaktadır. Daha öncede ifade edildi i gibi, doz e de eri birimi rem veya Sv olup, $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Jkg}^{-1} = 10^{-2} \text{ Sv}$ 'dir.

$H (\text{rem}) = D (\text{rad}) \times Q$ olarak ifade edilmektedir. Q'nun de erleri, çe itli radyasyon türleri için a a ıdaki Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Q Kalite Faktörleri

Radyasyon tipi	Q
X-1 ınları, β ınları ve elektronlar	1
Termal veya yava nötronlar	2
Hızlı nötronlar	10
Protonlar ve tek yüklü a ır parçacıklar	10
α parçacıkları ve a ır yüklü parçacıklar	20

Doz e de eri; radyasyonun gecikmi etkilere neden oldu u varsayıldı ı radyolojik korunma uygulamaları ile sınırlıdır. Bu kavram, radyasyonun farklı tiplerinin biyolojik etkilerinin ayrı ayrı olabildi i, yüksek düzeyli kaza ı ınlamalarının sonuçları incelendi inde kullanılmamakta olup, o zaman uygun birim olan rad göz önüne alınmaktadır. Radyasyon dozunun saptanmasında önemli bir faktör de doz hızıdır. Yüksek dozlarda elde edilen radyolojik veriler, onarım veya yeniden olu umda, radyasyonun neden oldu u zararın aynı hızda olamadı ını göstermektedir. Kısa sürede onarılamayan derecede zarar veren radyasyon dozu, belirli bir zaman sürecine yayıldı ı takdirde, ço u kez hücre veya organizmanın ya amını devam ettirebilmesini sa lamaktadır. Öte yandan, fareler üzerinde yapılan bir deneyde, yüzlerce deney hayvanı mutlak öldürücü olan 10 Gy'lik (1000 rad'lık) çok yüksek radyasyon dozları ile ı ınlanmı lardır. Bunlardan farklı olarak da yine yüzlerce fare, sadece kuyrukları hiç radyasyon almayacak ekilde zırhlanarak aynı öldürücü radyasyon dozlarına maruz bırakılmı lardır. Kuyrukları zırhlanarak ı ınlanan farelerin ortalama ömürlerinde (life expectancy), tümü ile ı ınlanan farelerin ortalama ömürlerine nazaran ortalama ya am

sürelerinde çok az da olsa bir artı gözlenmiştir. Bunun nedeni, kuyrukları zırhlanmış olan farelerin bu kısmında bulunan radyasyondan etkilenmemiş hücrelerin bir dereceye kadar, diğer öldürücü doza maruz kalmış hücrelerine, belirli zaman süresince onarımlarında katkı yapmalarından kaynaklanmaktadır. Bu durum da canlı organizmaların radyasyona karşı büyük bir direnç gösterdiğini işaret etmektedir. Ayrıca, doku üzerinde oluşan lezyonlar da bu direncin bir göstergesidir.

b) Hedefin Karakteristikleri:

Dokuların farklı tipleri radyasyona karşı ayrı ayrı duyarlılıklar göstermektedir. Sık sık bölünen, örneğin kemik iliği içindeki kan yapan hücreler; arasıra bölünen, örneğin, bağı ve ya dokusu hücrelerine nazaran, radyasyondan daha fazla etkilenmektedir. Metabolik faktörler, örneğin 1 inlanan hacimdeki oksijen konsantrasyonu da ayrıca önemlidir. sonuç olarak bunlardan bağı, ya, cinsiyet ve bir noktaya kadar da organizmanın sağlıklı, radyasyonun yapabileceği zarara bir dereceye kadar etki etmektedir.

Yukarıda anlatılan faktörlerin ayrıntılı çalışmaları, radyobiyoloji konusunun içine girmektedir. Uygulamada, vücut içerisindeki doku dozlarını ölçmek veya hassas olarak bu dozların sonuçlarını önceden saptamak, oldukça zordur. Bu nedenle, radyolojik korunma amaçları ve insan üzerinde nükleer enerjiden oluşan etkilerin değerlendirilmesi için, basitleştirilmiş bir yaklaşım kullanılmaktadır. Vücudun belli yerlerinde absorblanmış dozun tahmini; hedeflenen 1 inlama alanının bilinmesi ve vücut tarafından sindirilen yada solunan radyoaktif madde miktarı ile, radyoizotopun tahminası ve absorpsiyonunun bir model ekinde göz önüne alınması sayesinde ortaya çıkarılmaktadır. Bu modellerin düzenlenmesi amacıyla, ICRP tarafından ortalama referans insan tanımlanmıştır. Genelde, bu ekinde gözlenen radyasyon absorpsiyonunun en son sonuçları, gerçek 1 inlanma ile ilgili olabilmektedir. Daha fazla bir basitleştirme, 1977'de ICRP tarafından ortaya atılmıştır. Doz eğerinde önerilen sınırlamalar, tüm vücudun düzenli 1 inlanmasına göre oluşturulmaktadır. Belirli dokular için ayrı ayrı faktörleri göz önüne alınarak, vücudun bir veya daha fazla

kısının 1 inlanması, tüm vücut 1 inlanması e de erine göre ifade edilebilmektedir. Tüm vücut doz e de eri H_{wb}

$$H_{wb} = \sum_T W_T H_T \text{ ba ntısı ile verilmektedir}$$

H_T : T dokusunun doz e de eri

W_T : T dokusu için a ırlık faktörü

W_T dokuların a ırlık faktörleri de erleri Tablo 2’de verilmektedir.

Toplama i lemi T (Doku-Tissue) üzerinden, di er bir deyimle, tüm dokular göz önüne alınmak sureti ile yapılmaktadır. Doz hesaplamalarında ICRP, ortalama vücut a ırlığını 70 kg olarak almaktadır. Di er taraftan, örne in, Japonların ortalama a ırlıkları 60 kg’dır. Bu durumda, ICRP a ırlık faktörleri uygulanırken, ülkelere göre de i ebilen, ortalama vücut a ırlıklarında ve buna ba lı a ırlık faktörlerinde, mutlaka düzeltmeler yapılmalıdır.

Tablo 2: A ırlık Faktörleri

<u>Doku</u>	<u>W_T</u>
Gonadlar.....	0.25
Gö üs.....	0.15
Kırmızı kemik ili i.....	0.12
Akci er.....	0.12
Tiroit.....	0.03
Kemik yüzeyleri.....	0.03
Di erleri.....	0.30

II- Radyasyona Maruz Kalma veya I nlanma:

Di er çevre kirleticilerinde oldu u gibi, radyasyonda da iki tip maruz kalma (1 inlanma) gözönüne alınmaktadır.

Kazaen, kısa sürede bir defada yüksek dozda radyasyona maruz kalma: I nlanmadan çok kısa süre sonra biyolojik etkiler meydana getiren bu durum, **“akut 1 inlanma”** olarak adlandırılır. Bir ba ka deyi le, 0.1Gy(10 rad) ila 10 Gy(1000 rad) arasında oldukça yüksek

dozlardaki ı nlanmalar; ay, hafta, gün hatta saat gibi çok kısa sürede olu an ani iddetli (akut-ivegen) etkilere veya yıllar sonra ortaya çıkabilen gecikmi etkilere neden olabilmektedir. Bunlardan ayrı olarak, deri yanıkları, radyolojik uygulamaların ba langıcında görülmü tür. Genellikle, bu gibi iddetli etkiler için, etkilerin önemli oldu u, etkin bir e ik de eri gösteren ve üphesiz ölüm oranı yüzde yüze yakla tı ında düzle en, lineer olmayan (e ikli) doz-yanıt e risi kabul edilmektedir. 3-3.5 Gy'lik (300-350 rad'lık) tüm vücut ı nlanması için, tıbbi müdahale olmadı ı taktirde, %50 ölüm meydana gelebilmekte, tedavi ile 5 Gy'de (500 rad'da) %50 ölüm oranı görülebilmektedir. Ölüm; normal olarak hafta mertebesinde olu makta, çok daha yüksek dozlarda saat düzeyinde de ölüm gözlenebilmektedir. Hemen ortaya çıkabilen ölümler 1 Gy'in (100 rad'ın) altındaki dozlarda olmamakta, 10 Gy'in (1000 rad'ın) üzerinde ölüm mutlaka gerçekleşmektedir. Bununla beraber, radyasyonun dolaylı (kimyasal) etkisinin hücreleri öldürme niteli i, radyoterapinin temel uygulamalarını olu turan onlarca gray (binlerce rad) mertebesindeki dozlar, seanslar halinde, hem belirli bir zamana yayılarak hem de radyasyon belli bir yere yani habis tümörlere yönlendirilerek, ve de, di er doku ve organlar da radyasyona kar ı çok iyi zırlama malzemesi olan kur unlarla korunacak biçimde, kanserli hücreler yok edilerek büyümeleri önlenmek suretiyle, onkoloji hastalarının tedavisi yapılmaktadır.

Di er taraftan, tüm vücudun akut olarak fazla ı nlanması, organ ve doku sistemlerin hepsine etki eder. Bununla birlikte, radyasyona maruz kalmı ki ilerde, organ ve dokuların radyasyona kar ı duyarlılı ının aynı olmaması sebebiyle, etkinin veya hastalık belirtisinin ortaya çıkması, dozun büyüklü üne ba lı olmaktadır. Sınıflandırmayı daha basitle tirmek için, akut radyasyon belirtisi, tehlikenin derecesine göre üç sınıfa ayrılabilir:

1. Kan yapıcı sistemdeki belirti,
2. Sindirim sistemindeki belirti,
3. Merkezi sinir sistemindeki belirti.

Bunların üçünde de ortak görülen etkiler:

- a) Mide bulantısı ve kusma,
- b) Kırıklık ve yorgunluk,
- c) Yüksek ate ,

d) Kan tablosunun de i imi.

Bütün bunlara ilaveten, çok sayıda di er etkiler de gözlenmektedir.

Kan Tablosundaki De i im: Yukarıda a,b,c,d diye belirtilen dört de i ik etkiye göre, akut olarak ı nlanmanın en iyi belirtisi, kan sayımı ile ortaya çıkmaktadır. Di er üç belirtinin gözlenmedi i orta düzeyli ı nlanmalarda bile, kan sayımı bir fikir verebilmektedir.

140 mGy (14 rad) gama radyasyonu ile ı nlanmaya kadar kan de i imi görülebilmesine ra men, genellikle 250-500 mGy'lik (25-50 rad'lık) ı nlanmalarda, kan tablosunun de i imi gözlenmektedir. 500 mGy'in (50 rad'ın) üzerinde, kan de i imi kesin olarak ortaya çıkmaktadır. Kanın hacim olarak %55'ini plazma, hemen hemen %45'ini de çe itli elementlerden olu an lökosit olarak adlandırılan akyuvarlar ile eritrosit ve trombosit olarak adlandırılan alyuvarlar meydana getirmektedir. Yeti kinlerin kanında mm^3 de 7000'e kadar, akyuvarlar yada beyaz kan hücreleri bulunmakta olup, dı arıdan gelen mikroplara kar ı bir savunma görevi yapmaktadır. Herhangi bir enfeksiyon olu ması halinde, enfeksiyona sebep olan organizma ile mücadele etmek için, vücudun lökosit üretimi uyarılır. Lökositlerin ba lıca tipleri lenfositler ve granülositler olup, bunların her ikisinde belirli fonksiyonlarla enfeksiyona kar ı koymaktadır. Normal artlar altında, her ikisinin de akyuvarlara oranı takribi olarak sabit kalmaktadır. Granülositler, akyuvarların yakla ık % 70-75'ini, lenfositler ise, hemen hemen %25-30'unu olu turmaktadır. Granülositler kemik ili inde meydana gelmekte ve 3 gün içinde ölmektedir. Lenfositler; lenf bezlerinde ve dalakta olu urlar ve 24 saat süre ile görev yaparlar. Alyuvarlar da çok olarak bulunmakta ve kan içindeki konsantrasyonları mm^3 de 5 milyona kadar ula maktadır. Alyuvarların temel i levi, akci erlerdeki oksijeni vücut hücrelerine ve hücrelerde meydana gelen karbondioksit artı nını akci erlere ta ımaktır. Eritrositler; kemik ili inde olu urlar ve 90-120 gün kadar canlı kalırlar. Trombositlerin sayısı mm^3 de 200000-400000 arasında olup, kanın pıhtılaşmasını sa larlar, ilikte olu arak, 8-12 gün görev yaparlar.

Öldürücü radyasyon dozuna yakın akut ı nlanmadan sonra, granülositlerin sayısı a ırı derecede artar ve birkaç gün içinde

azalmaya ba layarak, iki hafta içinde minimum düzeye iner. Bunların sayısı, birkaç hafta ile birkaç ay içerisinde normale döner. Lenfositler; 1 inlanmadan sonra oldukça azalır ve bu durum, bir iki ay kadar devam eder. Radyasyonla 1 inlanma ile akyuvarların epeyce etkilenmelerine mukabil, alyuvarların takribi bir hafta sonra etkilenmeye ba ladıkları görülmektedir. Eritrositler sürekli azalarak, 1 ila 2 ay sonra minimum seviyeye dü erler. Müteakip birkaç hafta içinde biraz arttıkları gözlenmektedir. Trombositler, 1 inlanmadan sonra bir ay içinde minimum düzeye dü ecek ekilde, düzenli olarak azalır. Normale dönü meleri çok yavaş olup, birkaç aylık süreyi kapsayabilmektedir. Bütün bu durumlarda, kan de i iminin derecesi ve hızı, radyasyon dozunun bir fonksiyonudur.

Kan Yapıcı Sistemdeki Belirti: Bu durum, 2 Gy'lik (200 rad'lık) gama dozundan sonra ortaya çıkar. Hastalının belirtileri, fizyolojik de i iklikler eklinde olur. Hastalının ba langıcı ani olup, a ırın 1 inlanmadan birkaç saat sonra meydana gelen mide bulantısı ve kusma, görülen ilk belirtilerdir. Ortaya çıkan kırgınlık ve yorgunluk, alınan dozun büyüklü ünün bir ölçüsü de ildir. 1 inlanma sonrası iki üç hafta içinde, mutlaka saç dökülmesi görülür. Birkaç ay içerisinde de ölümle sonuçlanabilir. üphesiz üzerinde durulacak etkiler, kemik ili inde ve kanda olmaktadır. lik azalımı, 2 Gy'de (200 rad'da) görülmekte, 4-6 Gy'de (400-600 rad'da) ilik tamamen ortadan kalkmaktadır. li in tamamen yok olmasına ra men, fizyolojik etkiler nedeniyle ki i hayatını sürdürebilirse, ili in yeniden olu ması bazen söz konusu olabilir. 7 Gy (700 rad) veya daha yüksek dozdaki 1 inlanmalarda, kemik ili i tekrar onarılamayacak ekilde yok olmakta, insan dahil ço u memelilerde LD-50/30 gün dozuna e de er bir hasar meydana gelmektedir. Lökosit için mm^3 de 500 veya daha az bir sayım, 1 inlanmadan birkaç gün sonra ölümün meydana gelece ine i aret etmektedir.

Sindirim Sistemindeki Belirti: Bu hastalının belirtisi, 10 Gy'lik (1000 rad'lık) tüm vücut 1 inlanması sonucunda olur ve barsak mukozasının pul pul döküldü ü gözlenir. Kan yapıcı sistemlerdeki belirtilere ilave olarak, ciddi ekilde mide bulantısı, kusma ve ishal, 1 inlanmadan hemen sonra ba lar. Ölüm bir iki hafta içinde vuku bulmaktadır.

Merkezi Sinir Sistemindeki Belirti: Toplam 20 Gy (2000 rad) veya daha fazla tüm vücut ı nlanması, organların tamamı ile birlikte, merkezi sinir sistemine de zarar vermektedir. ı nlanmadan birkaç dakika sonra bilinç kaybı ortaya çıkar. Birkaç gün, hatta birkaç saat içinde ölüm vuku bulur. Bilinç kaybı do rudan do ruya dozla orantılıdır. 200 mikrosaniyede 44 Gy'lik (4400 rad'lık) ortalama toplam doza maruz kalmı ki ide, 30 saniye içinde vücudun dengesinde bozukluk ve a kınlık, 10 dakika sonra da bilinç kaybı ve ok hali olu ur. Kazadan 35 dakika sonra, sindirim sistemi devreden çıkar. Yo un tedavi yöntemleri ile, hasta ancak 34-35 saat kadar ya atılabilir.

Di er Akut Etkiler: Yüksek dozda ı nlanmadan sonra, hemen olu an çe itli etkiler gözlenmektedir. Özellikle yeri sebebiyle deri; beta ve dü ük enerjili X ı nlarına kar ı daha duyarlı olmaktadır. Dü ük enerjili te his amaçlı X-1 ını ile 75 mC/kg (300 R'lik) ı nlanma ile, deride kızarıklıklar meydana gelir (C/kg; 1 kilogramlık havada 1 coulomb'luk yük ta ıyan iyonlardır. R; röntgen'i simgelemekte olup, eski birim sisteminde X-1 ını miktarını tanımlayan ı nlanma birimidir). Daha yüksek dozlarda saç ve kıl dökülmesi, kabarıklıklar, nekroz ve yaralar olu ur. Eller ve yüzlerde meydana gelen deri hastalıkları, özellikle 20. yüzyılın ba larında radyologlar arasında görölmekteydi. Gonadlar, radyasyona oldukça hassastır. Erkeklerde testislerin; 300 mGy'lik (30 rad'lık) dozla ı nlanması ve kadınlarda ise 3 Gy'lik (300 rad'lık) bir dozla ı nlanması ile, geçici kısırlık olu ur. Daha yüksek dozlarda geçici kısırlık süresi artar. Erkeklerde gonadların sperm üretimi; 4.4 Gy'lik (440 rad'lık) ı nlanmadan sonra birkaç yıl süre ile durur. Kadınlarda, doza ba lı olarak, bir ay veya daha fazla süre "adetten kesilme" ekinde geçici kısırlık meydana gelir. Gonadlarda fonksiyonel de i imler ile ilgili fikir veren adet süresindeki düzensizlikler, yumurtalıkların; geçici kısırlık için gerekli olan dozundan, çok daha dü ük bir dozla ı nlanmaları ile de olu abilir. Gözler de radyasyona kar ı duyarlıdır. Gözlerin 1-2 Gy (100-200 rad) ile ı nlanması, akut konjonktivit ve kornea tabakasının bozulmasına neden olabilir.

Gecikmi Etkiler: Ani iddetli (akut) etkileri olu turmak için yeterli olmayan radyasyon dozları, ı nlanmadan yıllar sonra kendisini gösteren zararlara neden olabilmektedir. Gecikmi etkilerin temel tipleri, görülen (somatik) ve ı nlanan ki ilerın kalıtım yolu ile nesillerine geçen anormallikler ekinde beliren habis hastalıklardır. 0.01 Sv (1 rem) ila 1 Sv (100 rem) arasındaki dozların yaptı ı etkiler yaygın ekinde ara tırılmaktadır. Ayrıntılı incelemeler UNSCEAR (United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation) komitesi ve BEIR (the Committee on the Biological Effects of Ionising Radiation of the National Academy of Sciences, USA) tarafından yayınlanmaktadır. Radyasyonun gecikmi etkileri ya bir defada a ırı derecede yüksek dozda ı nlanma ya da sürekli bir ekinde az olarak yüksek dozda ı nlanma ile meydana gelebilir. Sürekli yüksek dozda ı nlanma; dı radyasyon alanları ile ı nlanma veya radyoizotopun solunum yada a ız yoluyla alınmasına ba lı olarak, doku içindeki protein ile kimyasal reaksiyon yapması, normal metabolizma ile radyoizotopun kimyasal benzerli i sebebiyle belirli organ ve dokularda sistematik ekinde absorblanması sonucunda olu an ı nlanmalar ekinde hasıl olabilir. Dahili olarak depolanmı radyoizotop uzunca bir süre dokuyu ı nlamaya devam edebilir. Bu ı nlanmaları etkileyen en önemli faktörler; ilgili radyoizotopun fiziksel yarı ömrü, izotopun biyolojik yarı ömrü, radyoizotopun yerle ti i kritik organ ve ı nlanan ki inin a ırlı ıdır. Yüksek dozda ı nlanmalar sonucunda hasıl olan gecikmi etkilere örnek olarak; kanser, genetik etkiler, erken ya lanma ve katarakt verilebilir.

Görülen (somatik) etkiler: Bilimsel verilerde en çok görülen somatik etkiler; kan kanseri, tiroiyit kanseri, kadınlarda gö üs ve akci er kanseri ekinde olmaktadır. Di er organlardaki kanserler için risk oranları oldukça dü üktür. Düzenli olan tüm vücut ı nlanmaları sonucunda, her iki cinsiyet ve bütün ya grupları için, öldürücü kanserlerin toplamı içinde, sadece kan kanserlerinin olasılı ı yakla ık 4-6 kat artmaktadır. Radyasyondan olu an kanserde, göz önüne alınması gereken iki önemli faktörden birincisi, ı nlanma ya ı ve cinsiyet, ikincisi ise, kanserin ı nlanma ve ortaya çıkması arasındaki gelişim süresinin de i mesidir. Di ilerde gö üs ve tiroiyit kanseri hassasiyeti, erkeklerden fazla olup, çocuklarda kan ve tiroiyit kanserlerinin yeti kinlerden daha çok oldu u görülmektedir. Gö üs

kanseri tehlikesi, gençlikte özellikle 30 ya ına kadar yüksek olmakla beraber, akci er kanserine ya lı ki ilerde rastlanmaktadır. Geli im süreleri, kan kanserleri için birkaç yıl, di er kanserler içinde 10-20 yıl arasında de i mektedir. 1 Gy'den (100 rad'dan) daha yüksek dozdaki ı nlanmalarda görülen kanserler hakkında, kesin ve tutarlı bilgiler mevcuttur. Herhangi bir doku veya organda, ı nlanmadan sonra tümör geli ebilmesine ra men, bazı organ ve dokular daha hassas olabilmektedir. Yukarıda anlatılan organların dı nda, örne in, kemikte ve deride de, radyasyondan ileri gelen kanserler gözlenmektedir. Deride görülen habis tümörün ilk ekli, fizikçiler ve doktorlar dahil, X-1 ını ile çalı anlarda, hastalı ın beklenen durumundan çok daha fazla deri kanserine rastlanması ile ortaya çıkmı tır. Radyasyondan olu an 100'den fazla deri kanseri vakası literatüre girmi tir. X-1 ını kullanan doktorlarda, bu ı nın tahri edici etkileri ayrıntılı olarak incelenmi tir. Kızartı ve ka ıntı ile birlikte deride olu an renk de i imi, tümör ve sonuçta vücuda yayılan kanser sebebiyle ölüme kadar uzanan muhtelif olaylar literatürde yayınlanmı tır. Hastalık tümü ile takribi 9 yıllık bir süre boyunca seyretmektedir. X-1 ınlarının kanser etkisi bilinmeden önce, özellikle di doktorlarında, hastalarının di filmlerini tutmaları nedeniyle, bu doktorların parmaklarında, kanserin yaygın ekilde olu tu u görülmü tür. Radyasyonun dü ük düzeyli dozlarında geli en kanser olayları hakkındaki veriler oldukça karma ıktır. Bundan dolayı, radyasyon güvenlik artlarının saptanmasında, yüksek dozlardan ekstrapolasyonla, dü ük düzeyli radyasyon risklerinin hesaplanması ekinde bir yol seçilmi tir. E iksiz (istatistiksel-olasılıklı-lineer) modeldeki varsayım gözönüne alındı ı takdirde, 10 mSv'lik (1 rem'lik) tüm vücut dozuna maruz kalmı 1 milyon ki ide fazladan 125 öldürücü kanser ölümü bulunmu tur. Bu arada dikkat edilmesi gereken çarpıcı konu, normal olarak 1 milyon ki ide 206000 kanserden ölüm vakası vuku bulmaktadır. Bir ba ka deyi le, hiçbir ekilde radyasyonu gözönüne almaksızın, bir toplulukta yakla ık 5 ki ide 1 ki i, di er bir deyimle, geçmi ten beri çevresel ve insanların soyundan gelen (genetik) etkilerden dolayı takribi %20 oranında kansere yakalanma olayı zaten do al ekilde gözlenmektedir.

Lösemi-Kan Kanseri: Lösemi, özellikle akut kemik lösemisi ve daha az olarak da kronik kemik veya akut lenf lösemisi, tüm vücudun

yüksek dozda radyasyona maruz kalması ile oluşan kanser türleridir. Kronik lenf lösemisi, radyasyonla ı nlanma ile ortaya çıkmayabilir. Disiplinli ve düzenli radyasyon kontrol ve denetimleri yapılmadan, yani ilk önceleri, X-ı nları ile çalı an radyologlar; radyasyonla çalı mayan di er meslekda larına nazaran, önemli oranlarda lösemiye yakalandıkları tespit edilmiştir. Amerikalı radyologlar arasında gerçekleştirilen bir istatistikte, lösemideki artış hızı ile ilgili dozlar 1 Gy (100 rad) mertebesinde bulunmuştur. Sağlık Fizi i ve Radyolojik Güvenlik uygulamalarının artması sonucu, radyologlar ve di er yardımcı personel arasında görülen lösemi oranı sürekli ekilde azalmaktadır. Ayrıca lösemideki bir artış da, X-ı nları ile tedavi edilen radyoterapi hastalarında omurilik katılması eklinde gözlenmektedir.

Kuaktan kuana geçen (genetik) etkiler: Genetik hücrelerin ı nlanmasında, ı nlanan kilerin nesillerinde, gözönüne alınmayacak etkilerden, ölüme neden olan anormalliklere kadar görülen de i iklikler izlenmektedir. u ana kadar, insan üzerinde, herhangi bir doz düzeyinde yeterli ve güvenilir bulgular elde edilememiştir. Bu nedenle, radyasyonun olası genetik etkileri hakkında tüm tahminler, deney hayvanlarına, o unlukla da farelerden elde edilen sonuçlara dayandırılmaktadır. nsan üzerindeki etkilerin tahmin edilmesinde iki yol vardır. Birincisinde; fareler üzerindeki denemelerden ortaya çıkarılmı radyasyondan ileri gelen de i im hızları, insanlarda nesil bozukluklarının do al sonuçlarından elde edilen ve kendili inden oluşan de i im hızları ile karşılaştırılmı , insanda, kendili inden olan de i im hızını iki kat yapmak için gerekli radyasyon dozu hesaplanmıştır. Bu yöntem, katlamalı doz metodu olarak adlandırılmaktadır. kincisi; farelerde radyasyondan ileri gelen de i im hızları bulgusu, alınan radyasyon dozunun bir sonucu olarak, insanda olabilecek de i imlerin sayısını, do rudan do ruya tahmin etmekte kullanılmaktadır. Bu da direkt metod olarak adlandırılmaktadır. Her iki metod da belirsizlikler içermektedir. Katlamalı doz metodunda; fareler ve insanlara benzer katlamalı doz uygulanmakta olup, kendi kendine de i imekte olan bir genin hassasiyeti ile, radyasyondan ileri gelen de i imin aynı oldu u varsayılmaktadır. Meyva sine i Drosophila'nın dı nda bu varsayımların ikincisini do rulamak için, bazı ipuçları vardır. Ya ayan

organizmalarda; genlerin tümünde (kromozonlar-genome) ve genetik mutasyonlarda, en iyi ve güvenilir bilimsel veriler, Drosophila'dan elde edildi i için, bu meyva sinekleri üzerinde yo un ara tırmalar yapılmaktadır. nsanlardaki etkilerin ço u tahminlerinde, 0.4-2.6 Sv (40-260 rem) arasında de i en, fare denemelerinden elde edilen katlamalı dozlar ile, 1 Sv'lik (100 rem'lik) ortalama bir de er kullanılmaktadır. Hiroshima ve Nagasaki kazazedelerinin nesillerinde yapılan son incelemeler, ölü do um olayları, bebek ölümleri, do um a ırlı ı, do u tan olan bozuklukların sıklı ı, cinsiyet oranı, kanser olayını müteakip büyüme ve geli im olaylarının sayısı ile tutarlı oldu u kanıtlanmı olup, ı ınlanmı anne ve babalardan gebe kalmı çocuklar ile, uygun olarak belirlenmi kontrol grupları arasında, gözönüne alınamayacak farklar izlenmi tir. Bu sonuç, kadınlar için 10 Sv'lik(1000 rem'lik) ve erkekler için 1.3 Sv'lik(130 rem'lik) minimum katlamalı dozla uygun olup, 1 Sv'lik (100 rem'lik) katlamalı doz kullanılarak, hayvan verilerinden ekstropolasyonla tahmin edilen tehlikenin, beklenenin çok üstünde oldu u hakkında fikir vermektedir. Do al olarak olu an bozukluklar açısından katlamalı doz metodu; radyasyondan ileri gelen bozuklukları ifade etmekte olup, yeni de i imler ile, ölüm veya do umdaki kusurlar eklinde, nüfustan kayıp olarak ortaya çıkan de i imler arasında, daha sonraki bir dengeyi göstermektedir. Böylece katlamalı doz metodu; dengeye ula ılmadan ve radyasyondan ileri gelen bozuklukların sayısı, do al olarak olu an bozuklukların sayısına e it olmadan önce, 5 ila 10 nesil arasında sürdürülmelidir. Birinci nesilde olay, dengedeki olayın 1/5 ve 1/10'nu arasında olmaktadır.

Radyasyon dozunun genetik etkilerinin tahmin edilmesinde direkt metod; alınan radyasyon dozu sonucunda; insanda olu acak kusurların sayısını do rudan do ruya yakla ık olarak de erlendirmek için, radyasyondan ileri gelen noksanlı ın özel tipleri üzerindeki verileri kullanılmaktadır. Katlamalı doz metoduna gelince, asıl belirsizlik insana dayandırılmı fare verisi varsayımından do maktadır. Di er taraftan, farelerdeki yapısal anormalliklerin sadece bir tür kusuruna ait veriden, insandaki tüm kusurların olu um oranının hesaplanması, insan iskeletinde asıl etkili olan kusurların nispi olarak bilinmesini gerektirmektedir. Konu olan belirsizliklere ra men, direkt metod ve katlamalı metodun ön varsayımları arasında akla yatkın bir uygunluk

gözlenmektedir. Sonuçları önemli ekilde etkiyen bir faktör de, genetik bozuklukların insanların do asından dolayı nispeten yüksek olmasıdır. Örne in, canlı do an bebeklerin milyonu ba ına 30000-100000 arasında sakat do um olması, tabii radyasyon veya mesleki ı nlanmalardan olu an olası bir fazlalı ın gözlenmesine olanak vermemektedir.

III- Dü ük Doz Düzeylerinin Etkileri:

nsan üzerinde radyasyonun etkileri hakkındaki kritik bulgular, 0.1 Sv'den (10 rem'den) daha fazla doz etkilerinin gözlemlerine dayandırılmaktadır. 10-20 mSv'lik (1-2 rem'lik) ani dozlar, insanda bazı durumlarda habis belirtiler olu turmasına ra men, bu emareler, mesleki ı nlanmalara kar ılık gelen düzeylerdeki risklerin hesaplanması için, yeterli temeli olu turmamaktadır. Yakla ık 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) mertebesindeki do al radyasyonun etkileri hakkında bilimsel veriler bulunmamakta olup, nükleer güç santrallarının çevresel etkilerinin de erlendirilmesi için yapılması gereken tahminler de tam bu düzeyde olmaktadır. Böylece yıllık yakla ık 5-20 mSv (0.5-2 rem) arasında de i en mesleki ı nlanma veya çevresel faktörlerden ileri gelen etkiler ile, takribi 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) olarak do al radyasyon düzeylerinde olabilecek risklerin tahmin edilmesi, ancak yüksek dozlardan elde edilen doz-etki e rilerinin ekstrapolasyonu sayesinde mümkündür. Etkinin, düzle me ve hatta hücre ölümlerinin üstün olmaya ba ladı ı çok daha yüksek dozlarda; azalma e iliminde oldu u çok yüksek doz düzeyleri hariç, orta ve yüksek düzeydeki dozlarda; doz-etki arasında lineer ba ıntının var oldu u kabul edilmekle birlikte, genel olarak küçük doz düzeylerinde, doz-etki e risinin ekli hakkında oldukça büyük anla mazlıklar vardır. Çalı ma ko ullarında, titizli in gerekli oldu u radyolojik korunma amaçları için, dü ük dozlardaki somatik ve genetik tesirlerin; etkilerin önemli oldu u ve ihmal edilemedi i, bir e ik de eri olan yüksek doz etkilerinin lineer ekstrapolasyonu gözönüne alınması ile, önceden tahmin edilebildi i varsayılmaktadır.

ICRP, dü ük doz e de erlerindeki etkilerin gerçekçi tahminleri için, lineer varsayım gözönüne alınarak hesaplanan risk faktörlerini saptamaktadır. Bununla beraber, radyasyonlu uygulama ile

radasyonsuz uygulama arasındaki seçimde gözönünde bulundurdukları risk tahminlerinde, düşük dozlardaki gerçek riskin, titizlikle ifade edilenden de daha düşük olabilme ihtimali üzerine yoğunlaşılması gerekliliği vurgulanmaktadır. Radyasyon riskinin, dozların ihmal edilemediği ve eklemlerle de erli dozla orantılı olduğu kesin olarak kabul edilirse, bir topluluk üzerinde veya bir zaman aralığında yayılan radyasyonun belirli dozu sonucunda oluşan toplam hasarın, diğer bir deyimle, öldürücü kanserlerin sayısının, topluluğun büyüklüğünden veya ıınlanma süresinden bağımsız olduğu öngörülmektedir. Böylece toplumun büyük bir kesimini etkileyen, örneğin, nükleer denemelerden oluşan radyoaktif yarı veya birikim doz bağıntısı olarak tanımlanan toplam doz, bir başka deyişle, çevredeki uzun yarı ömürlü radyoizotoplarla uzun süreli ıınlanma sonucunda, tek kişinin aldığı doz çok küçük olsa bile, toplam hasar büyük olabilmektedir. Tek tek fertler ve tek tek kuşaklarda, alımlımda olan küçük risklerin, büyük topluluklar veya kuşaklardaki çok büyük risklerle toplanması yönteminin, akla yatkın olup olmadığı hakkında pek çok felsefi tartışma vardır. İngiliz Ulusal Radyasyondan Korunma Kurumu'nun (**National Radiological Protection Board-NRPB**) yaptığı bir araştırmaya, kişilerde 10^{-3} mSv'den (0.1 mrem'den) daha fazla yıllık dozun, kesin karara varmak için tamamıyla ihmal edilemediği bir doz da ılımına neden olan uygulamalar hakkında fikir vermektedir. Belirli bir radyoaktivitenin salınmasından hasıl olan toplam zararın hesabı için, tüm zaman üzerinden toplama kavramı, sonsuz yarı ömürlü parçalanmayan kimyasal kirliliklere uygulanması, bu gibi kirlilikler için birikim doz bağıntısı ve de erinin sonsuz olacağı, aynı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir.

Radyolojik korunma uygulamalarının temelinde lineer varsayım gözönünde bulundurulmakla birlikte, özellikle X, γ ve elektron gibi düşük LET'li radyasyonlarda kanser olma umunun gerçek riskini tahmin edilenin üzerinde; lineer ekstrapolasyonla elde edilen risk katsayılarını gözönünde bulundurarak da bilimsel araştırmalar yapılmaktadır. Memeli hayvanlar üzerindeki oldukça geniş düzeyli çalışmalarda, 0.5 Sv-10 Sv (50 rem-1000 rem) arasındaki dozlarda, etkinin de ılımı ilgili yaygın deneysel bulgular mevcuttur. Aslında deneysel veriler gerçek etkiyi do rulamamakla birlikte; yüksek dozlarda, düşük LET'li radyasyonlardan elde edilen doz-etki

e rilerinde, genel olarak artan doz ile e rinin e imi de artmaktadır. Deneysel verinin farkedilir ekilde dozun karesine ba lı olması; dü ük dozlarda beklenen etkilerin, lineer ekstrapolasyonla gözlenen verilerden fazla tahmin etme e iliminde olunaca nını i aret etmektedir. Di er taraftan, bir lineer ekstrapolasyonun daha uygun oldu u akılda tutularak, yüksek LET'li radyasyonlarda doz-etki e rilerinin e imi, dozla nispeten az olarak de i mektedir. Bu gözlemler, bir hacimde biyolojik zararı ba latmak için gerekli, iki iyonlayıcı olayı gözönüne alan teorileri destekler niteliktedir. Yüksek LET'li radyasyonlar; örne in nötronlar, her iki olayı sa lamak için hassas hacime yeterli enerji transfer edebilmelerine ra men, dü ük LET'li radyasyonlardaki olayların çiftini olu turmak için iki parçacık gereklidir. Böylece nötronlara, lineer doz-etki ba ntısı ve dü ük LET'li radyasyonlara da, doz karesi ba ntısı uygulanmalıdır. Tüm bunlara ra men, radyasyondan ileri gelen kanserle ilgili olaylar zinciri hiçte iyi anla ılamamı tır. Radyasyonla ı nlanma ve onun sonucu kanser arasında ili ki kuruldu u zaman bile, radyasyonla ı nlanma sadece bir gerek olabilmekte ve kansere neden olması yeterli bir ko ul olmamaktadır. Bir ba ka deyi le, sebep-sonuç ili kisi gözlenememektedir. Di er yollarla olan ı nlanmalar da dahil olmak üzere, radyasyona maruz kalma ile olu an metabolik de i meler, bir tümör meydana gelmeden önce de ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, yüksek doz gözlemlerini hesap etmek için geli tirilmi modeller, radyasyon dozunun öneminin ve di er yardımcı faktörlerin tümü ile farklı olabildi i, dü ük doz ve dü ük doz hızı durumlarında, uygunluk sa lamayabilmektedir.

IV- SONUÇLAR

Radyasyonla 0.1 Sv'den (10 rem'den) yukarıda oldukça yüksek düzeylerde ı nlanmı insanlar ve hayvanlar üzerinde yapılan ayrıntılı çalı malar, insanda iyonlayıcı radyasyonun somatik ve genetik olarak meydana getirdi i etkilerin tahmin edilmesine olanak vermektedir. 1 Sv (100 rem) ila 10 Sv(1000 rem) arasındaki dozlar, ani iddetli (akut-ivegen) etkilere ve 10 Sv'den (1000 rem'den) yüksek dozlar da ölümlere neden olabilmektedir. 0.1 Sv'le (10 rem'le) 1 Sv (100 rem) mertebesinde alınan dozlarda; uzunca bir süre sonra çok az da olsa, gizlice var olan gecikmi etkiler ekinde hasarlar ortaya

çıkabilmektedir. İnanılmı ki ilerde ortaya çıkan en belirgin gecikmi etkiler; kan kanseri ve di er kanserler, özellikle de; tiroyit, kadınlarda gö üs kanseri ve akci er kanseri ekinde izlenmektedir. Nükleer sanayideki 10 mSv/yıl (1 rem/yıl) ile 100 mSv/yıl (10 rem/yıl) mertebesinde ve de do al (background) radyasyonu olan takribi 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) düzeyinde alınan radyasyon dozlarında kaynaklanan kanser vakalarının artı ı hakkında, bilimsel açıdan güvenilir ip uçları bulunmamaktadır. Bu gibi dü ük düzeylerde etkilerin tahmin edilmesinde, daha yüksek doz etkilerinin ekstrapolasyonunun gözönüne alınması gerekmektedir. Radyolojik korunma amaçları için, radyasyondan ileri gelen kanserlerin sayısının, en dü ük dozlara kadar, dozla do rudan do ruya orantılı olarak de i ece i varsayılmaktadır. Bu varsayım oldukça sınırlı olup, özellikle dü ük LET'li dü ük düzeyli radyasyonlarda, beklenenden daha az olu an kanserlerin sayısının, çok daha fazla tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Radyasyonla ı ınlanmadan meydana gelen kanser olasılı ının dü ük ve toplumlardaki kanser olaylarının da oldukça yüksek olması nedeni ile, gelecekte olu acak kanserlerin, dü ük düzeyli riskini do rulayıcı ip ucu bulma olasılı ı epeyce zorla acaktır. Di er taraftan hem geli mi hem de geli mekte olan ülkelerde ortalama ömür (life expectancy) hızla artmaktadır. Bu durumda, insanların kanserli hastalıklara yakalanma ihtimaliyetleri de artmaktadır. Buna öyle bir örnek verebiliriz. Ankara- stanbul arasını uzun yol, yani uzun ömür, Ankara-Bolu arasını kısa yol, yani kısa ömür olarak farzedelim. Trafikte, kara yolu ile Ankara'dan Bolu'ya giderken bir kazaya karı ıp ölme ihtimalimiz, Ankara'dan stanbul'a giderken olabilecek bir kaza ihtimalinden çok daha azdır. Bir ba ka deyi le, yol uzadıkça yani ömrümüz artıkça, bir kazaya karı ıp ölme olasılı ımız yada kansere yakalanma ihtimalimiz artmaktadır.

Radyasyonun genetik etkileri sadece hayvanlarda gözlenmi tir. İnsanlarda; bu gibi etkilerin ön tahminleri, hayvanlardan insanlara ekstrapolasyonun zorlu u nedeni ile, oldukça belirsizlikler içermektedir. Son yapılan tahminler, ki ilerinin nesillerine olan genetik zararların, onların kendilerine olan somatik zararlardan daha az oldu u hakkında fikir vermektedir.