

İyonlaştırıcı Radyasyonların Biyolojik Etkileri

II- Radyasyona Maruz Kalma veya Işınlanma:

Diğer çevre kirleticilerinde olduğu gibi, radyasyonda da iki tip maruz kalma (ışınlanma) gözönüne alınmaktadır.

Kazaen, kısa sürede bir defada yüksek dozda radyasyona maruz kalma: Işınlanmadan çok kısa süre sonra biyolojik etkiler meydana getiren bu durum, "akut ışınlanma" olarak adlandırılır. Bir başka deyişle, 0.1Gy(10 rad) ila 10 Gy(1000 rad) arasında oldukça yüksek dozlardaki ışınlanmalar; ay, hafta, gün hatta saat gibi çok kısa sürede oluşan ani şiddetli (akut-ivegen) etkilere veya yıllar sonra ortaya çıkabilen gecikmiş etkilere neden olabilmektedir. Bunlardan ayrı olarak, deri yanıkları, radyolojik uygulamaların başlangıcında görülmüştür. Genellikle, bu gibi şiddetli etkiler için, etkilerin önemli olduğu, etkin bir eşik değeri gösteren ve şüphesiz ölüm oranı yüzde yüze yaklaştığında düzleşen, lineer olmayan (eşikli) doz-yanıt eğrisi kabul edilmektedir. 3-3.5 Gy"lik (300-350 rad"lık) tüm vücut ışınlanması için, tıbbi müdahale olmadığı takdirde, %50 ölüm meydana gelebilmekte, tedavi ile 5 Gy"de (500 rad"da) %50 ölüm oranı görülebilmektedir. Ölüm; normal olarak hafta mertebesinde oluşmakta, çok daha yüksek dozlarda saat düzeyinde de ölüm gözlenebilmektedir. Hemen ortaya çıkabilen ölümler 1 Gy"nin (100 rad"ın) altındaki dozlarda olmamakta, 10 Gy"nin (1000 rad"ın) üzerinde ölüm mutlaka gerçekleşmektedir. Bununla beraber, radyasyonun dolaylı (kimyasal) etkisinin hücreleri öldürme niteliği, radyoterapinin temel uygulamalarını oluşturan onlarca gray (binlerce rad) mertebesindeki dozlar, seanslar halinde, hem belirli bir zamana yayılarak hem de radyasyon belli bir yere yani habis tümörlere yönlendirilerek ve diğer doku ve organlar da radyasyon karşı çok iyi zırhlama malzemesi olan kurşunlarla korunacak biçimde, kanserli hücreler yok edilerek büyümeleri önlenmek suretiyle, onkoloji hastalarının tedavisi yapılmaktadır.

Diğer taraftan, tüm vücudun akut olarak fazla ışınlanması, organ ve doku sistemlerin hepsine etki eder. Bununla birlikte, radyasyona maruz kalmış kişilerde, organ ve dokuların radyasyona karşı duyarlılığının aynı olmaması sebebiyle, etkinin veya hastalık belirtisinin ortaya çıkması, dozun büyüklüğüne bağlı olmaktadır. Sınıflandırmayı daha basitleştirmek 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 ateş,
- d) Kan tablosunun değişimi.

Bütün bunlara ilaveten, çok sayıda diğer etkiler de gözlenmektedir.

Kan Tablosundaki Değişim: Yukarıda a,b,c,d diye belirtilen dört değişik etkiye göre, akut olarak ışınlanmanın en iyi belirtisi, kan sayımı ile ortaya çıkmaktadır. Diğer üç belirtinin gözlenmediği orta düzeyli ışınlanmalarda bile, kan sayımı bir fikir verebilmektedir.

140 mGy (14 rad) gama radyasyonu ile ışınlanmaya kadar kan değişimi görülebilmemesine rağmen, genellikle 250-500 mGy"lik (25-50 rad"lık) ışınlanmalarda, kan tablosunun değişimi gözlenmektedir. 500 mGy"nin (50 rad"ın) üzerinde, kan değişimi kesin olarak ortaya çıkmaktadır. Kanın hacim olarak %55"ini plazma, hemen hemen

%45"ini de çeşitli elementlerden oluşan lökosit olarak adlandırılan akyuvarlar ile eritrosit ve trombosit olarak adlandırılan alyuvarlar meydana getirmektedir. Yetişkinlerin kanında mm³ de 7000'e kadar, akyuvarlar yada beyaz kan hücreleri bulunmakta olup, dışarıdan gelen mikroplara karşı bir savunma görevi yapmaktadır. Herhangi bir enfeksiyon oluşması halinde, enfeksiyona sebep olan organizma ile mücadele etmek için, vücudun lökosit üretimi uyarılır. Lökositlerin başlıca tipleri lenfositler ve granülositler olup, bunların her ikisinde belirli fonksiyonlarla enfeksiyona karşı koymaktadır. Normal şartlar altında, her ikisinin de akyuvarlara oranı takribi olarak sabit kalmaktadır. Granülositler, akyuvarların yaklaşık % 70-75"ini, lenfositler ise, hemen hemen %25-30"unu oluşturmaktadır. Granülositler kemik iliğinde meydana gelmekte ve 3 gün içinde ölmektedir. Lenfositler; lenf bezlerinde ve dalakta oluşurlar ve 24 saat süre ile görev yaparlar. Alyuvarlar da çok olarak bulunmakta ve kan içindeki konsantrasyonları mm³ de 5 milyona kadar ulaşmaktadır. Alyuvarların temel işlevi, akciğerlerdeki oksijeni vücut hücrelerine ve hücrelerde meydana gelen karbondioksit artışını akciğerlere taşımaktır. Eritrositler; kemik iliğinde oluşurlar ve 90-120 gün kadar canlı kalırlar. Trombositlerin sayısı mm³ de 200000-400000 arasında olup, kanın pıhtılaşmasını sağlarlar, ilikte oluşarak, 8-12 gün görev yaparlar.

Öldürücü radyasyon dozuna yakın akut ışınlanmadan sonra, granülositlerin sayısı aşırı derecede artar ve birkaç gün içinde azalmaya başlayarak, iki hafta içinde minimum düzeye iner. Bunların sayısı, birkaç hafta ile birkaç ay içerisinde normale döner. Lenfositler; ışınlanmadan sonra oldukça azalır ve bu durum, bir iki ay kadar devam eder. Radyasyonla ışınlanma ile akyuvarların epeyce etkilenmelerine mukabil, alyuvarların takribi bir hafta sonra etkilenmeye başladıkları görülmektedir. Eritrositler sürekli azalarak, 1 ila 2 ay sonra minimum seviyeye düşerler. Müteakip birkaç hafta içinde biraz arttıkları gözlenmektedir. Trombositler, ışınlanmadan sonra bir ay içinde minimum düzeye düşecek şekilde, düzenli olarak azalır. Normale dönüşmeleri çok yavaş olup, birkaç aylık süreyi kapsayabilmektedir. Bütün bu durumlarda, kan değişiminin derecesi ve hızı, radyasyon dozunun bir fonksiyonudur.

Kan Yapıcı Sistemdeki Belirti: Bu durum, 2 Gy"lik (200 rad"lık) gama dozundan sonra ortaya çıkar. Hastalığın belirtileri, fizyolojik değişiklikler şeklinde oluşur. Hastalığın başlangıcı ani olup, aşırı ışınlanmadan birkaç saat sonra meydana gelen mide bulantısı ve kusma, görülen ilk belirtilerdir. Ortaya çıkan kırgınlık ve yorgunluk, alınan dozun büyüklüğünün bir ölçüsü değildir. Işınlanma sonrası iki üç hafta içinde, mutlaka saç dökülmesi görülür. Birkaç ay içerisinde de ölümle sonuçlanabilir. Şüphesiz üzerinde durulacak etkiler, kemik iliğinde ve kanda oluşmaktadır. İlik azalımı, 2 Gy"de (200 rad"da) görülmekte, 4-6 Gy"de (400-600 rad"da) ilik tamamen ortadan kalkmaktadır. İliğin tamamen yok olmasına rağmen, fizyolojik etkiler nedeniyle kişi hayatını sürdürebilirse, iliğin yeniden oluşması bazen söz konusu olabilir. 7 Gy (700 rad) veya daha yüksek dozdaki ışınlanmalarda, kemik iliği tekrar onarılamayacak şekilde yok olmakta, insan dahil çoğu memelilerde LD-50/30 gün dozuna eşdeğer bir hasar meydana gelmektedir. Lökosit için mm³ de 500 veya daha az bir sayım, ışınlanmadan birkaç gün sonra ölümün meydana geleceğine işaret etmektedir.

Sindirim Sistemindeki Belirti: Bu hastalığın belirtisi, 10 Gy"lik (1000 rad"lık) tüm vücut ışınlanması sonucunda oluşur ve barsak mukozasının pul pul döküldüğü gözlenir. Kan yapıcı sistemlerdeki belirtilere ilave olarak, ciddi şekilde mide bulantısı, kusma ve ishal, ışınlanmadan hemen sonra başlar. Ölüm bir iki hafta içinde vuku bulmaktadır.

Merkezi Sinir Sistemindeki Belirti: Toplam 20 Gy (2000 rad) veya daha fazla tüm vücut ışınlanması, organların tamamı ile birlikte, merkezi sinir sistemine de zarar vermektedir. Işınlanmadan birkaç dakika sonra bilinç kaybı ortaya çıkar. Birkaç gün, hatta birkaç saat içinde ölüm vuku bulur. Bilinç kaybı doğrudan doğruya dozla orantılıdır. 200 mikrosaniyede 44 Gy"lik (4400 rad"lık) ortalama toplam doza maruz kalmış kişide, 30 saniye içinde vücudun dengesinde bozukluk ve şaşkınlık, 10 dakika sonra da bilinç kaybı ve şok hali oluşur. Kazadan 35 dakika sonra, sindirim sistemi devreden çıkar. Yoğun tedavi yöntemleri ile, hasta ancak 34-35 saat kadar yaşatılabilir.

Diğer Akut Etkiler: Yüksek dozda ışınlanmadan sonra, hemen oluşan çeşitli etkiler gözlenmektedir. Özellikle yeri sebebiyle deri; beta ve düşük enerjili X ışınlarına karşı daha duyarlı olmaktadır. Düşük enerjili teşhis amaçlı X-ışını ile 75 mC/kg (300 R"lik) ışınlanma ile, deride kızarıklıklar meydana gelir. Daha yüksek dozlarda saç ve kıl dökülmesi, kabarıklıklar, nekroz ve yaralar oluşur. Eller ve yüzlerde meydana gelen deri hastalıkları, özellikle 20. yüzyılın başlarında radyologlar arasında görülmekteydi. Gonadlar, radyasyona oldukça hassastır. Erkeklerde testislerin; 300 mGy"lik (30 rad"lık) dozla ışınlanması ve kadınlarda ise 3 Gy"lik (300 rad"lık) bir dozla ışınlanması ile, geçici kısırlık oluşur. Daha yüksek dozlarda geçici kısırlık süresi artar. Erkeklerde gonadların sperm üretimi; 4.4 Gy"lik (440 rad"lık) ışınlanmadan sonra birkaç yıl süre ile durur. Kadınlarda, doza bağlı olarak, bir ay veya

daha fazla süre "adetten kesilme" şeklinde geçici kısırlık meydana gelir. Gonadlarda fonksiyonel değişimler ile ilgili fikir veren adet süresindeki düzensizlikler, yumurtalıkların; geçici kısırlık için gerekli olan dozundan, çok daha düşük bir dozla ışınlanmaları ile de oluşabilir. Gözler de radyasyona karşı duyarlıdır. Gözlerin 1-2 Gy (100-200 rad) ile ışınlanması, akut konjonktivit ve kornea tabakasının bozulmasına neden olabilir.

Gecikmiş Etkiler: Ani şiddetli (akut) etkileri oluşturmak için yeterli olmayan radyasyon dozları, ışınlanmadan yıllar sonra kendisini gösteren zararlara neden olabilmektedir. Gecikmiş etkilerin temel tipleri, görülen (somatik) ve ışınlanan kişilerin kalıtım yolu ile nesillerine geçen anormallikler şeklinde beliren habis hastalıklardır. 0.01 Sv (1 rem) ile 1 Sv (100 rem) arasındaki dozların yaptığı etkiler yaygın şekilde araştırılmaktadır. 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 gecikmiş etkileri ya bir defada aşırı derecede yüksek dozda ışınlanma ya da sürekli bir şekilde az olarak yüksek dozda ışınlanma ile meydana gelebilir. Sürekli yüksek dozda ışınlanma; dış radyasyon alanları ile ışınlanma veya radyoizotopun solunum yada ağız yoluyla alınmasına bağlı olarak, doku içindeki protein ile kimyasal reaksiyon yapması, normal metabolizma ile radyoizotopun kimyasal benzerliği sebebiyle belirli organ ve dokularda sistematik şekilde absorblanması sonucunda oluşan ışınlanmalar şeklinde hasıl olabilir. Dahili olarak depolanmış radyoizotop uzunca bir süre dokuyu ışınlamaya devam edebilir. Bu ışınlanmaları etkileyen en önemli faktörler; ilgili radyoizotopun fiziksel yarı ömrü, izotopun biyolojik yarı ömrü, radyoizotopun yerleştiği kritik organ ve ışınlanan kişinin ağırlığıdır. Yüksek dozda ışınlanmalar sonucunda hasıl olan gecikmiş etkilere örnek olarak; kanser, genetik etkiler, erken yaşlanma ve katarakt verilebilir.

Görülen (somatik) etkiler: Bilimsel verilerde en çok görülen somatik etkiler; kan kanseri, tiroit kanseri, kadınlarda göğüs ve akciğer kanseri şeklinde olmaktadır. Diğer organlardaki kanserler için risk oranları oldukça düşüktür. Düzenli olan tüm vücut ışınlanmaları sonucunda, her iki cinsiyet ve bütün yaş grupları için, öldürücü kanserlerin toplamı içinde, sadece kan kanserlerinin olasılığı yaklaşık 4-6 kat artmaktadır. Radyasyondan oluşan kanserde, göz önüne alınması gereken iki önemli faktörden birincisi, ışınlanma yaşı ve cinsiyet, ikincisi ise, kanserin ışınlanma ve ortaya çıkması arasındaki gelişim süresinin değişmesidir. Dişilerde göğüs ve tiroit kanseri hassasiyeti, erkeklerden fazla olup, çocuklarda kan ve tiroit kanserlerinin yetişkinlerden daha çok olduğu görülmektedir. Göğüs kanseri tehlikesi, gençlikte özellikle 30 yaşına kadar yüksek olmakla beraber, akciğer kanserine yaşlı kişilerde rastlanmaktadır. Gelişim süreleri, kan kanserleri için birkaç yıl, diğer kanserler içinde 10-20 yıl arasında değişmektedir. 1 Gy'den (100 rad'dan) daha yüksek dozdaki ışınlanmalarda görülen kanserler hakkında, kesin ve tutarlı bilgiler mevcuttur. Herhangi bir doku veya organda, ışınlanmadan sonra tümör gelişebilmesine rağmen, bazı organ ve dokular daha hassas olabilmektedir. Yukarıda anlatılan organların dışında, örneğin, kemikte ve deride de, radyasyondan ileri gelen kanserler gözlenmektedir. Deride görülen habis tümörün ilk şekli, fizikçiler ve doktorlar dahil, X-ışını ile çalışanlarda, hastalığın beklenen durumundan çok daha fazla deri kanserine rastlanması ile ortaya çıkmıştır. Radyasyondan oluşan 100'den fazla deri kanseri vakası literatüre girmiştir. X-ışını kullanan doktorlarda, bu ışının tahriş edici etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kızartı ve kaşıntı ile birlikte deride oluşan renk değişimi, tümör ve sonuçta vücuda yayılan kanser sebebiyle ölüme kadar uzanan muhtelif olaylar literatürde yayınlanmıştır. Hastalık tümü ile takribi 9 yıllık bir süre boyunca seyretmektedir. X-ışınlarının kanser etkisi bilinmeden önce, özellikle diş doktorlarında, hastalarının diş filmlerini tutmaları nedeniyle, bu doktorların parmaklarında, kanserin yaygın şekilde oluştuğu görülmüştür. Radyasyonun düşük düzeyli dozlarında gelişen kanser olayları hakkındaki veriler oldukça karmaşıktır. Bundan dolayı, radyasyon güvenlik şartlarının saptanmasında, yüksek dozlardan ekstrapolasyonla, düşük düzeyli radyasyon risklerinin hesaplanması şeklinde bir yol seçilmiştir. Eşiksiz (istatistiksel-olasılıklı-lineer) modeldeki varsayım gözönüne alındığı takdirde, 10 mSv'lik (1 rem'lik) tüm vücut dozuna maruz kalmış 1 milyon kişide fazladan 125 öldürücü kanser ölümü bulunmuştur. Bu arada dikkat edilmesi gereken çarpıcı konu, normal olarak 1 milyon kişide 206000 kanserden ölüm vakası vuku bulmaktadır. Bir başka deyişle, hiçbir şekilde radyasyonu gözönüne almaksızın, bir toplulukta yaklaşık 5 kişide 1 kişi, diğer bir deyimle, geçmişten beri çevresel ve insanların soyundan gelen (genetik) etkilerden dolayı takribi %20 oranında kansere yakalanma olayı zaten doğal şekilde 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 ışınlanma ile ortaya çıkmayabilir. Disiplinli ve düzenli radyasyon kontrol ve denetimleri yapılmadan, yani ilk önceleri, X-ışınları ile çalışan radyologlar; radyasyonla çalışmayan diğer meslektaşlarına 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 Fiziği ve Radyolojik Güvenlik

uygulamalarının artması sonucu, radyologlar ve diğer yardımcı personel arasında görülen lösemi oranı sürekli şekilde azalmaktadır. Ayrıca lösemideki bir artış da, X-ışınları ile tedavi edilen radyoterapi hastalarında omurilik katılaşması şeklinde gözlenmektedir.

Kuşaktan kuşağa geçen (genetik) etkiler: Genetik hücrelerin ışınlanmasında, ışınlanan kişilerin nesillerinde, gözönüne alınmayacak etkilerden, ölüme neden olan anormalliklere kadar görülen değişiklikler izlenmektedir. Şu 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, çoğunlukla da farelerden elde edilen sonuçlara dayandırılmaktadır. İnsan üzerindeki etkilerin tahmin edilmesinde iki yol vardır. Birincisinde; fareler üzerindeki denemelerden ortaya çıkarılmış radyasyondan ileri gelen değişim hızları, insanlarda nesil bozukluklarının doğal sonuçlarından elde edilen ve kendiliğinden oluşan değişim hızları ile karşılaştırılmış, insanda, kendiliğinden olan değişim hızını iki kat yapmak için gerekli radyasyon dozu hesaplanmıştır. Bu yöntem, katlamalı doz metodu olarak adlandırılmaktadır. İkincisi; farelerde radyasyondan ileri gelen değişim hızları bulgusu, alınan radyasyon dozunun bir sonucu olarak, insanda oluşabilecek değişimlerin sayısını, doğrudan doğruya 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 değişmekte olan bir genin hassasiyeti ile, radyasyondan ileri gelen değişimin aynı olduğu varsayılmaktadır. Meyva sineği *Drosophila*'nın dışında bu varsayımların ikincisini doğrulamak için, bazı ipuçları vardır. Yaşayan organizmalarda; genlerin tümünde (kromozonlar-genome) ve genetik mutasyonlarda, en iyi ve güvenilir bilimsel veriler, *Drosophila*'dan elde edildiği için, bu meyva sinekleri üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. İnsanlardaki etkilerin çoğu tahminlerinde, 0.4-2.6 Sv (40-260 rem) arasında değişen, fare denemelerinden elde edilen katlamalı dozlar ile, 1 Sv'lik (100 rem'lik) ortalama bir değer kullanılmaktadır. Hiroshima ve Nagasaki kazazedelerinin nesillerinde yapılan son incelemeler, ölü doğum olayları, bebek ölümleri, doğum ağırlığı, doğuştan olan bozuklukların sıklığı, cinsiyet oranı, kanser olayını müteakip büyüme ve gelişim olaylarının sayısı ile tutarlı olduğu kanıtlanmış olup, ışınlanmış anne ve babalardan gebe kalmış çocuklar ile, uygun olarak belirlenmiş kontrol grupları arasında, gözönüne alınamayacak farklar izlenmiştir. 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 ekstrapolasyonla tahmin edilen tehlikenin, beklenenin çok üstünde olduğu hakkında fikir vermektedir. Doğal olarak oluşan bozukluklar açısından katlamalı doz metodu; radyasyondan ileri gelen bozuklukları ifade etmekte olup, yeni değişimler ile, ölüm veya doğumdaki kusurlar şeklinde, nüfustan kayıp olarak ortaya çıkan değişimler arasında, daha sonraki bir dengeyi göstermektedir. Böylece katlamalı doz metodu; dengeye ulaşılmadan ve radyasyondan ileri gelen bozuklukların sayısı, doğal olarak oluşan bozuklukların sayısına eşit 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 oluşacak kusurların sayısını doğrudan doğruya yaklaşık olarak değerlendirmek için, radyasyondan ileri gelen noksanlığın özel tipleri üzerindeki verileri kullanılmaktadır. Katlamalı doz metoduna gelince, asıl belirsizlik insana dayandırılmış fare verisi varsayımından doğmaktadır. Diğer taraftan, farelerdeki yapısal anormalliklerin sadece bir tür kusuruna ait veriden, insandaki tüm kusurların oluşum oranının hesaplanması, insan iskeletinde asıl etkili olan kusurların nispi olarak bilinmesini gerektirmektedir. Konu olan belirsizliklere rağmen, direkt metod ve katlamalı metodun ön varsayımları arasında akla yatkın bir uygunluk gözlenmektedir. Sonuçları önemli şekilde etkileyen bir faktör de, genetik bozuklukların insanların doğasından dolayı nispeten yüksek olmasıdır. Örneğin, canlı doğan bebeklerin milyonu başına 30000-100000 arasında sakat doğum olması, tabii radyasyon veya mesleki ışınlanmalardan oluşan olası bir fazlalığın gözlenmesine olanak vermemektedir.

III- Düşük Doz Düzeylerinin Etkileri:

İnsan 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 oluşturmasına rağmen, bu emareler, mesleki ışınlanmalara karşılık gelen düzeylerdeki risklerin hesaplanması için, yeterli temeli oluşturmamaktadır. Yaklaşık 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) mertebesindeki doğal radyasyonun etkileri hakkında bilimsel veriler bulunmamakta olup, nükleer güç santrallerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için yapılması gereken tahminler de tam bu düzeyde olmaktadır. Böylece yıllık yaklaşık 5-20 mSv (0.5-2 rem) arasında değişen mesleki ışınlanma veya çevresel faktörlerden ileri gelen etkiler ile, takribi 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) olarak doğal radyasyon düzeylerinde olabilecek risklerin tahmin edilmesi, ancak yüksek dozlardan elde

edilen doz-etki eğrilerinin ekstrapolasyonu sayesinde mümkündür. Etkinin, düzleşme ve hatta hücre ölümlerinin üstün olmaya başladığı çok daha yüksek dozlarda; azalma eğiliminde olduğu çok yüksek doz düzeyleri hariç, orta ve yüksek düzeydeki dozlarda; doz-etki arasında lineer bağıntının var olduğu kabul edilmekle birlikte, genel olarak küçük doz düzeylerinde, doz-etki eğrisinin şekli hakkında oldukça büyük anlaşmazlıklar vardır. Çalışma koşullarında, titizliğin gerekli olduğu radyolojik korunma amaçları için, düşük dozlardaki somatik ve genetik tesirlerin; etkilerin önemli olduğu ve ihmal edilemediği, bir eşik değeri olan yüksek doz etkilerinin lineer ekstrapolasyonu gözönüne alınması ile, önceden tahmin edilebildiği varsayılmaktadır.

ICRP, düşük doz eşdeğerlerindeki etkilerin gerçekçi tahminleri için, lineer varsayım gözönüne alınarak hesaplanan risk faktörlerini saptamaktadır. Bununla beraber radyasyonlu uygulama ile radyasyonsuz uygulama arasındaki seçimde gözönünde bulundurdıkları risk tahminlerinde, düşük dozlardaki gerçek riskin, titizlikle ifade edilenden de daha düşük olabileme ihtimali üzerine yoğunlaştırılması gerekliliği vurgulanmaktadır. Radyasyon riskinin, dozların ihmal edilemediği eşik değerli 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 ışınlanma süresinden bağımsız olduğu öngörülmektedir. Böylece toplumun büyük bir kesimini etkileyen, örneğin, nükleer denemelerden oluşan radyoaktif yağış veya birikim doz bağıntısı olarak tanımlanan toplam doz, bir başka deyişle, çevredeki uzun yarı ömürlü radyoizotoplarla uzun süreli ışınlanma sonucunda, tek kişinin aldığı doz çok küçük olsa bile, toplam hasar büyük olabilmektedir. Tek tek fertler ve tek tek kuşaklarda, alışılmışın dışında 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 araştırma, kişilerde 10-3 mSv'den (0.1 mrem'den) daha fazla yıllık dozun, kesin karara varmak için tamamı ile ihmal edilemediği bir doz dağılımına neden olan uygulamalar hakkında fikir vermektedir. Belirli bir radyoaktivitenin salınmasından hasil olan toplam zararın hesabı için, tüm zaman üzerinden toplama kavramı, sonsuz yarı ömürlü parçalanmayan kimyasal kirliliklere uygulanmışsa, bu gibi kirlilikler için birikim doz bağıntısı eşdeğerinin sonsuz olacağı, aynı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir.

Radyolojik korunma uygulamalarının temelinde lineer varsayım gözönünde bulundurulmakla birlikte, özellikle XX, ve elektron gibi düşük LET'li radyasyonlarda kanser oluşumunun 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 değişimi ilgili yaygın deneysel bulgular mevcuttur. Aslında deneysel veriler gerçek eğriyi doğrulamamakla birlikte; yüksek dozlarda, düşük LET'li radyasyonlardan elde edilen doz-etki eğrilerinde, genel olarak artan doz ile eğrinin eğimi de artmaktadır. Deneysel verinin farkedilir şekilde dozun karesine bağlı olması; düşük dozlarda beklenen etkilerin, lineer ekstrapolasyonla gözlenen verilerden fazla tahmin etme eğiliminde olunacağını işaret etmektedir. Diğer taraftan, bir lineer ekstrapolasyonun daha uygun olduğu akılda tutularak, yüksek LET'li radyasyonlarda doz-etki eğrilerinin eğimi, dozla nispeten az olarak değişmektedir. Bu gözlemler, bir hacimde biyolojik zararı başlatmak için gerekli, iki iyonlayıcı olayı gözönüne alan teorileri destekler niteliktedir. Yüksek LET'li radyasyonlar; örneğin nötronlar, her iki olayı sağlamak için hassas hacime yeterli enerji transfer edebilmelerine rağmen, düşük LET'li radyasyonlardaki olayların çiftini oluşturmak için iki parçacık gereklidir. Böylece nötronlara, lineer doz-etki bağıntısı ve düşük LET'li radyasyonlara da, doz karesi bağıntısı uygulanmalıdır. Tüm bunlara rağmen, radyasyondan ileri gelen kanserle ilgili olaylar zinciri hiçte iyi anlaşılammıştır. Radyasyonla ışınlanma ve onun sonucu kanser arasında ilişki kurulduğu zaman bile, radyasyonla ışınlanma sadece bir gerek olabilmekte ve kansere neden olması yeterli bir koşul olmamaktadır. Bir başka deyişle, sebep-sonuç ilişkisi gözlenememektedir. Diğer yollarla olan ışınlanmalar da dahil olmak üzere, radyasyona maruz kalma ile oluşan metabolik değişimler, bir tümör meydana gelmeden önce de ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, yüksek doz gözlemlerini hesap etmek için geliştirilmiş modeller, radyasyon dozunun öneminin ve diğer yardımcı faktörlerin tümü ile farklı olabildiği, düşük doz ve düşük doz hızı durumlarında, uygunluk sağlamayabilmektedir.

IV- SONUÇLAR

Radyasyonla 0.1 Sv'den (10 rem'den) yukarıda oldukça yüksek düzeylerde ışınlanmış insanlar ve hayvanlar üzerinde yapılan ayrıntılı çalışmalar, insanda iyonlayıcı radyasyonun somatik ve genetik olarak meydana getirdiği etkilerin tahmin edilmesine olanak vermektedir. 1 Sv (100 rem) ila 10 Sv(1000 rem) arasındaki dozlar, ani şiddetli (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 gecikmiş etkiler şeklinde hasarlar ortaya çıkabilmektedir.

Işınlanmış kişilerde ortaya çıkan en belirgin gecikmiş etkiler; kan kanseri ve diğer kanserler, özellikle de; tiroit, kadınlarda göğüs kanseri ve akciğer kanseri şeklinde izlenmektedir. Nükleer sanayideki 10 mSv/yıl (1 rem/yıl) ile 100 mSv/yıl (10 rem/yıl) mertebesinde ve de doğal (background) radyasyonu olan takribi 2 mSv/yıl (0.2 rem/yıl) düzeyinde alınan radyasyon dozlarında kaynaklanan kanser vakalarının artışı hakkında, bilimsel açıdan güvenilir ip uçları bulunmamaktadır. Bu gibi düşük düzeylerde etkilerin tahmin edilmesinde, daha yüksek doz etkilerinin ekstrapolasyonunun gözönüne alınması gerekmektedir. Radyolojik korunma amaçları için, radyasyondan ileri gelen kanserlerin sayısının, en düşük dozlara kadar, dozla doğrudan doğruya orantılı olarak değişeceği varsayılmaktadır. Bu varsayım oldukça sınırlı olup, özellikle düşük LET'li düşük düzeyli radyasyonlarda, beklenenden daha az oluşan kanserlerin sayısının, çok daha fazla tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Radyasyonla ışınlanmadan meydana gelen kanser olasılığının düşük ve toplumlardaki kanser olaylarının da oldukça yüksek olması nedeni ile, gelecekte oluşacak kanserlerin, düşük düzeyli riskini doğrulayıcı ip ucu bulma olasılığı epeyce zorlaşacaktır. Diğer taraftan hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde ortalama ömür (life expectancy) hızla artmaktadır. Bu durumda, insanların kanserli hastalıklara yakalanma ihtimaliyetleri de artmaktadır. Buna şöyle bir örnek verebiliriz. Ankara-İstanbul 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 karışıp ölme ihtimalimiz, Ankara'dan İstanbul'a giderken olabilecek bir kaza ihtimalinden çok daha azdır. Bir başka deyişle, yol uzadıkça yani ömrümüz artıkça, bir kazaya karışıp ölme olasılığımız yada kansere yakalanma ihtimalimiz artmaktadır.

Radyasyonun genetik etkileri sadece hayvanlarda gözlenmiştir. İnsanlarda; bu gibi etkilerin ön tahminleri, hayvanlardan insanlara ekstrapolasyonun zorluğu nedeni ile, oldukça belirsizlikler içermektedir. Son yapılan tahminler, kişilerin nesillerine olan genetik zararların, onların kendilerine olan somatik zararlardan daha az olduğu hakkında fikir vermektedir.