

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR

İYONLAYICI RADYASYON

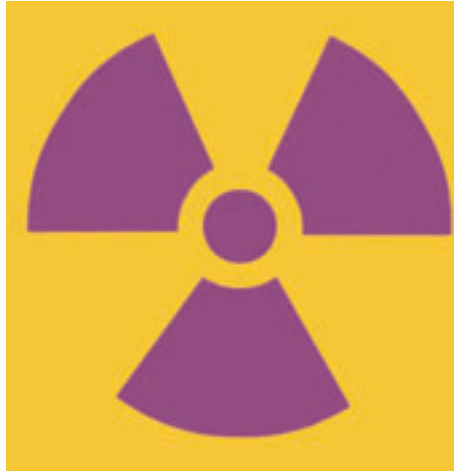
NİSAN 2006 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYAN: Fizik Y. Müh. Dr. YÜKSEL ATAKAN (Radyasyon Fizikçisi)

GÖRÜNMEZ İYONLAYICI RADYASYON

Her çeşit ışının, cinsine göre az ya da çok enerji içerdiğini, duruma göre ya elektromanyetik dalgadan ya da tanecik akımından oluşmuş gibi davrandığını son yüz yıldır biliyoruz. Işınlardan enerjisi yüksek olduğunda, bunlar maddenin yapısındaki atom ve moleküllere girerek, enerjilerini iyon çiftleri oluşturarak maddeye aktarıyorlar. Aktarılan bu enerji miktarına, 'vücudun' veya 'belirli bir organın' aldığı ya da soğurduğu '**radasyon dozu**' ve enerjileri çok yüksek olan bu çeşit girici ışınlar da '**iyonlayıcı radyasyonlar**' ya da '**iyonlayıcı ışınlar**' diyoruz. Çoğunlukla bu çeşit girici ışınlar, '**radioaktif madde**' olarak bilinen uranyum, radyum, radyoaktif, tritium gibi 'kararsız atom çekirdeklerinden', nükleer parçacık hızlandırıcılarından, Röntgen aygıtlarından kaynaklanıyor ya da uzaydan gelen 'kozmetik ışınlar' oluyorlar. **Şekil 1**'de çok çeşitli ışınların frekans ve enerjilerine göre yayılımı (spektrumu) ve bunların içinde iyonlayıcı ışınların konumu görülüyor.

Aslında insan, milyonlarca yıldan beridir uzaydan gelen kozmik ışınlarla çevresinde ve vücudunda bulunan, 'Doğal Radyoaktif Maddelerden' yayılan radyasyonlarla birlikte yaşamakta. Vücudumuzda solunum ve sindirim yollarıyla, hava, su, tüm bitkisel ve hayvansal besinlerde az da olsa bulunan, radyoaktif maddeler girmekte, bunlar zamanla çeşitli organ-



larda birikmekte. Vücudumuzda her saniye 9000 adet atom çekirdeği parçalanıyor (günde 800 milyona yakın!) ve her parçalanmada ortaya çıkan yüksek enerjili radyasyonlar, insan vücudunu 'içten' ışınlıyorlar. Ayrıca, kozmik ışınların ve çevremizdeki her çeşit maddenin içindeki radyoaktif maddelerden salınan ışınlar da sürekli olarak 'dıştan' hedef olmaktadır. Vücudumuzdan yayınlanan radyasyonlar da, çevremizde bize yakın kişileri az da olsa ışınlıyorlar. Diğer yandan, bir röntgen filmi çektiğimizde, vücudumuza 100 milyar kadar ışın girmesine karşın vücutta 'belirgin bir hasar' ya da hastalık başgöstermiyor. Her ne kadar hücreler, radyasyonlara karşı gerekli savunmayı yaparak kendilerini korumaktaysa da, giriciliği yüksek iyonlayıcı ışınların, hücre ve organlarda hasar oluşturabilmesi ve çok seyrek olarak da kanser gibi ölümle sonuçlanabilecek hastalıklara yol açması olasılığı var.

Çizelge 1: İyonlayıcı ışınların çeşitleri, ilgili bilimsel deyim ve kavramlar:

Alfa ışınları (α): Alfalar, helyum atomu çekirdeklerinden oluşuyor, her çekirdekte 2 proton ve 2 nötron var. Bazı radyoaktif maddelerin atom çekirdeklerinden salınan alfalar, oldukça büyük kütleleri nedeniyle enerjilerini maddenin üst yüzeylerinde soğurularak yitiriyorlar. Hızları saniyede 15.000 km kadar olan alfalar, bir kağıtta bile tutuluyorlar, havada 10 cm bile gidemiyorlar. (Şek.2)

Beta ışınları (β): Atom çekirdeklerinden, nötronun protona dönüşümü (Beta Bozunumu / Parçalanması) sırasında salınan/yayılan elektronlardan oluşan parçacık akımı (Beta parçacıkları da deniyor). Çok küçük kütleleri nedeniyle bunlar, alfalara göre daha girici olduklarından madde içinde daha uzun yol alıyorlar. Hızları sıfıra yakın değerlerle ışık hızı arasında olabilir. Havada birkaç metre gidebilirler. (Şek.3).

Gama ışınları (γ): Atom çekirdeğinin bozunumu sırasında salınan elektromanyetik dalga (foton denilen enerji paketçikleri ya da kuantaları akımı). Işık hızıyla hareket eden gamaların enerjileri çok yüksek olup maddeye enerjilerini aktarana kadar epey yol alırlar ve ancak kurşun (Pb) gibi ağır özgül kütleli maddelerle frenlenebiliyorlar. Frekans, dalga boyu ve enerjileri Şek.1'de görülüyor.

Nötron ışınları (n): Atom çekirdeklerinin doğal bozunumu sırasında salınan, elektriksel olarak yüksüz/nötral nötron parçacıkları akımı. Nötronun küt-

lesi, atom çekirdeğindeki artı yüklü protondan biraz daha büyük.

(Proton: Atom çekirdeğindeki artı yüklü temel parçacık, Hidrojen Atomu Çekirdeği)

Röntgen ışınları¹: Atomların dış kılıfındaki elektron bulutunda, elektronların, çekirdeğe oldukça yakın yörüngelerden daha aşağılara (dış ya da iç etkenlerle) atlaması sonucu ortaya çıkan elektromanyetik ışımlar olup, bunların dalga boyları 0,01 ile 10 nanometre arasında. Bunlar da gama ışınları gibi yüksek enerjili girici ışınlar olup, gamalardan tek farkları atom çekirdeklerinden değil, atomların iç elektron kılıfından salınmaları (Şek.1).

Radyasyon ve enerjisi: Işık, ısıma, ışıma, ışıma, elektromanyetik dalga ya da hızlı parçacık akımı (Şek.1). Elektromanyetik dalganın enerjisi, ν frekansıyla, h Planc katsayısının çarpımına eşit: $E = h \cdot \nu$ ($h = 6,62608 \cdot 10^{-34}$ Joule $\cdot$ saniye) Şekil 1'in sol sütunundaki frekanslar, Planc katsayısıyla çarpılarak sağ sütundaki enerji değerleri bulunmuştur.

Radyasyon enerjisi birimi (eV): 1 Elektron Volt (eV), bir elektronun 1 voltluk bir potansiyel farkı altında kazanacağı kinetik enerji miktarı. Bir elektron volt çok küçük olduğundan, bunun bin katı olan "kilo elektron volt" (keV) ve milyon katı olan "Milyon elektron Volt" (MeV) çok kullanılır. Atom çekirdeklerindeki dönüşümlerde ortaya çıkan enerjiler pratikte çok küçüktür (Şek.5):

Enerji birimi: 1 eV=1,6 $\cdot$ 10⁻¹⁹ Joule(J); 1 J=6,24 $\cdot$ 10¹⁸ eV; 1 J=10⁷erg=1 Nm (Newtonmetre)=1 Ws (Wattsaniye)
Kuvvet birimi: 1 Newton=1kg $\cdot$ 1m/s²;
1 J=0,239 cal (Kalori)

Aktivite, Radyoaktivite: Radyoaktif bir maddenin yayınladığı ışınlar yoluyla gösterdiği etkinliğe radyoaktivite, ya da aktivite diyoruz. Radyoaktivite ölçüsü, radyoaktif bir maddenin atom çekirdeğindeki zaman birimindeki parçalanma / bozunma sayısı olup birimi Becquerel (Bq)².

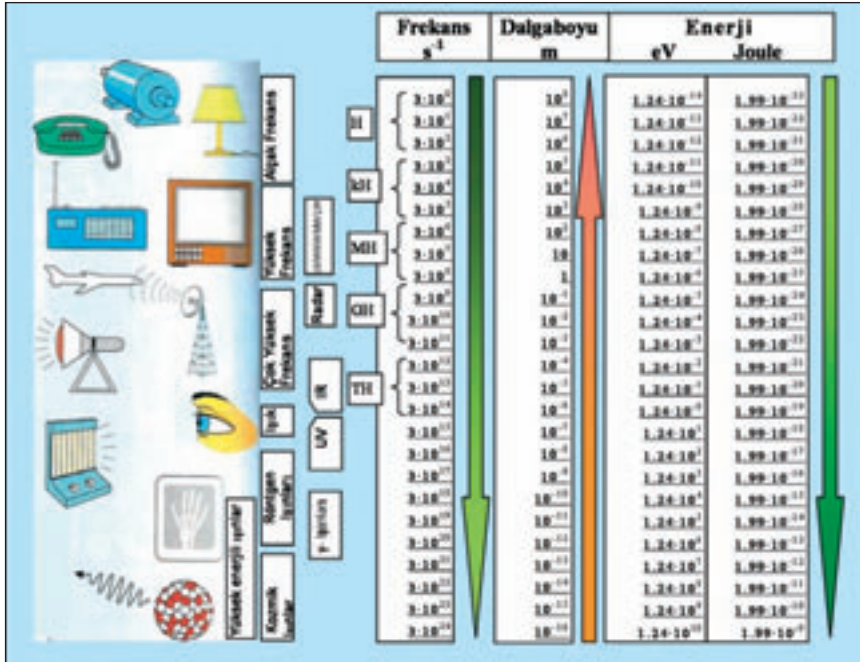
1 Bq = 1 adet çekirdek parçalanması / 1 saniye
Eski birim: 1 Curie: Saniyede 3,7 $\cdot$ 10¹⁰ adet çekirdek bozunması

İyonlayıcı ışınlar³: Yazının giriş bölümüne bakınız.

İyon Çifti: Örneğin bir gama fotonunun havadaki bir azot atomunun dış yörüngesinden bir elektron sökmesi sonucu, serbest bir elektronla, geriye bir elektronu eksik bir azot atomu (iyonu) kalmasıyla oluşan 'iyon çifti'

Radyoaktif madde/ Radyozotop / Radyonüklid: Bir elementin atom çekirdeklerinde aynı sayıda proton ve farklı sayıda nötron bulunduğu, bu çeşit atomlar o elementin izotopları adını alıyorlar. Çekirdeklerindeki nötron fazlalığı sonucu izotopların çoğu 'kararsız' olduklarından radyasyon (ışın) salıp bozunarak başka izotoplara dönüşüklerinden bu çeşit maddelere 'radyoaktif madde' (örneğin Radyum,

TEHLİKE? İYON VE SAĞLIK RİSKİ?



Şekil 1: Çeşitli ışınların frekans, dalga boyu ve enerjilerine göre yayılımı (spektrumu). Dalga boyu frekansla ters orantılı olduğundan, ışınların frekansı artarken dalga boyunun azaldığı görülmektedir. Yüksek enerjili iyonlayıcı ışınlar, Şekilde alt bölümdedir.

Kozmik ışınların, topraktan sızan radyoaktif radon gazının ve daha birçok doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının insana etkileri, Japonya'da 1945 yılında atılan iki atom bombasından ışınlanmalarına karşın kurtulan ve sayıları yüzbini geçen insan üzerinde son 60 yıldır yapılan çalışmalar, Çernobil kazasının etkileri, uluslararası ilgili kurumların özellikle radyasyonun etkisiyle oluşabilecek kanser çalışmalarının sonuçları ve belirlemeleri, bunların bugünkü bilimsel düzeyin elverdiği ölçüde değerlendirilmesi, alçak dozlarla ilgili yaklaşımlar, belirsizlikler ve daha birçok konu Bilim ve Teknik'in bu ekinde ayrıntılarıyla yer alıyor. Ekteki örnek ve veriler, 20 kadar nükleer santralin 35 yıldır güvenle çalıştığı ve çevredeki insanları etkileyebilecek hiçbir nükleer kazanın olmadığı Almanya'da yapılan çalışmalara dayanıyor. Bu çalışmaları ve sonuçları, Almanya'da 30 yıldan çok radyasyon fizikçi dalında çalışan bir kişinin kaleminden yansıtıyor.

Uranium), ve bunların belirli örnekleri de 'radyoizotop' ya da 'radyonuklid' (örneğin Ra 226, U 235) adını alıyorklar. 110 kadar elementin toplam 2500 kadar izotopu var ve bunların 250 kadarı 'kararlı', diğerleri kararsız. (Kararlı izotop: Radyoaktivite özelliği göstermeyen ya da ışın salmayan atom çekirdeği)

Temel parçacıklar: Proton, nötron ve elektronlar, bugün bilinen ve sayıları 300'e varan temel (elementer) parçacıklardan olup, maddenin temel yapısını oluştururlar. Bunlar radyoaktif bozunma sırasında ortaya çıktıkları gibi, kozmik ışınlarda ve yapay çekirdek tepkimeleriyle de ortaya çıkıyorlar. Temel parçacıklar, adlarının tersine, değişmez olmayıp, bunların çoğu doğal ya da yapay yollarla başkalarına dönüşerek yok olabilirler.

Pozitron: Artı yüklü elektron.

Atom çekirdeğinde bir protonun nötrona dönüşümü sırasında ortaya çıkıyor.

Nötrino: Son derece küçük kütleli ve elektriksel yüksüz enerji parçacıkları (kuanta) olup, atom çekirdeklerinin eksi ya da artı beta bozunumu sırasında nötronun protona ya da protonun nötrona dönüşümünde ortaya çıkıyorlar ve maddeyle etkileşmediklerinden giricilikleri çok fazla. Kolay yakalanamadıklarından kanıtlanmaları güç. Örneğin dünyayı hızla döşen 1 milyon nötrinodan sadece bir adedi maddeye soğurulabildiğinden bunların organizmaya bir zararı dokunmuyor.

Yarılma süresi (T_{1/2}) (fiziksel): Belirli miktardaki bir radyoaktif maddenin, parçalanması sonucu yarıya inmesine kadar geçen süre. Örneğin:

¹³¹I (İyot ¹³¹)'ın yarılma süresi: 8,02 gün
¹³⁷Cs (Sezyum 137)'nin yarılma süresi: 30,17 yıl
²³⁵U (Uranium 235)'in yarılma süresi: 704 · 10⁶ yıl

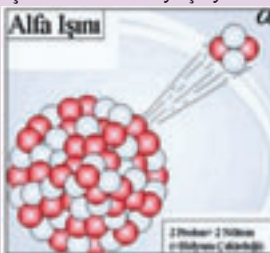
Biyolojik yarılma süresi T_{1/2} (Biy) Etkin Yarılma

lanma Süresi: Vücutta, ilgili organda birikmiş olan radyoaktif madde miktarının yarisının, biyolojik yollarla vücuttan atılmasına kadar geçen süre. Örneğin: ¹³⁷Cs (Sezyum 137)'nin biyolojik yarılma süresi tüm vücut için 70 gün, kaslar içinse 140 gün.

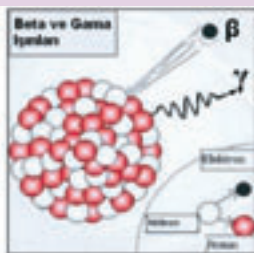
Biyolojik yarılma süresi sabit değil. Tüm vücut ve çeşitli organlarda farklılık gösterdiği gibi, insanın yaşıyla da değişim gösteriyor. Ayrıca vücut bir elementin radyoaktif olmasıyla olmayana arasında bir ayırım yapılmadığından, örneğin 70 günlük süre, Sezyum izotoplarının tümü için geçerli. 'Etkin Yarılma Süresi', belirli bir radyoizotopun fiziksel ve biyolojik yarılma sürelerini birlikte hesaba katarak, o izotopun vücutta yarılmasına kadar geçen süreyi aşağıdaki bağıntıyla gösteriyor:

$$1/T_{1/2}(\text{Etkin}) = 1/T_{1/2}(\text{Fiz}) + 1/T_{1/2}(\text{Biy})$$

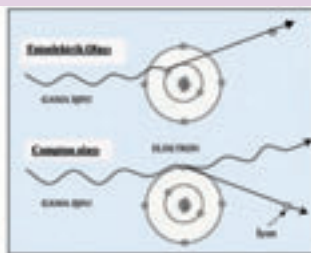
Fotoelektrik ve Compton olayları: Gama ışınlarının maddeyle etkileşmesinde özellikle Fotoelektrik ve Compton olayları etkin oluyor. Şekil 4'teki gibi gama ışınlarının, atomların kılıflarındaki elektronlarla etkileşmeleri bu olayları yaratıyor. Ayrıca, enerjisi 1,02 MeV'u aşan bir gama ışını, bir atom çekirdeğinin elektriksel alanının etkisiyle bir elektron ve pozitrona dönüşerek ortadan kayboluyor (çift oluşumu olayı). Ancak tüm bu olayların ortaya çıkma olasılığı oldukça az olduğundan, gama ışınları madde içinde etkileşmeden epey uzun yol aldıktan sonra frenlenebiliyor. Bu olaylar sonucu enerjileri artan elektronlara başka atomlarla etkileşerek enerjilerini yitiriyorlar.



Şekil 2: Alfa ışını, 2 proton ve 2 nötrondan oluşan Helyum atomu çekirdeğidir.

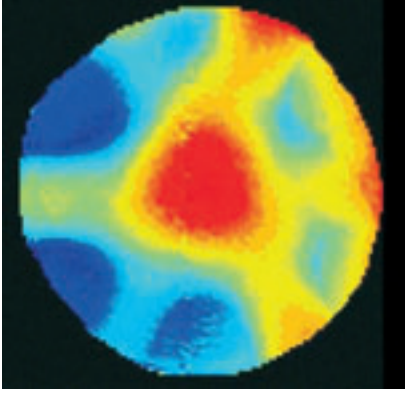


Şekil 3: Atom çekirdeklerinden salınan Beta ve Gama ışınları



Şekil 4: Fotoelektrik ve Compton olaylarıyla Gama ışınlarının enerjilerini maddeye aktarması

RADYASYON DOZ



İyon Dozu: Birimi =>Röntgen (R)

Röntgen (R), iyonlayıcı ışınların yolları boyunca her kilogram havada ürettiği elektriksel yük miktarından oluşuyor.⁴

1 R = 2,58 · 10⁻⁴ Coulomb/1 kg hava (t= 0°C derece ve p=1013 hPa için). Röntgen birimi sadece hava için kullanılmakta. Röntgenin binde biri: 1 mili Röntgen (mR); ve saatteki doz hızı: mR/h; 1 Röntgenin milyonda biriyse 1 mikro Röntgen (μR) olup, bu türeme birimler, havadaki radyasyon dozhızı ölçü aletlerinde çok kullanılmakta.

Enerji Dozu: Birimi => Gray (Gy)

Radyasyonun, sadece havaya değil, herhangi bir maddeye aktardığı enerjiyi gösteren, soğurma dozu olup birimi

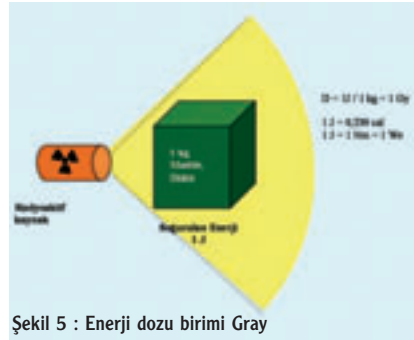
Gray⁵.

1 Gray herhangi bir maddenin kilogramı başına 1 Joule enerji soğurumuna eşdeğer:

1 Gy = 1 J/kg madde (örneğin vücut dokusu). Bk.Şek. 5.

Eski birim: rad => radiation absorbed dose (radyasyon soğurma dozu): 1 rad = 0,01 Gray

1 Joule'luk bir enerji, pratikte çok küçük. Alışılmış 1 kalorinin dörtte biri bile değil. Örneğin 100 gramlık bir çukolata paketini yerden 1 metre yukarı kaldırdığımızda yaptığımız iş nedeniyle vücudun yaktığı enerji 1 Joule'e denk geliyor. Buna eşdeğer enerji, iyonlayıcı ışınlarla vücuda aktarıldığındaysa, hücrelerin içindeki molekül ve atomlarda oluşan iyon çiftleri, hücrelerin çalışma düzenlerini etkile-



Şekil 5 : Enerji dozu birimi Gray

yip vücutta hasar ortaya çıkarabildiklerinden, önemli oluyor. Bu nedenle, bu değerin çok altındaki radyasyon dozları, insan vücudu için üst sınır değerler olarak ülkelerin radyasyondan korunma yönetmeliklerinde yer alıyorlar.

Eşdeğer Doz: Birimi => Sievert (Sv)

Eşdeğer doz, iyonlayıcı ışınların biyolojik etkinliğinin bir ölçüsü. Vücutta aynı 'enerji dozunu' oluşturan α, β, γ gibi iyonlayıcı ışınlar vücuttaki doku ve hücrelerde farklı bozunmalara (hasarlara) yol açıyorlar. Örneğin, kütleleri büyük Alfa'lar deriyi geçerken enerjilerinin büyük bir bölümünü ya da tümünü dıştaki hücrelere aktararak bunlarda bozunmaya neden olabiliyor. Bu nedenle alfaların hücrelerde oluşturduğu 'iyonizasyon yoğunluğu' çok büyük olduğundan, 'sık ya da yoğun iyonlayıcılar' olarak da adlandırılıyorlar. Aynı enerji dozunu (Gy) oluşturan Beta'larsa, kütlelerinin çok daha küçük olmaları sonucu, daha derinlerdeki hücrelere kadar girebildiklerinden, enerji soğurumu, yolları boyunca birçok hücrede oluyor. Betalara, bu nedenle 'seyrek iyonlayıcılar' deniyor. Böylece hücre başına düşen enerji soğurumu (ya da iyonizasyon yoğunluğu) azalıyor ve bunun sonucu olarak hücreler daha az bozunmaya uğru-

Aktiviteden Doz Hızına, Doz ve Risk Hesaplarına Geçiş İçin Bir Hesaplama Örneği

Fotoğraf filmi üzerine düşen bir ışın demeti, filmi güneşli ya da kapalı bir havada çok ya da az karartır. Aynı şekilde birim alana saniyede çarpan tanecik (foton) sayısı (ya da ışın demetinin akısı) çoğaldıkça, çarptığı yüzeye, örneğin vücuda daha çok enerji aktarılacağından, etki ve dolayısıyla genellikle hasar da büyüyor. Örneğin 100.000 Bq'lik noktasal bir Cs 137 kaynağı, %92 olasılıkla 0,662 MeV'luk gama ışınları (fotonları) yaydığında, kaynaktan 40 cm uzaklıktaki bir insanın vücuduna çarpan ışın demetinin akısı (Noktasal kaynağın bir kürenin merkezinde bulunduğu ve yaydığı ışınların r yarıçaplı kürenin tüm iç yüzeyine doğru yayıldığı gözönüne alınarak): 100.000 (parçalanma/saniye) · 0,92 γ/4πr² = 100.000 · 0,92/4 · 3,14 · 1600 = 4,58 γ/cm²s Noktasal kaynaktan r=40 cm uzaklıktaki bir

insanın vücut yüzeyinin cm²'sinin saniyede hedef olduğu enerjiyse: 4,58 γ/cm²s · 0,662 MeV=3,03 MeV/cm²s

Ancak, vücut yüzeyinden vücuda giren her bir gama ışını vücutta soğurulmadığı için vücutta sadece belirli bir miktar enerji aktarır. Vücudun her cm derinliği başına enerjilerini bir miktar aktararak soğurulan gamaların oranının hesabına katılması gerekir ki, bu da 'lineer toplam enerji soğurma katsayısıyla (μ) veriliyor (Bu enerjideki gamalar ve vücut için μ= 0,032 /cm).

Buradan vücudun cm³'ne 1 saniyede aktarılan enerji ya da doz hızı: 3,03 MeV/cm²s · 0,032/cm= 0,096 MeV/cm³s; 1 saatteyse: 0,096 · 3600s/h = **345 MeV/cm³h** ya da enerji doz birimlerinde:

1 Gy = 1 J/kg = 6,242 · 10¹² MeV ve **1 MeV = 1,6 · 10⁻¹³J** (Birimler Tablosuna

ve Şekil 5'e bakınız)

$$D_{\text{hızı}} = 345 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/cm}^3 \text{ h}$$

$$= 0,55 \cdot 10^{-10} \text{ J/cm}^3 \text{ h ve 1 Gy}$$

= 1J/kg ve vücut dokusu yoğunluğu da 1 g /cm³ alınarak

$$D_{\text{hızı}} = 0,55 \cdot 10^{-7} \text{ Gy/h} = 0,055 \text{ } \mu\text{Gy/h}$$

Noktasal radyasyon kaynağının aktivitesi örneğin 20 kat daha büyükse (20·10⁵ Bq): 40 cm uzaklıktaki doz hızı: 1,1 μGy/h olur.

Radyoaktif kaynaktan 10 cm uzaklıktaki enerji doz hızı hesaplanmak istenirse, dozhızı 40²/10² =16 kat daha büyür: 17,6 μGy/h (10cm uzaklıktaki vücutta)

Noktasal kaynak yerine, dikdörtgen bir 'plaka-kaynak' alınırsa (yapılan yaklaşık hesaplara göre) doz hızı 3 kat kadar artıyor: **50 μGy/h** (10cm uzaklıktaki vücutta)

DOZ VE BİRİMLERİ

yor. Buradan Alfa'ların '**biyolojik etkinliğin**', Beta'lara göre çok daha büyük olduğu görülüyor. Bu biyolojik etkinliği gözönüne alan '**kalite katsayıları**', iyonlayıcı ışınların cinslerine göre Uluslararası Radyasyon Güvenlik Kurulunca (ICRP) belirleniyor:

Beta ve Gama'lar için: 1, Alfa'lar için 20
Yüksek enerjili proton ve nötronlar için (enerjilerine göre): 5 ile 20 arası Bunun sonucu olarak 'Biyolojik Etkinliği' de hesaba katan eşdeğer doz (H) kavramı ortaya çıkmıştır ki bu da Gy cinsinden enerji dozunun, kalite katsayısıyla çarpımından başka bir şey değildir: $H (Sv) = \text{Enerji Dozu (Gy)} \cdot \text{Kalite Katsayısı (q)}$.

Kalite katsayısının birimsiz olmasına karşın, 'Enerji Dozuyla' 'Eşdeğer Dozu' ayırmak için, Eşdeğer doz ⁶ (H) birimi olarak Gray yerine **Sievert** ⁷ seçilmiştir.

Sievert'lik dozlar hücreler için büyük dozlar olduğundan daha çok **mSv** ve **μSv** kullanılıyor:

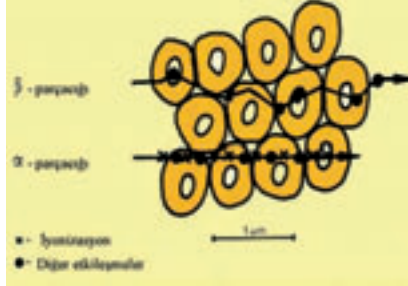
1 mSv = 10⁻³ Sv ; 1 μSv = 10⁻⁶ Sv.

Eski birim 1 rem (rad equivalent man) = 0,01 Sievert ; 1 Sv = 100 rem

Şekil 6 beta ve alfaların, hücrelerle etkileşmelerini gösteriyor.

Etkin Doz: Birimi => Sievert (Sv)

Vücudun çeşitli organ ve dokularının



Şekil 6: Beta ve alfaların hücrelerle etkileşmesi. Şekilde, Alfa ve Beta'ların, dokudaki izleri kabaca gösterilmiştir. Betalar bir hücreyle sadece bir adet etkileşirlerken, aynı enerjideki Alfaların etkileşmesi bin adet dolayındadır.

radyasyona duyarlılığı farklı olduğundan, bunları karşılaştırabilmek ve vücudun tümünün etkilendiği dozu belirleyebilmek için 'Etkin Doz' kavramı türetilmiş. Etkin doz, bir organ ya da doku için 'eşdeğer dozun', o dokunun radyasyona duyarlılığını gözönüne alan 'ağırlık katsayısıyla' çarpımından oluşmakta ve birimi eşdeğer doz birimiyle aynı: Sievert. 'Etkin doz' ile, 'herbir organ ve dokunun' ya da 'tüm vücudun' ışınlaması durumunda, ortaya çıkabilecek 'rastgele hasar riski' gözönüne alınmış olur. Böylece ağırlık katsayıları, ışınlanan ilgili organların ya da dokuların tüm vücuttaki rastgele hasar riskine olan katkılarını gösterir.

Uluslararası Radyasyon Güvenlik Kurulunca (ICRP 90-Raporuna göre) belirlenen Doz Ağırlık Katsayıları:

Üreme organları	0,20
Göğüs	0,12
Kemik iliği	0,12
Ak ciğerler	0,12
Kemik yüzeyi	0,01
Tiroit bezi	0,05
Arta kalan vücut	0,30

Tiroid bezi için olan 0,05'lik ağırlık katsayısının anlamı, örneğin 1 Sv'lik tiroit dozunun tiroitteki kanser oluşturma riskiyle, 0,05 Sv'lik Tüm Vücut Dozunun vücutta başlatabileceği kanser riskinin kabaca aynı olması ($1 \text{ Sv} \times 0,05 = 0,05 \text{ Sv}$).

Vücuttaki herbir organ ve doku için ilgili ağırlık katsayısının eşdeğer dozla çarpılıp toplanmasıyla tüm vücut 'Etkin Dozu' bulunuyor. Tüm vücudun homojen olarak ışınlaması ya da organ ve dokuların ayrı ayrı ışınlaması sonucunda eğer aynı 'etkin doz' elde edilmişse, aynı hasar riski var demektir.

Topluluk dozu (Kollektif doz)

Bir topluluğun tümünün ışınlamasında, kişi başına alınan dozun o topluluktaki insan sayısı ile çarpımı sonucu hesaplanan doz. Topluluk dozu, radyasyon risk hesapları için önemli (Son bölümlere bakınız).

Bu doz hızı vücuda 1 saate aktarılan γ-dozu olup örneğin günde kabaca 10 saat bu radyasyon kaynağına hedef olan bir kişinin alacağı doz **500 μGy/h = 0,5mGy** ve 300 günde de 150 mGy olur. Gama ışınları için Kalite Katsayısı 1 olduğundan Gray yerine Sievert (Sv) alınarak Toplam Eşdeğer Doz olarak 150 mSv buluruz (300 günde alınan doz)

Kitle ışınlaması örneği: Yukardaki dozu örneğin 100.000 kişilik bir kitleden her biri almışsa: $150 \cdot 100.000 = 15 \cdot 10^6$ kişi $\cdot$ mSv = 15.000 kişi $\cdot$ Sv ve 0,05/Sv kanser risk katsayısı hesaba katıldığında $15.000 \cdot 0,05 = 750$ kişi elde edilir ki bu 100.000 kişilik kitle içinden rastgele 750 kişinin kansere yakalanıp ölebileceği anlamını taşır.

Bu yaklaşık hesaplama yöntemi, 1986/1987 yıllarında çay çuvallarını sırtlarında taşıdığı düşünülen işçilerin, vücut dışından ışınlama yoluyla hasar ris-

ki düzeyini gösteren bir örnek olabilir (20kg çay çuvalı ve yukarda verilen toplam radyoaktivite öngörülerek). Çok daha gerçekçi hasar riski hesaplaması, ancak işçilerin çalışma koşulları ve sürelerinin, gerçeğe uygun radyasyon kaynağı geometrisi ve daha ayrıntılı bilgisayar programlı hesaplarla birlikte, hem çay çuvalarından ve hem de çay bahçe, toprak, 'fabrika çay taşıyıcı bandları' ve depolarından yayılan ışınların ve buralardaki işçilerin geçirdiği yaklaşık sürelerin hesaba katılmasıyla yapılabilir ki, bu bir 'mühendislik tezi olabilecek' kapsamda araştırma çalışması olabilir. Ayrıca, insan vücudu için tüm hasar riski hesaplanırken, vücut içi



ne sindirim ve solunum yoluyla alınan radyoaktif maddelerin vücutta oluşturduğu dozların, hesaplanan dış radyasyon dozlarına eklenmesi de gerek-mekte. Diğer yandan çaydaki radyoaktivitenin sabit kalmayacağı, hem çeşitli çay örneklerinde ve günlerde farklı değerler alacağı ve hem de aktivitesinin radyoaktif parçalanmayla zamanla azalacağı

gözönüne alındığında hasar riskinin, yukardaki kaba hesaplamayla bulunan sonuca uymayacağı da açık. Bu nedenle yukardaki hesaplama, okurlara bu konuda bugün izlenen yaklaşık yöntemi formül kullanmadan, radyasyon fiziği temel kavramlarıyla mantık sıralamasıyla açıklamak için sadece bir örnek niteliğinde.

DOĞAL RADYASYONLAR VE İNSANDA OLUŞTURDUĞU DOZLAR

Kaynağı doğada olan radyasyonlar, Güneş'ten, yıldızlardan gelen kozmik ışınlarla yer kabuğunda (taşta, toprakta, havada, suda, bitkilerde ve tüm canlılarda) bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonlardır.

Kozmik ışınlar: Güneş ve yıldızlardan kaynaklanan yüksek enerjili kozmik ışınlar, daha çok (%93) hızlı protonlardan (hidrojen atomu çekirdeklerinden) ve daha az da (%6,3) alfa'dan (helyum atomu çekirdeklerinden) ve bir miktar da trityum ve karbon 14 çekirdeklerinden oluşuyor. Bunlar atmosferdeki hava molekülleriyle ve atomlarıyla çarpışarak yeni çekirdekler üretilip, enerjilerini gitgide aktararak azalır ya da yitirilirler. Bunun sonunda, kozmik ışınlardan ikincil ve daha sonraki bir dizi tepkimelerle üretilen protonlar, nötronlar, elektronlar, mezonlar, gamalar (fotonlar) gibi daha bir çok ışın, yeryüzüne ulaşmakta. Mezonlar, kütleleri elektronla proton arasında olan ve atom çekirdeklerindeki komşu parçacıklar arasında büyük bir hızla gidip gelen, çok kısa yaşamlı temel (elementer) parçacıklar. "Çekirdek Kuvveti" mezonların neden olduğu düşünülüyor. Yeryüzünde deniz düzeyindeki kozmik ışınların %90'ı mezonlardan oluşuyor. Ancak bunlar saniyeden çok çok daha kısa bir sürede bozunarak, elektriksel yüklerine göre ya bir elektronla ya da bir pozitronla⁸ birlikte iki nötrino⁹ yayıyorlar. 'Mezonların şiddeti', bir metre kalınlığındaki kurşunu geçerken bile ancak %50 azalıyor. Bu nedenle, mezonlar derin maden ocaklarında ve derin deniz diplerinde de ölçülmüşler. Kozmik ışınların şiddetinin, tüm bu olaylar sonucu atmosferin yüksek katlarından yer yüzüne doğru indikçe azalacağı açık. Deniz düzeyinden yükseldikçe, kozmik ışınların şid-

deti iyice artıyor: Her 1500 metrede iki katına çıkıyor ve dolayısıyla yüksek yerleşim yerlerinde oturanların, uçak personelinin, uzun uçuş yapan işadamlarının alacakları radyasyon dozu da artıyor. Deniz düzeyindeki bir yerleşim yerinde yıllık ortalama 0,25-0,3 mSv olan kozmik ışınlardan kaynaklanan radyasyon dozu, 3000 m'de 1,1 ve 10.000 m yüksekliğindeyse ortalama 44 mSv'e yükseliyor ki bu da saatte 0,005 mSv (=5 mikro Sievert)'lik bir doz hızı demek (Deniz düzeyindeki değerin 150 katına yakın). Bu nedenle kozmik ışınlardan uçak personelinin aldığı radyasyon dozları, nükleer reaktörlerde, nükleer tıpta ve diğer nükleer araştırma merkezlerindeki personel gruplarının (radyasyonla uğraşanların) aldıkları yıllık ortalama dozların çok üstünde. Örneğin, Almanya'daki 30.000 kişilik uçak personeli en çok radyasyon dozu alan grubu oluşturuyor.

Yerel kaynaklı¹⁰ radyasyonlar: Bunlar, insanın çevresindeki toprak, su, hava ve yapı malzemesi gibi daha birçok ortamda doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonlar. Yeryüzündeki doğal radyoaktif maddelerin çoğunun yarılanma süreleri kaba- ca yerküresinin jeolojik yaşı kadar (10⁹ yıldan çok) olmakla birlikte, bunlardan türeyen radyoizotoplar çok daha kısa yarılanma süreli. Ayrıca, yüksek enerjili kozmik ışınlar, atmosferin yukarı tabakalarında sürekli olarak yeni radyoaktif maddeler de üretmekte. Bunlar arasında özellikle trityum (³H) ve karbon (¹⁴C) radyoizotopları hava akımlarıyla ve çeşitli yağışlarla yeryüzüne inerler.

Yer kabuğunda bulunan önemli radyoaktif maddeler olarak toryum, uranyum-aktinyum ve uranyum-radyum dizilerindeki radyoizotoplar

sayılabilir ki, bunların tümü bir dizi radyoaktif bozunma (parçalanma) sonucunda kurşuna (Pb) dönüşerek, atom çekirdekleri kararlı duruma geçerek son bulurlar.

Şekil 7'de doğal radyonüklitlerin ortaya çıkışı, radyoaktif bozunmaları ve bunların yayılmaları gösteriliyor. Görüldüğü gibi, kozmik ışınların etkisiyle havadaki azot, oksijen, argon ve CO₂ gibi maddelerden, trityum ve C 14 gibi radyoizotoplar oluşmakta; bunlar, havadaki taneciklerle (aerosollarla) birlikte yeryüzüne serpilerek bitkiler ve hayvanlar yoluyla ya da doğrudan insana ulaşmakta. Diğer yandan topraktaki doğal potasyumdaki K 40 radyoizotopu, besinler yoluyla insan vücuduna girerek insanı içten ışınıyor. Ayrıca, yer kabuğundaki, uranyum ve toryum dizilerinden radyoaktif bozunma yoluyla oluşan radon ve toron asal gazları içindeki Rn 222 ve Rn 220 (Toron) radyoizotopları, atmosferde yükselip, yine radyoaktif bozunmayla kurşun ve vizmut gibi uzun yarılanma süreli izotoplara dönüşmekte. Bunlar da havadaki taneciklere tutunarak tekrar yer yüzüne yağış ya da kuru serpintilerle inerek besinler yoluyla, ya da doğrudan insanı ışınlamaktalar.

Evlerin tabanındaki çeşitli çatlak ve yarıklardan, boru kanallarından bodrum katına ve oradan da daha yukardaki katlara, topraktan sızıntılarla ulaşan radon gazı içindeki radyoizotoplar (Rn 222 ve Rn 220), özellikle havalandırması az olan evlerde oturanları solunum yoluyla ışınlıyor. Radon'un katkısı, insanın sürekli etkilendiği 'toplam doğal radyasyon dozunun' önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Aşağıdaki Çizelge 2'de kozmik ışınların ve doğal radyoizotopların vücudu dıştan ve içten

RADYOAKTİF ATIKLAR

Nükleer teknik, nükleer tıp, endüstri ve araştırma merkezleri gibi, iyonlayıcı ışınlarla çalışmalarını yaptığı yerlerde ortaya çıkan ve artık kullanılmayan maddeler 'radyoaktif atıklar' adını alırlar. Bunların yaydığı ışınlardan insanların zarar görmemesi için güvenli bir şekilde etkisiz duruma sokulması gerekiyor. Radyoaktif atıklar radyoaktivitelerine ve radyasyon fiziki kurallarına göre plastik torbalı özel atık kutularında, varillerde toplanıyor, arındırma ya da depolama yerlerine 'kapalı varillerde' sızdırma ve saçılmaya karşı ve başka ilgili tüm güvenlik önlemleri alınarak yollanıyor.

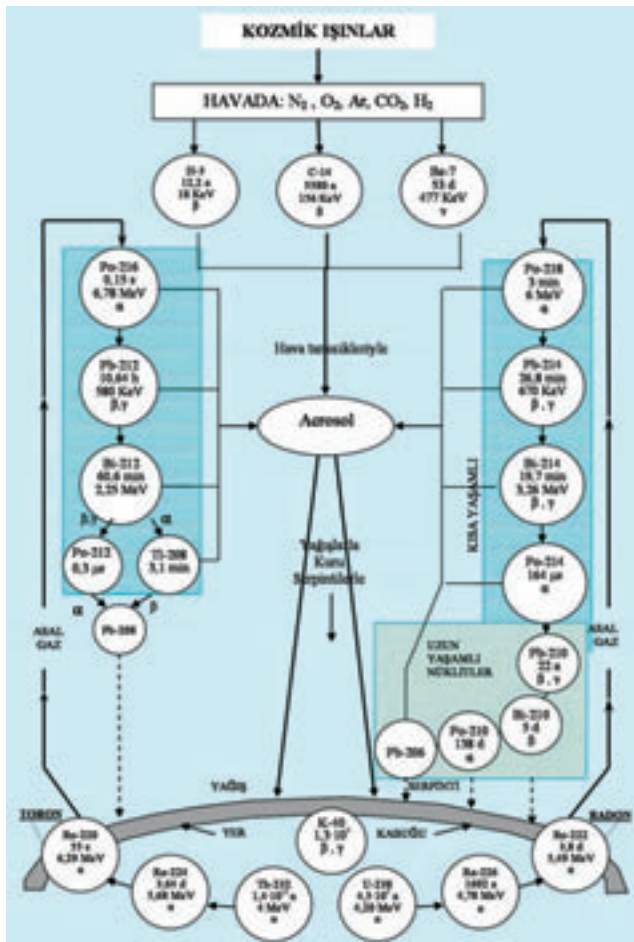
Miktar ya da hacim olarak Dünyadaki radyoaktif atıkların %80'i uranyum'un elde edildiği madenlerde ve ilgili üretim fabrikalarında ortaya çıkmakta ve atıklar bu madenler çevresinde depolanmakta. Atıkların diğer önemli bir bölümü nükleer elektrik santrallerinde, nükleer araştırma merkezlerinde, 'kullanılmış nükleer yakıt

elemanlarında/çubuklarında' arta kalan nükleer maddenin kazanımıyla ilgili arındırma tesislerinde ve askeri amaçlı atom silahları yapım yerlerinde ortaya çıkmakta. Radyoaktif atıkların hacim olarak çok daha az miktarıysa nükleer tıp, en-



düstri ve araştırma merkezlerinden kaynaklanmakta.

Radyoaktif atıklar, radyoaktivitelerine, taşıdıkları radyoizotopların cinslerine, fiziksel durumlarına ve ısı yaymalarına göre sınıflara ayrılarak ilgili teknik kurallara ve yönetmelikler çerçevesinde işleme sokuluyorlar. Radyoaktif atıklar çoğunlukla uluslararası standartlara göre 'zayıf', 'orta' ve 'yüksek' radyoaktiviteli atıklar olarak sınıflandırılıyor. **Zayıf ve orta radyoaktiviteli atıklar** kısa yarılanma süreli maddelerden oluşuyorlar. **Orta radyoaktiviteli olanlar** için ek zırhlı atık varilleri gerekiyor. Bunlar nükleer santrallerden, nükleer tıp ve araştırma merkezleriyle, endüstriden gelen makina parçaları gibi çok çeşitli atıklardan oluşuyorlar. **Yüksek radyoaktiviteli atıklara** örnek olarak, nükleer yakıt elemanları arındırma tesislerinden gelen maddeler ve camlaştırılmış nükleer parçalanma ürünleri sayılabilir.



Şekil 7 Doğal radyonüklitlerin oluşumu, radyoaktif bozunmaları ve yayılmaları. Kozmik ışınlar havadaki atom çekirdekleriyle çarpışarak radyoaktif H-3, C-14 ve Be-7 üretirken, yer kabuğundan yükselen radon ve toron gazları da havada radyoaktif bozunmayla bir dizi radyoizotoplar üretirler ve bunlardan en önemlileri olan polonyum ve kurşun yeryüzüne inerek insanı etkiler. Şekilde, sırayla oluşan herbir nüklid yer alamıyor.

ışınlanması sonucunda oluşan yıllık etkin ortalama doz değerleri (kişi başına) gösteriliyor. Görüldüğü gibi, tüm dünya için, toplam ortalama değer yılda 2,4 mSv. Bu değer, 70 yıllık ortalama yaşam süresinde 170 mSv (0.170 Sv)'lik yaşam boyu ortalama doğal radyasyon dozunu oluşturur. Bu

Atıkların konduğu varillerdeki toplam radyoaktivite, atıklardaki radyoizotopların cinsine göre sınırlandırılır, variller güvenli bir şekilde kapatılır, işaretlenir ve belirli depolara güvenlik önlemleri alınarak yolların.

1300 MW'lık (kaynar sulu) bir nükleer elektrik santralında bir işletme yılında ortaya çıkan radyoaktif atıkların miktarı yaklaşık olarak 210 m³ (%86) zayıf, 32 m³ (%13) orta ve 2 m³ (%1) yüksek radyoaktiviteli olabiliyor.

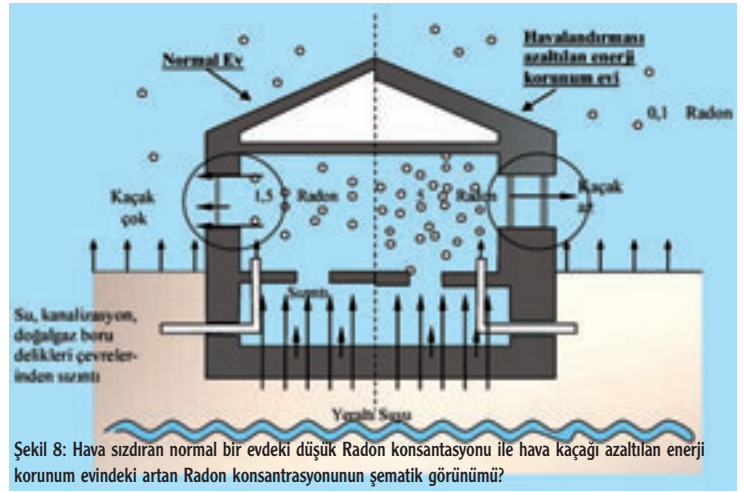
Radyoaktif atıklar daha çok katı maddelerden ve az miktarda da sıvılardan oluşuyor. Sıvı radyoaktif maddeler, depolanmadan ya da yeraltıta saklanmadan önce kimyasal olarak kararlı duruma getirilerek katı maddeye dönüştürülüyor. Radyoaktif gaz atıkları, çok az ortaya çıkmakta ve bunlar gaz halinde değil, fiziksel ve kimyasal olarak başka maddelerle kaynaştırılarak depolanıyorlar.

Nükleer santrallerde ortaya çıkan radyoaktif atıklar içinde uranyum 235'in nötronların bombardımanıyla parçalanmış sonucu oluşan Cs 137, I 131 gibi 'parçalanma ürünleri', önceden radyoaktif olmadığı halde çelik reaktör ka-

zani, pompa ve boru sistemlerinden kaynaklanan, reaktör soğutma suyundaki metal parçacıklarını nötronların bombardımanıyla oluşan Co₆₀ gibi 'korozyon ürünleri' önemli yer tutuyorlar. Ayrıca U₂₃₈'den nötronların etkisiyle bir miktar oluşan ve U₂₃₅ gibi bölünebilen Pu₂₃₉, reaktördeki yakıt maddesi kullanıldıktan sonra, yakıt elemanları içinde arta kalan U₂₃₅, Pu 239 ve Pu 241 ve Pu₂₃₉'a dönüşmeyen U₂₃₈ 'atık maddeler' gibi gözönüne alınıyorlar. Nükleer yakıt elemanları çubukları içindeki bu gibi maddeler, yakıt elemanları reaktördeki soğutma ve dinlendirme havuzlarında aylarca bekletildikten, ısı ve radyoaktiviteleri epey azaldıktan sonra, ilerde özel tesislerde arındırılıyor ve arta kalan madde ve malzemeler ilgili uygun yeraltı depolarında saklanıyor. Reaktörde kullanılmış yakıt elemanlarının, ilgili tesislerde işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek radyoaktivitedeki 'parçalanma ürünleri eriyikleri' cam ya da seramik içinde kaynaştırılıyor. Böylece bunların korozyona uğramaları ve suda çözünmeleri önlenmiş oluyor.

Doğal Radyasyon Kaynağı	Ortalama yıllık etkin doz (mSv)	Değişim/Salınım aralığı (mSv)
DIŞTAN IŞINLANMA		
Kozmik ışınlar	0,4	0,3 - 1,0
Yerel gama ışınları	0,5	0,3 - 0,6
İÇTEN IŞINLANMA		
Solumun (çokçaş Radon)	1,2	0,2 - 10
Sindirim	0,3	0,2 - 0,8
TOPLAM	2,4	1 - 10

Çizelge 2: Doğal radyasyon kaynaklarının oluşturduğu ortalama radyasyon dozları. Bu değerler dünya ortalaması olup, bölgesel değişim/salınım aralıkları görüldüğü gibi oldukça büyük (UNSCEAR 2000 yılı Bilimsel Raporundan)¹²



Şekil 8: Hava sızdıran normal bir evdeki düşük Radon konsantrasyonu ile hava kaçağı azaltılan enerji korunum evindeki artan Radon konsantrasyonunun şematik görünümü?

nun yarısı, yapılardaki doğal radyonüklitlerin (Rn 220 ve Rn 222) havaya ulaşması ve bunların solunum yoluyla insanı içten ışınlaması yoluyla oluşmakta. Doğal radyasyon dozundaki tüm dünya için değişim aralığı oldukça fazla olup, yılda 1 - 10 mSv arasında bulunuyor. Bu değişim, yaşanan yörenin yükseltisine göre kozmik ışınların katkısıyla, çevrenin doğal radyoaktivitesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin 1000-2000m yükseklikteki bir yerde kozmik ışınların katkısı, deniz düzeyindeki bir yerleşim yerine göre çok daha fazla. Ayrıca, çevredeki

madde ve malzemelerdeki (evlerin yapı malzemesi gibi) doğal radyoizotopların cins ve miktarının, bu dozların oluşumuna katkıda bulunacağı da açık. Diğer yandan, çeşitli yörelerdeki insanların yiyecek alışkanlıklarının değişik olması sonucu besinlerle vücuda giren radyoaktif madde cins ve miktarı da farklı.

Vücuttaki Radyoaktivite

İnsan vücudunun ortalama toplam radyoaktivitesi 9000 Bq kadardır. Vücuda solunum ve sindirim yollarıyla giren radyoaktif maddeler farklı organlarda farklı miktarlarda biriktiklerinden, radyoaktivite vücudun her yerinde aynı değil. Vücudun radyoaktivitesine katkıda bulunan önemli radyoizotoplar olarak, doğal radyoaktif maddelerden potasyum 40 (K40) ile evlerin havasındaki radon (Rn 220 =toron ve Rn 222), uranyum-radyum ve toron dizilerinden oluşan bozunum ürünleriyle yapay kaynaklı sezyum 137 radyoizotopu sayılabilir. Şekil 7, 8 ve Çizelge 2'de vücutta içten ışınlayan doğal radyoizotopların ortaya çıkış yollarıyla bunların insan vücudunda oluşturduğu içten ışınlama dozları ayrıntılarıyla görülmekte. Vücudun toplam içten ışınlama dozu, ortalama olarak yılda kişi başına 1,5 mSv olup bunun büyük miktarı radon ve torondan kaynaklanmaktadır.

Başka cins radyoaktif atıkların, durumlarına göre ilgili tesislerde kontrollü yakma ve sıkıştırma gibi uygun yöntemlerle, hacimleri iyice küçültülerek ve kimyasal olarak kararlı duruma getirilip suda çözünmeyen çimento ya da bitüm / asfalt gibi maddelerle kaynaştırılarak bunlar, önce reaktör alanındaki 'geçici depolarda' sonra da ilgili yeraltı 'sürekli saklama depolarında' saklanıyor. Bazı atıklardaki radyoaktivite binlerce yıl sürdüğünden, bunların konacağı yeraltı sürekli saklama depo yerlerinin seçimi büyük önem taşır. Böyle yerlerin hidrolojik ve biyolojik sistemle ilişkili olmaması, jeolojik yapının buna uygun olması, deprem bölgelerinden uzakta olması gibi özellikler, radyoaktif maddeli atıkların ilerde çevreyi etkilememeleri için zorunlu. Özellikle yeraltı tuz yataklarından arta kalan galerilerle, granit ya da tüf taşı içindeki yeraltı boşlukları gibi daha bir çok jeolojik yapının, uygun sürekli depo yerleri olup olmayacağı konusunda son 20-30 yıldır bilimsel ve teknik çalışmalar yapılmakta (Örneğin Kuzey Almanyadaki Gorleben'de 1979'dan beri bununla ilgili olarak çalışmalar sürmektedir).

YAPAY RADYASYON

Doğal radyasyonların yanı sıra, hızla ilerleyen teknolojinin getirdiği insan yapısı (yapay) radyasyon kaynaklarından da ışınlanmakta olduğumuzu biliyoruz. Bunlardan önemlileri:

- Nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintiler (fallout)
- 1986-Çernobil kazasından türeyen serpintiler
- Nükleer Reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler
- Tıpta uygulanan iyonlayıcı radyasyon kaynakları
- Bilim ve teknoloji uygulamalarında kullanılan iyonlayıcı radyasyon kaynakları
- Az da olsa iyonlayıcı ışınlar yayan televizyon gibi aygıtlar
- Çeşitli aygıtlarda kullanılan radyoaktif kaynaklar (Gece görünür saatler, Yangın duman uyarıcıları gibi)

Toplumda oluşan radyasyon dozlarına başta ki ilk dört kaynağın, daha alttakilere oranla çok daha fazla katkıları olduğundan, sadece bunlara burada biraz yakından bakalım:

Nükleer Bomba denemelerinden kaynaklanan serpintiler (fallout)

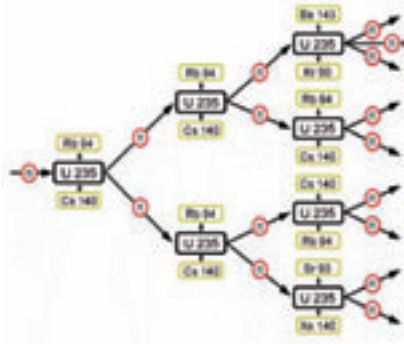
1945 - 1989 yılları arasında tüm dünyada 420 kadar yerüstü ve 1050 kadar da yeraltı Nükleer Bomba Denemesi yapıldı (Tümü açıklanmadığından tam sayı bilinmiyor). Patlama gücüne göre en etkinleri 1961 ve 1962 yıllarında olanlarıydı. 1963'ten beri ABD, İngiltere ve eski Sovyetler Birliği arasında yerüstü denemelerini durduran bir sözleşme yapıldı. Bu sözleşme dışında kalan Çin Halk Cumhuriyeti ve Fransa o zamandan beri 63 yerüstü denemesi yaptılar.

Nükleer bombalar, ya atom çekirdeklerinin parçalanması (Atom bombası; fisyon, çekirdek parçalanması daa diyoruz) ya da çekirdeklerin

çok yüksek sıcaklıkta kaynaştırılması (Hidrojen Bombası; füzyon, çekirdek kaynaşması) yöntemlerine dayanıyor.

Atom bombasında ya uranyum 235 ya da plutonyum 239 çekirdekleri parçalanırken/bozunurken ortaya çıkan nötronlar, başka çekirdekleri parçalıyorlar ve zincirleme tepkimeler sonucunda çok büyük bir enerji, ısı ve basınç dalgası olarak yayılıyor. Ayrıca birçok radyoizotop oluşup, bunlardan iyonlayıcı ışınlar ortaya çıkıyor. Çekirdek kaynaşmasındaysa ya döteryum (H_2) ya da trityum (H_3) nötronla kaynaşarak helyuma dönüşüyor ve atom bombasındakinden çok daha büyük bir enerji açığa çıkıyor.

Yerüstü nükleer bomba denemeleri sırasında ortaya çıkan radyoizotoplar, atmosfere ulaştıktan sonra, hava akımlarıyla dünyanın çeşitli bölgelerine yağışlarla ve kuru serpintilerle indiler.



Şek.9 : Uranyum 235 izotopu çekirdeklerinin nötronların etkisiyle ardışır bölünümü ve ortaya çıkan radyoaktif bölünme ürünlerinden bazıları (zincirleme tepkime)

Bunlar, yeryüzündeki toprak ve sulara bulaşarak insana solunum ve sindirim yollarıyla ulaşip vücudumuzu içten, ayrıca az da olsa bizi dıştan ışınıyorlar. Özellikle başlangıçta, dıştan ışınlanmaya, yarılanma süreleri oldukça kısa olan Zr 95 (64 gün), Nb 95, Ru 103, Ba 140 gibi radyoizotoplarla, çok daha uzun yarılanma süreli Cs 137 (30,17 yıl) olanlardan kaynaklanan gama ışınları önemli katkıda bulundular. Bugün bunlardan sadece Sr 90 (28,5 yıl) ve Cs 137 radyoizotoplarıyla insanın içten ışınlanması söz konusudur ki, bunlar su, süt, et, sebze ve meyvalar yoluyla insan vücuduna az da olsa bugün de girmektedir.

En yoğun nükleer bomba denemelerinin yapıldığı yıllar 1961/1962 yıllarıydı. O dönemden atmosfere yayılan radyoizotopların Avrupa'daki besinlerde ve insanda ortaya çıkması 1-2 yıl gecikmeyle oldu. Bugün bu yolla, vücut dışından ve içinden ışınlanma sonucu alınan toplam radyasyon dozu, yılda kişi başına 0,01 mSv'den daha az olup, bu değer, diğer ışınlanmalar yanında çok küçük kalmakta.

1986-Çernobil kazasından kaynaklanan radyoaktif serpintiler

26 Nisan 1986'daki Çernobil Nükleer Santral kazası, reaktör çalışırken yapılan bir deneme sırasında işletme personelinin büyük yanlışlarından kaynaklandı. Reaktöre soğutma suyu basan ana pompalar durdurulurken, kontrol çubukları da yukarı çekilerek reaktör kritik üstü duruma sokuldu. Kesinlikle uyulması gereken güvenlik uyarıları (sinyalleri) ekip tarafından etkisiz duruma sokuldu ve kaza ardi sıra iki patlamayla başladı. Kontrolsüz haldeki zincirleme nükleer tepkimeler sonucu bir anda çok büyük bir enerji ortaya çıkarak reaktördeki su buharlaştı ve reaktör

Tıpta Röntgen Işınları Uygulamaları:

Tanısal Radyoloji: Tıpta tanı (teşhis) amacıyla vücudun belirli bir organı ya da bölgesi röntgen ışınlarına tutuluyor. Röntgen ışınları maddenin yoğunluğuna göre az ya da çok geçirgen olduklarından, örneğin bir akciğer röntgeninde kaburga kemiklerinde daha çok tutulan (soğutulan) ışınlar, arkadaki bir filmde (ya da bir floresan ekranda), yanlarındaki daha az yoğunluktaki et dokulara oranla daha açık, silik bir görüntü oluşturuyor. Buradan ilgili organdaki önemli bir bozukluk, hasar ortaya çıkarılabiliyor (örneğin organ büyümesi, kaburga kırılmasında kırığın tam yeri ve büyüklüğü gibi). Tanı amacıyla yapılan tıptaki bu çeşit uygulamalarla insan vücudunda, tanının cins ve kapsamına göre, çok farklı radyasyon dozları oluşmakta. Röntgen ışınlarıyla yapılan bir akciğer tanısı sırasında deri yüzeyinde 1 mSv, kemik iliğinde 0,2 mSv ve üreme organlarında 0,01 - 0,03 mSv kadar oldukça düşük dozlar oluşurken, böbrekteki kan ve lenf dokularının incelenmesinde deri yüzeyinde 300 mSv, kemik iliğinde 10 mSv ve üreme or-

ganlarında 12 - 30 mSv kadar büyük dozlar vücudu etkileyebiliyor. Teknik ilerledikçe Röntgen aygıtları, daha az ışın saçarak, vücutta daha az doz oluşacak yönde gelişmekte.

Radyoterapi: Tıpta iyileştirme (tedavi) amacıyla vücut dokularında ortaya çıkan kötü huylu belirli bir ur (tümör gibi) röntgen ışınlarına tutularak öldürülüyor. Derindeki bir tümörü ışınlar-ken, aradaki sağlıklı dokuların da çok fazla radyasyonla öldürülmemesi için, röntgen ışınlaması gereğinden daha az şiddetlerde, farklı yönlerde



birkaç kez yapıyor. Böylelikle aradaki sağlıklı dokular bir kez ışınlanırken, tümör birkaç kez ışınlandığından aldığı yüksek radyasyon dozu sonucu öldürülebiliyor.

Bu çeşit ışınlamalarda hastanın ilgili organı, tanı amaçlı olanlara göre, kısa süreli daha büyük bir radyasyon dozu alıyor. Dozun büyüklüğünü, hasta hücrelerin öldürülebilmesi belirlemektedir. Örneğin, kanserli bir tümörün öldürülebilmesi için 30 - 100 Sv arasında değişebilen çok yüksek dozlar gerekebilir. Organ dozları olarak gerekli olan bu aşırı doz değerleri, tüm vücut ışınlanmasındaysa söz konusu olmuyor. Örneğin, 4 Sv'lik bir tüm vücut ışınlanması, bu dozu alan kişinin %50 olasılıkla, ölümlüyle sonuçlanabiliyor.

Almanya'da kişi başına yılda ortalama olarak iki röntgen ışınlaması, **'tanı amacıyla'** yapılmakta ve bunun sonucu olarak kişi başına ortalama etkin dozun yılda 1,5 mSv olduğu hesaplanmaktadır. Buysa 2,4 mSv'lik 'ortalama doğal radyasyon dozunun' % 62'i kadar. **İyileştirme**

ON KAYNAKLARI

silindirinin tavanı patlayarak binayı da çatıdan deldi. Bu sırada reaktörün gücünün bin kat arttığı sanılıyor. Yüksek sıcaklık nedeniyle reaktörün yakıt elemanları eridi ve bunların içindeki nükleer maddenin bulunduğu çubuklar patladı. Çok miktarda çeşitli radyoaktif madde santral içine, çevreye ve havaya bulaşarak yayıldı. Daha sonra da atmosferin 1-2 km yüksekliğine ulaşan radyoaktif maddeler, hava akımlarıyla önce Finlandiya'ya ve daha sonraki günlerde de Avrupa'daki birçok ülkeye ve Mayıs'ın ilk haftasında da Türkiye'ye ulaştı. Çernobilden salınan toplam radyoaktivitenin 10^{19} Bq olduğunu o zamanki Sovyetler Birliği yetkilileri açıkladılar. Rüzgarların yönlerine ve yağışların miktar ve sıklığına göre çeşitli bölgelerde toprağa ulaşan radyoaktif maddelerin miktarında bu nedenle büyük farklılıklar oldu. Bunlardan hava, toprak, bitki ve hayvan yoluyla insanı etkileyen önemli radyoizotoplar 8 günlük ve 30 yıllık yarılanma süreleriyle sırasıyla İyot 131 ve Cs 137) olmuştur.

Yeryüzüne inen Çernobil radyoaktivitesi sonucu çevrede ve epey uzaklarda yaşayan insanlarda ek bir radyasyon dozu oluştu. Yerleşim yerinin yağışlarla etkilenme durumuna göre doz değerleri çeşitli ülke ve bölgelerde büyük farklılık gösterdi.

Çernobil santral bölgesinde, kazanın ortaya çıkardığı yıkımları onarmak için uzun süre çalışmış olan 240.000 kişinin 100 mSv, çevreden boşaltılan 116.000 kişinin 30 mSv ve radyoaktif maddelerle bulaşmış çevrede oturmayı sürdürmüş olan kişilerin de ilk 10 yılda 10 mSv toplam doz aldıkları saptandı. Bunlar, kişi başı ortalama dozlar olup maksimum değerler 10 kat daha fazla olabilir. Avrupa ülkelerinde 1986 yılı için en



fazla doz kişi başına 0,1 mSv oldu. Bu değer daha sonraki yıllarda çok azaldı. Yaşamboyu dozununsa, 1986'daki dozun 2 ile 5 katı arasında olabileceği kestirilmekte. Buysa, doğal radyasyonla sadece bir yılda alınan ortalama 2,4 mSv'lik dozun çok altında. Bu nedenle 'genel toplum' için radyolojik etkisi belirgin değil.¹³

Almanya'da 1986'da yıllık doz, yetişkinler için 0,05 ile 1,1 mSv arasında ve küçük çocuklar için de 0,1 - 1,5 mSv hesaplandı. Tüm yaşam süresinde yetişkinlerin etkilenebileceği ek Çernobil

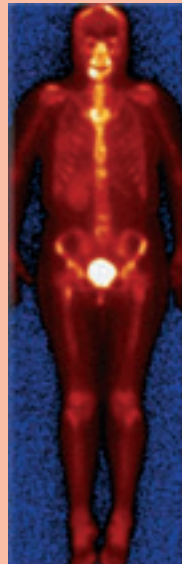
dozu, kuzey Almanya'da 0,5 mSv ve güney Almanya'da (güney Baviera'da) 6 mSv kadar. Küçük çocuklar için Baviera'da en çok 10 mSv'lik bir yaşam boyu dozu oluşabileceği hesaplanmış bulunuyor.

Bugün toprakta Çernobil kaynaklı sadece Sezyum(Cs 137) gitgide azalan miktarlarda var, diğer radyoizotoplar radyoaktif bozunmayla önemlerini yitirdiler. Bu yolla Almanya'da bir kişinin vücudunda oluşabilecek ortalama doz, 2004 yılında 0,01 mSv olarak hesaplandı

amacıyla yapılan röntgen ışınlamalarının genel toplumda oluşan ortalama doza katkısı, kişi başına sadece % 1 - 2 kadar.

Nükleer Tıpta Radyoizotop Uygulamaları

Nükleer Tıp'ta tanı amacıyla hastaya belirli bir radyoaktif maddeli karışım veriliyor (örneğin içirilir) ve bunun izleneceği organda toplanması sağlanıyor. Radyoaktif maddenin vücutta bulunduğu yerlerden yayılan radyasyonların, vücut dışından uygun aletlerle ölçümüyle, izlediği yollar ve yayıldığı dokular belirleniyor. Organın radyoaktif maddeyi alış hızından ve dokudaki konsantrasyondan gidilerek, organın normal çalışması ve organda herhangi bir tümör olup olmadığı sonucu çıkarılıyor. Hastaya verilen radyoizotopun olduğunca kısa yarılanma süreli olmasına, vücutta çok uzun süre kalmamasına ve yaydığı radyasyonun enerjisinin çok yüksek olmamasına özen gösteriliyor. Ayrıca bunların duyarlı ölçümlerinin yapılabilmesi için aletlerin bulundurul-



masının yanı sıra, ölçüm ve değerlendirme yol ve yöntemlerini bilen deneyimli kişilerin de bu işleri yürütmesi gerekiyor. Bu konuda hepimizin bildiği bir örnek, tiroitin iyi çalışıp çalışmadığıyla ilgili kontrol. Hastaya verilen belirli bir miktardaki radyoaktif I 131'in %90'ı birkaç saat sonra tiroit bezine toplanıyor. Geçen zaman süresince İyot 131 'in tiroitte birikme hızı ve biriken miktar, tiroitin düzenli çalışıp çalışmadığının bir göstergesi. Vücut dışındaki bir ışın sayacından (detektör) gelen sinyaller, gerekli elektronik aletlerden geçerek ekrana ve yazıcıya aktarılacak, örneğin tiroitin aşırı büyüklüğü gibi bilgiler resim ya da diyagram şeklinde elde edilmekte.

Yukarıdaki gibi tanı amacıyla I 131'in kullanılmasının yanı sıra, tiroit bezinde bir tümör varsa, İyot 131 hastaya daha yüksek miktarlarda verilerek ilgili tümör öldürülüyor. Radyoizotopun saldırdığı beta ışınlarının enerjileri fazla olmadığından,

fazla yol alamıyorlar ve tiroit bezinin içinde kalarak dışardaki dokularda bir hasar yaratmıyorlar.

Nükleer tıptaki tanı ve iyileştirme uygulamalarında ortaya çıkan radyasyon dozları çok yüksek olabilir. Örneğin, hastaya 2 MBq'lık I 131 uygulandığında, tiroitte oluşacak radyasyon dozu 1 Sv kadar. Ancak Nükleer Tıptaki bu çeşit uygulamaların sayısının az olması nedeniyle, tüm halkta oluşacak ortalama 'kollektif radyasyon dozu' çok az (Röntgen ışınlarıyla yapılan tanı uygulamalarından oluşan dozun sadece yüzde bir kaç kadar).

Almanya'da 2004 yılında iyonlayıcı ışınlarla ilgili işlerde çalışan 313.400 kişiden, (241.000'i tıpta olmak üzere) alınan toplam topluluk dozu: 42 kişi · Sievert. Bunların %80 kadarı herhangi bir doz almadıklarından (değerler dozimetrelerin duyarlılıkları altında kaldığından) sadece 51.500 kişi için **ortalama doz** hesaplanarak **kişi başına**: $42.000 \text{ kişi} \cdot \text{Sievert} / 51500 = 0,82 \text{ mSv}$ bulunmuş. Vücutlarının içten ışılandığı (vücut içine alınması yoluyla) 1284 kişi için 0,069 kişi·Sievert ve buradan da kişi başına ortalama içten ışınlama dozu olarak: $0,069 \text{ kişi} \cdot \text{Sv} / 1284 \text{ kişi} = 0,054 \text{ mSv}$ hesaplanmış.

(1986'daki ortalama değer: 0,07 mSv).

Türkiye'de Trakya ve Doğu Karadeniz bölgelerinde yaşayan insanların 1986 yılında etkilendiği radyasyon dozu, kişi başına 0,6 mSv ve Türkiye'nin diğer bölgelerindeyse 0,5 mSv olarak hesaplandı (TAEK verileri). Buradan, Türkiye ile Almanya genelinde 1986 yılı ortalama değerleri karşılaştırılırsa, Türkiye'deki Çernobil dozunun Almanya'dakinden 7 kat daha büyük olduğu basit bir hesaplamayla bulunur: $0,5 \text{ mSv} / 0,07 \text{ mSv} = 7,14$.

0,5 mSv'lik Türkiye değeri, Almanya değerine oranla 7 kat büyük olmasına karşın, bu değer sürekli olarak alınan doğal radyasyon dozunun %20'si (=0,5 mSv/2,4 mSv) ve özellikle röntgen ışınlanmalarının da katıldığı 'doğal ve yapay kaynaklardan oluşan toplam değer'in %13'ü (=0,5 mSv/4mSv) kadarını ve bu değerler sadece 1986 yılı için geçerlidir.

Ancak bu ortalama değerler, 1986'da aşırı radyoaktivitenin saptandığı bazı bölge ve yörelerdeki belirli topluluklar için geçerli değil. Örneğin Almanya'da çeşitli yörelerde belirli insan gruplarının Çernobilden ne ölçüde ışınlandığını ortaya koyan, sayıları 50'yi geçen araştırma kurum ve laboratuvarlarının yaptığı çok sayıda bilimsel çalışmalarda, özellikle güney Bavyera'nın bazı yörelerinde, ortalama değerlerin çok üstünde dozlar belirlendi. Türkiye'de bu konuda TAEK'in çalışma-

Doğal ve Yapay Radyasyon Dozlarının Karşılaştırılması

Tüm halk için, yapay radyasyon dozuna 2004 yılında en büyük katkı röntgen ışınlarıyla yapılan tıptaki 'Tanısal Radyolojideki' uygulamalardan kaynaklanmakta olup bunun ortalama değeri yılda kişi başına olmak üzere 1,5 mSv kadar. Çernobil'in ve diğer kaynakların yine yılda kişi başına olmak üzere toplam katkısıysa 0,1 mSv'in epey altında. Böylece Yapay Radyasyon kaynaklarının toplam katkısı 1,6 mSv ile Doğal Radyasyonun ortalama 2,4 mSv'lik katkısı toplandığında, halktan herhangi bir kişinin yılda ortalama olarak 4 mSv bir radyasyon dozu aldığı ve bunun $2,4/4 = \%60$ 'nın doğal radyasyondan, $1,6/4 = \%40$ 'nın yapay radyasyondan kaynaklandığı ve yapay radyasyon dozunun da neredeyse tümünün röntgen ışınları uygulamalarından (Tanısal Radyolojiden) ileri geldiği sonucu çıkıyor.

lar yaptığı biliniyor ve ayrıntılı bilimsel teknik raporların yakında halka açıklanacağı TAEK'ten öğrenildi.

Nükleer Reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler

Nükleer bir reaktör yapay radyasyon kay-

naklarının en büyüğü. Bir dizi güvenlik aygıtlarıyla ve önlemlerle, çelik ve beton gibi kalın zırhlarla, doğrudan ışınlama önleniyor. Kapalı devre ve sistemlerle de radyoaktif maddelerin, reaktör kazanıyla (silindiriyle), binanın çelik ve betonundan yapılmış 1 m kadar kalınlıktaki kılıfı ya da kabuğu (containment) içinde kalması sağlanıyor. Zenginleştirilmiş Uranyum 235 izotopunun kullanıldığı reaktörlerde, yavaş nötronlarla bombardımanla parçalanma (fisyon) sonucu olarak ortaya, biri daha ağır (Cs 140, I 131 gibi) diğeri daha hafif (Rb 94, Br 87 gibi) bir dizi radyoizotopla (parçalanma ürünleri) birlikte girici iyonlayıcı ışınlar çıkıyor. Sayıları 200'e varan yüksek aktivitedeki 'parçalanma ürünleri' 35 kadar elementin radyoizotoplarıdır (Şek.9).

Doğal Uranyumda U 235 radyoizotopunun oranı az (%0,7) olduğundan, nükleer santrallerde kullanılan zenginleştirilmiş uranyumda U 235'in oranı %3,5'a yükseltiliyor, kalanıysa (%96,5) nötronlarla bölünmeyen U 238'den oluşuyor. Reaktörde kullanıldıktan sonra, çok yüksek radyoaktivitesinin bozunmayla kendiliğinden azalması için uzun bir süre reaktör binasındaki 'dinlenme havuzlarında' bekletilen yakıt elemanları çubuklarında ('yanmış uranyum') ise, kabaca %95 U 238, %0,8 U 235, %0,9 Pu, %3,2 parçalanma ürünleri ve %0,1 kadar da reaktörde oluşan aktinidler (Çekirdeklerindeki proton sayıları 89 ile 109 arasın-

ÇEVREMİZDEKİ RADYOAKTİF

Doğal ve yapay radyasyon kaynakları alfa, beta ve gama ışınları salarlar. Bunlar insanı, ya dıştan ya da vücut içine girdiklerinde, vücuttaki dağılımlarına ve hangi organ ya da dokuda ne miktarda birikip ne süre kaldıklarına bağlı olarak vücutta içten ışınlarak radyasyon dozları oluşturur.

Örneğin, Çernobil'den hava akımlarıyla çeşitli ülkelere taşınan yağışlarla yeryüzüne inen radyoaktif maddeler, insanı "dıştan" ve "içten" olmak üzere iki yoldan ışınladılar. Radyoaktif maddeli taneciklerin, hava, toprak ve bitkilere bulaşması sonucu vücut dıştan ışınlarken, solunum ve sindirim yoluyla vücut içine taşınan radyoaktif maddeler de insanı içten ışınladılar.

Diğer yandan hava ve besinler yoluyla gövdemize yerleşen toplam 9000 Bq'lık doğal radyoaktif maddelerin içinde doğal potasyumdaki K-40 radyoizotopu, her insanda 4400 Becquerel'lik bir radyoaktivite oluşturuyor. Hücreler, bu gibi doğal radyoizotopların saldırdığı radyasyonlara karşı gerekli savunmayı yaparak kendilerini korumaktalar. Burada, vurgulamak yararlı olabilir: Belirli bir radyoizotopun doğayla, örneğin reaktörlerde üretilen yapayı arasında hiç bir fark bulunmuyor. İnsan vücudu her saniye, kendi içindeki ve çevresindeki doğal radyoaktif maddelerin saldırdığı 15.000 kadar radyasyona hedef oluyor.

Radyasyonun, vücuttaki biyolojik etkilerini daha iyi açıklayabilmek için Şekil 10 'da biyolojik organizasyon ve iletişim düzeyleri basitçe gösteriliyor.

Her düzeydeki hasarları oluşturan etkenler

şeklin sol yanında görülüyor. Herhangibir düzeydeki etken sonucunda, bu düzeyin hasar görmesi, diğer düzeyleri de etkilemekte. Örneğin, ev yıkılması sonucu organizmanın hasarı ya da ölümü, organ ve hücrelerin ani hasarı ya da ölümüyle sonuçlanıyor. Buna karşılık hücreleri oluşturan moleküllerdeki atomların, radyasyonların etkisiyle bozunumu, molekül, hücre, organ ve organizmada daha geç ortaya çıkan hasara neden olabilir.

İyonlayıcı ışınlar temelde atomlarla, atom çekirdekleriyle etkilenmekle birlikte, biyolojik sistemin bu ışınlarla karşı duyarlılığı ya da tepkisi her yerde aynı (homojen) değil. Farklılığın (heterojenliğin) nedeni, atom, molekül ve organ düzeyindeki biyolojik yapının karmaşık olması, her düzeydeki çok çeşitli görevler ve her düzeyin diğerleriyle iletişim halinde olması.

Bu nedenlerle, Şekil 10'daki aşağıdan yukarıya doğru olan düzeylerdeki hasarlar, radyasyon şiddeti aşırı derecede yüksek olmadığında, geç ortaya çıkıyor.



Şekil 10 : Biyolojik organizasyon ve iletişim düzeyleri.



Şekil 11: Radyasyonların vücuttaki hücrelerle etkileşimleri ve ortaya çıkabilecek hasarlar

Her düzeyde "özel bir hareketlilik ya da türbülans" var. Atom düzeyinde; atomlar kuantum mekaniği kurallarına göre bir araya gelerek molekülleri, bunlar da daha büyük molekülleri oluşturup ortaya yeni bilgilerle donatılmış düzeyler çıkıyor. Her yeni düzenleme (organizasyon) düzeyinde karmaşıklık artmakta ve biyolojik sistemin herhangi bir parçasının ne gibi bilgilerle donatılacağı önceden kestirilememekte.

Vücutun dıştan ya da içten ışınlaması sonucu vücutta hasarın oluşup oluşmaması neye bağlıdır, ya da hasar nasıl ortaya çıkmaktadır?

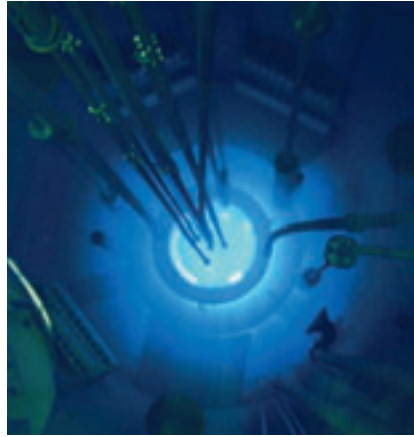
İyonlayıcı ışınların hücreyle etkileşmesi temelde iki yolla oluyor:

da olan 'yapay elementler') bulunuyor.

Diğer yandan reaktör soğutma suyu içinde bulunan ve çeşitli malzemelerden kaynaklanan metal parçacıklarının içindeki demir (Fe 59), reaktördeki yüksek nötron akısının bombardımanıyla Kobalt 60 başta olmak üzere bir dizi girici gama ışınları salan radyoizotopa dönüşür ki, bunlara 'korozyon ürünleri' diyoruz. Parçalanma ürünleri gibi bunlar da yoğun radyasyon kaynakları.

U 238 nötronlarla bombardıman edildiğinde bölünmüyor ama bundan bir miktar U 239 oluşuyor. Beta salan U 239 ise önce Np 239'a sonra o da beta salarak Pu 239'a dönüşüyor. Pu 239 ise U 235 gibi nötronların bombardımanıyla bölünabiliyor.¹⁴

Reaktörlerdeki çok çeşitli teknik ve yönetim sel önlemlerle, çalışanların etkilenebileceği radyasyon dozları azaltılarak sınırlanıyor (zırhlama, reaktör çalışırken bazı yerlere girmeme, radyasyondan korunma yol ve yöntemlerine kesinlikle uyulması gibi). Reaktör devre ve binalarındaki hava ve sular, önce ilgili aygıtlarla radyoaktif maddelerden büyük oranda arındırılarak ancak ölçümler yapıldıktan sonra kontrollü bir şekilde izin verilen sınır değerlerin çok altında kalınarak çevreye salınıyor. Böylece çevrede yaşayan halkın etkilenebileceği radyasyon dozu azaltılarak iyice düşürülüyor (Almanya'da sınır değer: hava



ve su için ayrı ayrı olmak üzere 0,03 mSv/yıl).

Bunun anlamı: Nükleer bir santraldan işletme sırasında çevreye yıl boyunca, arındırılarak, ölçümler yapıldıktan sonra kontrollü olarak salınan baca gazları ve atık sular içindeki son derece az radyoaktif maddeler ölçülüp, çevredeki toprak ve sulara ulaşan miktarlar önce hesaplanıyor. Sonra bu çok az miktardaki radyoaktif maddelerin topraktan ve havadan ne oranda, çevrede yetişen besinlerin yenilip içilmesi ve havanın solunması yollarıyla, insan vücuduna girdiği ve bunlardan ne büyüklükte dozlar oluştuğu hesaplanıyor.

Bu yapılırken baca gazlarının en çok etkileyebileceği rüzgar ve akarsu yönünde, santrale çok yakın bir yerleşim yeri seçiliyor. Baca gazları ve atık su yollarından herbiri için bir kişinin vücudunda oluşabilecek radyasyon dozunun 0,03 mSv'lik sınır değerinin altında kalınması gerekiyor. Ya da başka bir deyimle: Santralden çevreye verilecek atıklardaki radyoaktivite miktarı, yapılan ölçüm ve hesaplamalara göre o değerde olmalı ki, bu sınır değerler aşılmamasın.

Örneğin 2004 yılında Almanya'daki 20 kadar Nükleer Santralin herbirinin baca gazları yoluyla, (izin verilen aktivite sınır değerleri altında kalınarak) çevresine saldığı çeşitli radyoizotopların o yörede yaşayanların vücutlarında oluşturabileceği doz ortalama olarak 0,005 mSv olarak hesaplanmıştır. Bu doz değeri, yukardaki sınır değerinin %2'sinden de küçüktür. Çevredeki akarsulara verilen aktiviteleri çok düşük düzeydeki radyoaktif maddeler yoluyla 2004 yılında o yörede yaşayan halk için hesaplanan doz değeri ise: 0,0007 mSv. Su da, sınır değerinin %0,3'den de küçük.

Tıpta iyonlayıcı radyasyon kaynakları uygulamaları

Tıpta, tanı ve iyileştirme (tedavi) amacıyla Röntgen ışınları ve Radyoizotoplarla çok çeşitli uygulamalar yapılmakta olduğunu biliyoruz.

VİTE BİZİ NASIL ETKİLİYOR?

DNA ile doğrudan etkileşme ve bu yolla DNA'da hasar ortaya çıkması (doğrudan etkileme)

İyonlayıcı ışınların hücrelerdeki moleküllerde iyonizasyona neden olarak, oluşan iyonların diğer hücre molekülleriyle etkileşmesi sonucu hasar ortaya çıkması (dolaylı etkileme)

Bir hücrede, aşırı ışınlanma sonucu bozunma arttığında hücre ölebilir. Onarılamayan ya da üretilmeyen hücreler, organlardaki işlevleri yönünden önemsizler ve sayıları da çok değilse, ilgili organda belirlenebilecek bir hasar görülüyor. Buna karşılık, işlevleri önemli olan hücrelerin sayıları az da olsa radyasyonun etkisiyle öldürülmesi, ya da başka hücrelerin çok sayıda

hasarı sonucunda organlarda önemli hasar ya da hastalıklar baş gösterebilmekte.

Radyasyon bu şekilde, ışınlanan kişinin hücrelerinde **erken** (ani, birdenbire) ve **geç hasarlar** oluşturabileceği gibi, kalıtım hücreleri yoluyla sonraki kuşaklarda ortaya çıkabilecek **genetik hasarlara ya da kalıtım bozukluklarına** da neden olabiliyor.

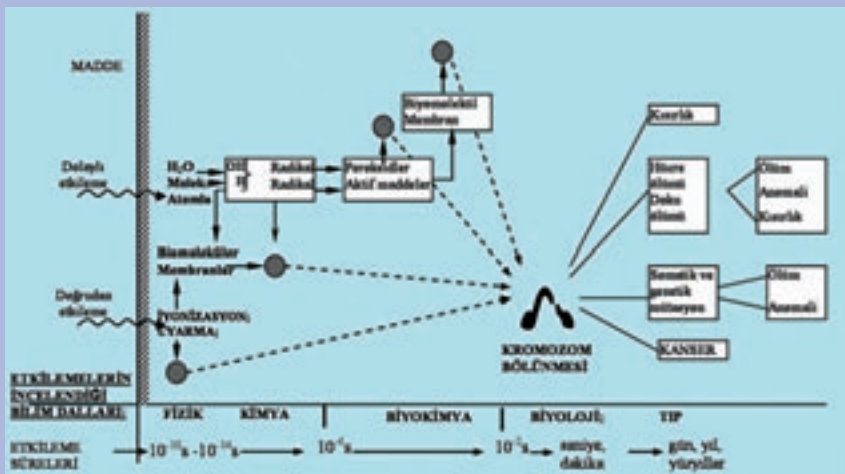
Şekil 11 radyasyonun vücutta başlattığı olayların gelişmelerini ve ortaya çıkabilecek hasarları gösteriyor. Görüldüğü gibi, iyonlayıcı ışınlar atom düzeyinden başlayarak, molekül hücre ve organ düzeylerinde çeşitli hasarlara neden oluyorlar. Işınlanan bireydeki "rastgele olmayan (belirlenebilen) hasarlar" erken ya da geç ortaya

çıkıyor. Kanser ve genetik hasarlarsa bir toplumda, önceden belirlenemeyen, **rastgele** bazı kişilerde görülüyor.

Büyük molekül deoksiribonükleik asitinin (DNA), genetik madde olarak, radyasyon biyolojisinde özel bir yeri var. Belirli şartlarda, bu büyük molekülde belirli bir yerdeki tek bir atomun başkasıyla yer değiştirmesi, ilgili hücrenin kansere dönüşmesine ve bunun da kanser tümörü oluşmasına neden olabiliyor. Diğer yandan, bu genetik madde yaşam için zorunlu olup, hasara uğradığında yenisi üretilmiyor. Böylece molekül yapısının değişimi sonucu, hücre kolaylıkla hasara uğrayabiliyor.

Enzimler gibi daha büyük moleküller çok sayıda olup, tek molekül olarak yaşam için zorunlu değil ve hasar görünce yenileri üretilmekte. Bunların hafif ya da ağır hasarları biyolojik sistemde bir tehlike yaratmıyor. Biyolojik yapının korunumundan sorumlu olan enzimlere "uzman işçiler" gözüyle bakabiliriz. Enzimler, genetik maddenin komutu ve denetimi altında çalışırlar.

Genetik madde, enzimler ve bunların oluşturduğu büyük moleküller, canlının bireyi olan hücreyi oluşturmaktadır. Vücudumuzun her gramı, çok çeşitli yapıda, bir milyar kadar hücreden oluşmakta, bunlar özel görevler olarak birbirleriyle iletişim halinde bulunuyorlar. Şekil 12 de, radyasyonun maddeyi etkileme zincirleri, bunların incelendiği bilim dalları ve etkileme süreleri gösteriliyor.



Şekil 12: Radyasyonun maddeyi etkileme zincirleri, ilgili bilim dalları ve etkileme süreleri (H.Fritz-Niggli-ISH-Münih)

RADYASYONUN VÜC HASAR OLUŞTURMA

Radyasyonun vücutta oluşturabileceği hasarın derecesi (büyüklüğü) ya da hasar oluşma olasılığı (riski) genellikle aşağıdaki etkenlere bağlı:

Dozun büyüklüğü: Doz arttıkça, risk de artar.

Dozun süresi: Belirli bir dozun alındığı süre arttıkça, etkisi azalır ve bu nedenle risk de azalır.

İyonlayıcı ışının cinsi: Aynı enerji dozun-
daki yoğun iyonlayıcı ışınlar (Alfalar gibi),
seyrek iyonlayıcı ışınlar (beta, gama)
daha etkin olduklarından, yoğun iyonlayıcı-
larla risk artar.

Hedef dokunun cinsi ya da duyarlılığı: Do-
ku ne kadar farklılık gösterirse iyonlayıcı ışın-
lara karşı direnci artar.

İşinlanan canlının yaşı: Organlarının
oluşmakta olduğu embriyo, anne karnındaki
bebekler ve çocuklar iyonlayıcı ışınlar, yetiş-
kinlerden çok daha duyarlılar.

Radyasyonun vücuttaki doku ve hücre-
lerde oluşturabileceği hasar, gövdesel ve ge-
netik olarak ikiye ayrılıyor (Şek.11).

Gövdesel (somatik) hasar erken (ani, bir-
denbire) ya da geç ortaya çıkabiliyor. Geç or-
taya çıkan bir hasar, kötü huylu ya da iyi huylu
bir tümör şeklinde olabilir.

Gövdesel hasarlar sadece radyasyon dozu
alan kişide görülüyor. Işınlanmanın etkisiyle
o kişinin kalıtım hücrelerinde de hasarlar or-
taya çıkabiliyor.

Radyasyonun Vücutta Oluşturabildiği Er- ken Hasar Nedir?

Erken (ani) hasarların ortaya çıkabilmesi
için oldukça yüksek olan eşik bir doz değerine
ulaşmak gerekiyor ki, bu 'bir kez ışınlan-
ma'durumunda 500 mSv kadar. Böyle bir
ışınlanmanın etkisi, ancak kan yapısındaki de-
ğişimlerin ilgili laboratuvarında incelenmesiyle
ortaya konabiliyor. Radyasyon dozu arttıkça,
vücuttaki erken hasarın büyüklüğü de artı-
yor. Eşik doz değerinin aşılması durumunda
hasarın ortaya çıkması rastgele olmadığı için,
bu çeşit hasarlara 'rastgele olmayan hasarlar'
ya da belirlenebilir (deterministik) hasarlar
denilmekte. Bunlara örnek olarak aşırı dozla
oluşan cilt yanıkları ve katartik verilebilir.

Öldürücü Doz Olasılığı ve Değerleri Neler?

4000 mSv 'lik bir kezlik bir tüm vücut ışınlan-
ması sonucu, herhangi bir iyileştirme önlemi
alınmadıkça, o kişi %50 olasılıkla 30 gün içinde
ölebiliyor. Burada ölüm olasılığı ya da riski der-
ken, örneğin 1000 kişiden herbiri 4000 mSv'lik
bir doz aldığında, bunların yarısının ölebileceği
anlaşıyor (yarı öldürücü doz¹⁵). 7000 mSv'lik
bir dozsa, iyileştirici bir önlem alınmadıkça tak-
dirde o kişinin büyük bir olasılıkla ölümüyle so-
nuçlanmakta (öldürücü doz).

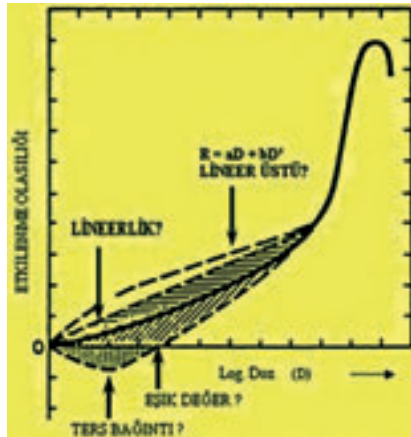
Radyasyonun Vücutta Oluşturabildiği Geç Hasar Nedir?

Gövdesel geç hasarlar ise yıllar sonra or-
taya çıkabiliyor. Her ne kadar hücrelerdeki
bozunmalar ışınlamanın hemen sonrasında
ortaya çıkıyorsa da, bunların ilgili organ ya
da tüm organizmaya yayılıp hastalığa yol aç-
ması çok sonra olabiliyor.

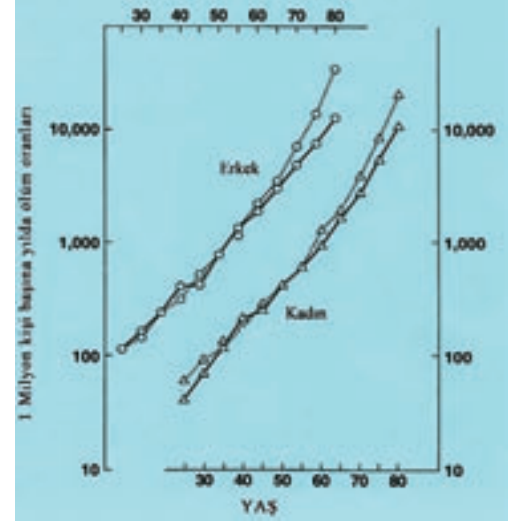
Kötü huylu olmayan geç hasarların (ör-
neğin gözlerde bulanıklık, kısırlık gibi) ancak
belirli bir eşik doz değeri aşıldığında ortaya
çıkabileceği benimsenmekte. Bunun yanı sıra,
eşik doz değerinin altında olmakla birlikte,
birçok kez yinelenen ışınlamalar da geç ha-
sarlara neden olabiliyorlar.

Kan kanseri gibi kötü huylu geç hasarlar-
nın ortaya çıkmasındaysa, buna neden olabile-
cek doz değeri çok küçük olabilir ya da eşik
bir doz değeri yok. Buradan, tek bir gama ışı-
nının ya da alfa taneciği gibi iyonlayıcı bir
parçacık, daha önce bozunup kendi onarımı-
nı yapamamış bir hücreyle etkileşmesi duru-
munda, burada kansere neden olabiliyor. Doz
miktarı arttığında hasarın büyüklüğü değil,
hastalığın ya da 'hasarın ortaya çıkma olası-
lığı' artıyor. Ancak bu, belirli bir kişi için, ne
deneyse ne de istatistiksel olarak ortaya ko-
nabiliyor. Bu nedenlerle, bu çeşit hasarlara,
toplulukta kime isabet edeceği önceden kestirile-
mediği için 'rastgele hasarlar' (stokastik
hasarlar) denilmekte.

Çeşitli kanser cinslerinde, kanserin orta-
ya çıkışı, organların iyonlayıcı ışınlar karşı
farklı duyarlılık göstermesi nedeniyle, farklı sü-
relerde oluyor. Işınlanma zamanıyla, kanserin
başgösterme zamanı arasındaki çeşitli kanser
cinslerine göre farklı olan bu süreler "latent
süresi", bekleme süresi deniyor. En kısa bek-
leme süreleri, kan kanseri (lösemi) ve tiroit
kanserlerinin ortaya çıkışında görülüyor, çocuklarda
bu süre 2-3 yıl kadar. Tüm yaşlar
için ortalama 8 yıl. Başka kanser cinsleri için



Şekil 13 : Doz/Etki Olasılığındaki belirsizlikler



Şekil 14 Nagazaki'de atılan atom bombasından, ışınlanmayan 55 yaşından daha büyüklerde' görülen daha yüksek ölüm oranları (noktalı eğriler) ile, ışınlanan 55' den büyüklerdeki' ölüm oranları (kalın çizgili eğriler) / Mine, et al, 1981

bu süre 10 yıldan ve akciğer kanseri için 20 yıldan fazladır. Eğer kanser bu sürelerden çok daha kısa bir sürede ortaya çıkıyorsa, bu kanserin nedeni büyük bir olasılıkla iyonlayıcı ışınlar değil.

Alçak dozlar sorunu: Risk kestirimi ve belirsizlikler?

Doğal radyasyondan etkilenen halkın ve nükleer tesislerde çalışanların alabileceği düzeylerdeki oldukça düşük dozların oluşturabileceği riskler için, yüksek dozlarla ilgili bulgulardan gidilerek çeşitli yaklaşımlar yapılması gerekiyor. Diğer yandan ilgili bölgedeki halk için başka nedenlerle kanser ve kan kanserinin aniden ortaya çıkma sıklık ve çoğunun araştırmalarla ortaya konulması, bunların ne kadarının iyonlayıcı ışınlar yoluyla oluştuğunun kestirilebilmesi için önemli olmakta. Ancak bu çalışmalar çok çeşitli gruplar ve yerlerde farklı koşullarda yapılıyor, birçoğu birbirleriyle karşılaştırılmıyor. Ayrıca, uzun yıllara yayılma zorunluğu ve her bölgede yeterince verilerin bulunamayışı (örneğin ani olarak başka nedenlerle ortaya çıkan kanserin kaç kişide ne süreyle görüldüğü gibi kayıtlarının olmayışı) yöntem uyumsuzlukları ve yanlışları gibi nedenlerle bilimsel olarak kanıtlanacak bir sonuca gitmekten uzak. Ayrıca, ilerleyen yıllarda yeni çalışmalar yapıldıkça, bunlardan elde edilen bulgular ilgili uzmanların oluşturduğu kurullarda tartışılıp daha önceki bulgular yenilenmekte ya da yeni yaklaşımlar getirilmekte olduğundan alçak dozlarla ilgili risk hesapları değişmekte.

CUTTA RİSKİ

Sadece yüksek dozlar için geçerli olabilen 'doz/etki bağıntılarından (eğrilerinden)' alçak dozlara doğru bu eğriler uzatılarak kestirimler ancak kitlesel ışınlama durumu için yapılabilir. Şekil 13'te doz/etki bağıntısıyla ilgili çeşitli yaklaşım ve belirsizler gösteriliyor.

Yapılmakta olan epidemiyolojik¹⁶ Çalışmalar

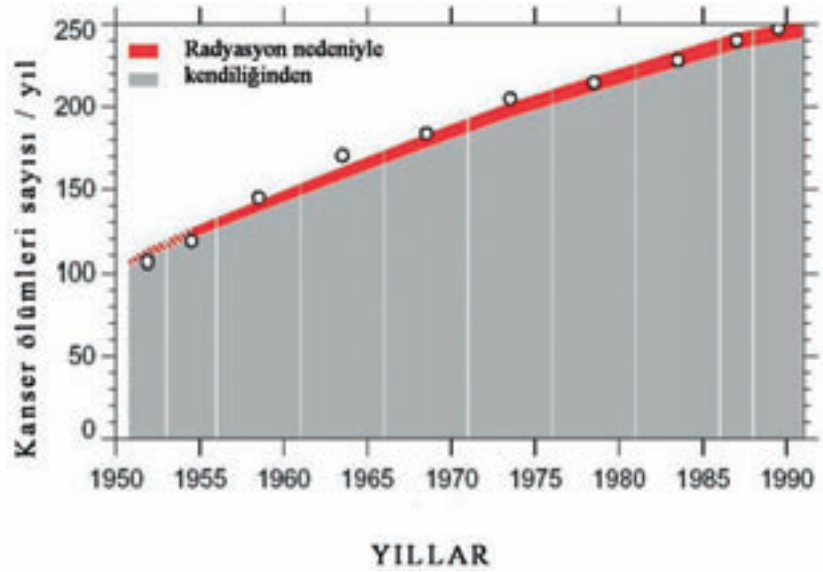
İyonlayıcı ışınların etkisiyle ortaya çıkan kanser ve genetik hasarlar, görünüm ve içerik olarak, başka nedenlerle aniden oluşan kanser ve genetik hasarlardan ayımsanamıyor. Bu gibi hastalıkların nedenlerinin iyonlayıcı ışınlar oldukları, ancak ışınlanan toplulukta, ışınlanmamış olan topluluklara oranla, istatistiksel olarak belirgin bir hastalık sıklığı ya da çokluğu varsa ortaya konabiliyor ki, bu da kapsamlı çalışmalar gerektiriyor.

Tıpta, iyonlayıcı ışınların neden olabileceği epidemiyolojik çalışmalar aşağıdaki insan grupları için yapılmakta:

- Japonya'da atılan atom bombalarından sonra sağ kalan bir grup halk,
- Tıpta tanı ve iyileştirme amacıyla ışınlananlar,
- İyonlayıcı ışınlarla uğraşan kişiler,
- Nükleer yapılar yakınlarında oturan halk,

Bu yazının çerçevesi içinde, yukardakilerden en kapsamlısı olan Japonya'da atılan atom bombalarından ışınlanmalarına karşın sağ kalan 100.000 kişilik bir halk kitlesinde (çevrede, ışınlanmayan başka halk topluluklarıyla karşılaştırılarak) 60 yıldır yapılmakta

Hiroşima & Nagazakide: KANSER ÖLÜMLERİ (1950-1990)



Şek.16: Hiroşima ve Nagazaki'de atılan atom bombasından kurtulanlarda, yıllara göre gözlenen 'kanseri ölümleri sayıları' (Şekildeki küçük daireler / Kankanser dışındaki katı dokularda). Gri bölge, istatistik analizlere göre hesaplanan ışınlanmayanlar, kırmızı bandsaışınlananlar için yapılan hesaplara dayanmakta (1950'den önce kayıtlar yok). Gri bölgede, atom bombasından kurtulanların yaşlanmalarıyla birlikte kanserden ölümlerin zamanla arttığı görülmekte. Sadece çok az sayıdaki kanser olayı, radyasyon etkenine bağlanabilmiş. Bunun nedeni alınan ortalama dozun sadece 0,14 Sv olması ve radyasyon dozu alındıktan sonra katı tümörlerdeki artış hızının kankanserindekine oranla çok daha az olması./Kellerer, GSF-Münih, 2002/.

olan epidemiyolojik çalışmalardan elde edilen bazı önemli sonuçlar burada özetle ele alınmaya çalışılacak.

Japonya'daki Önemli Bulgular Neler?

Nagazaki'de atılan atom bombasından sağ kalanlardan 'ışınlananlarla', 'ışınlanmayanlar' üzerinde yapılan bir karşılaştırmada, ölüm oranlarında, 55 yaşına kadar pek fark görülmemiş, daha yaşlılarla ilgili bu iki gruptan, ışınlanmayanlarda ölüm oranlarının arttığı gözlenmiş olup, beklentinin tersine bir sonuç elde edilmiş (Şek. 14).

Japonya'da, bombaların patladığı merkezlerde bulunanlar yüksek basınç ve sıcaklık so-

nucu yaşamlarını hemen yitirirken, bu merkezlere yakın çevrede oturanlardan birkaç bin kişinin, aldıkları yüksek radyasyon dozları sonucu vücutlarında ağır hasar oluşmuş.

Sağ kalanların çoğuysa daha uzaktardaki halk kitleleri olmuş ve bunlar 0,5 Sv'lik eşik doz değerinin altında kalan ortalama 0,2 Sv (= 200 mSv)'lik dozlar almışlar ve vücutlarında belirgin bir hasar gözlenememiş.

Ortalama 200 mSv doz alan bu grupta, bugüne kadar 500 kadar daha çok kanserli ve kan kanserli kişi belirlenmiş. Bunlardan 250 kan kanserliden 90'nın radyasyonun etkisiyle kansere yakalandığı saptanmış. Bu oldukça az 250 kişilik toplam sayıya karşın, 90'nının radyasyonun etkisine bağlanabilmiş olması çok yüksek bir belirleme oranı (90/250 = %36). Buradan kan kanserinde radyasyonun etkisinin gözlenebildiği ya da tanımlanabildiği sonucu çıkıyor (Şek.15).

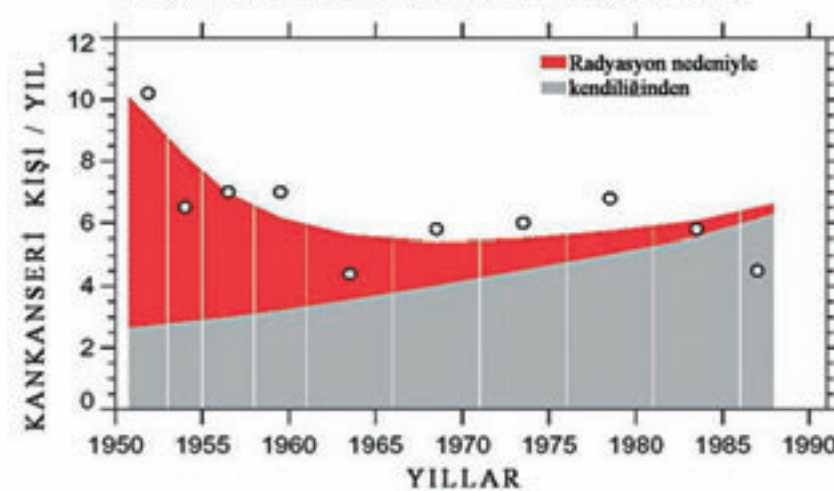
Başka cins 7600 kanser ölümlerindeyse sadece 350'sinin radyasyondan kaynaklandığı ortaya konabilmiş (Belirlenebilme oranı çok düşük: % 4,6). Buysa tanıdaki belirsizliği ya da kanserin başka etkenlerden mi yoksa radyasyondan mı kaynaklandığının, oldukça fazla ışınlanan bu büyük grupta dahi, bilimsel yol ve yöntemlerle gösterilemediği sonucunu doğuruyor (Şek.16).

100.000 kişinin yarısı bugün yaşamlarını sürdürdüklerinden, çalışmalar sonuçlanmış değil.

Uluslararası Radyasyon Kurumlarının Kanser Riskiyle İlgili Belirlemeleri neler?

Radyasyon fizğinde 'risk' dendiğinde, ışınlanan topluluktaki 'rastgele her hangi bir kişide' kanser, kan kanseri ya da kalıtımda

Hiroşima & Nagazakide: Kankanserli kişiler (1950-1987)



Şek.15:Hiroşima ve Nagazaki'de atılan atom bombasından kurtulanlarda, yıllara göre gözlenen kankanserli kişi sayıları (Şekildeki küçük daireler). Gri bölge, istatistik analizlere göre hesaplanan ışınlanmayanlar, kırmızı bölgeyse ışınlananlar için yapılan hesaplara dayanmakta (1950'den önce kayıtlar yok). Gri bölgede, atom bombasından kurtulanların yaşlanmalarıyla birlikte kankanserinden ölümlerin zamanla arttığı görülmekte. 1950'li yıllarda en çok kan kanserinden ölümler görülmüş /Kellerer, GSF-Münih,2002/.



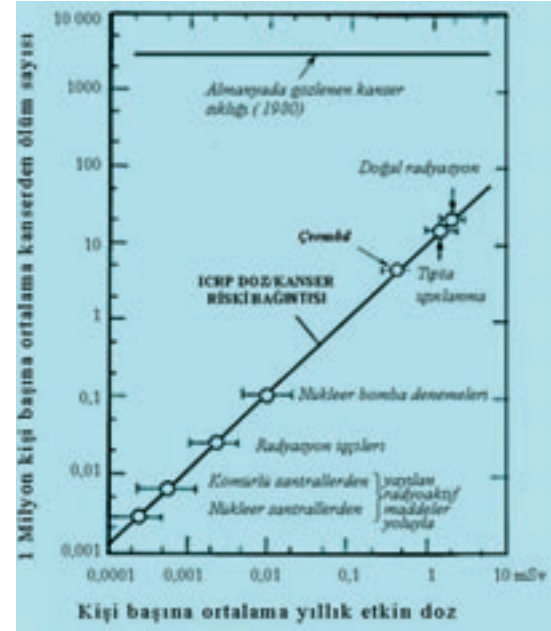
Şekil 18: Almanyada halkın, radyasyonla uğraşanların yıllık dozlarının, Japonyada dozlarla ve bunları doğuran dozlazlarıyla karşılaştırılması (Sauermann, Jülich 1989)

başgösterecek bir 'hasar olasılığı' anlaşıyor. Hasar olasılığının başgöstermesiyle doz arasındaki bağıntıya 'risk katsayısı' olarak adlandırılıyor.

UNSCEAR'ın, Japonya'da atılan atom bombasından kurtulanlar üzerinde tıptaki gözlem ve bulgulara dayanarak yaptığı bilimsel çalışmanın sonuçlarına göre iyonlayıcı ışınlar nedeniyle 1 Sv'lik birdenbire alınan bir doz sonucu, yaşam süresince kanser ve kan kanserinden ölüm riski katsayısının, ışınlanan kitledeki bireyler için ortalama olarak % 11 olduğunu gösteriyor (Bu değer, erkekler için bulunan %9 ile kadınlar için bulunan %13'ün ortalaması). Bu doz riski hesaplama ve yaklaşımları, belirtildiği gibi, birdenbire ortaya çıkan yüksek doz ve doz hızlarının vücutta yarattığı hasarlarla ilgili tıbbi gözleme dayalı bulgulardan gidilerek yapılmakta. Al-

çak dozların zamanla (süreğen) alındığı durumlarda, hücrelerin zamanla onarım işlevlerinin devreye girip etkiyi ya da bozunmayı azaltacağı ya da ortadan kaldırdığı gözönüne alınarak yukardaki risk katsayıları yarıya indirilmiş: Işınlanan tüm kitle için ortalama (yaklaşık olarak): **%5/1 Sv** Örneğin ışınlanan 10.000 kişilik bir topluluktaki her kişi, zamanla 10 mSv'lik toplam bir doz almışsa: 10.000 kişi x 0,01 Sv/kişi x 0,05/Sv = 5 kişi (10.000 kişi içindeki rastgele 5 kişinin yaşam sürelerinin sonuna kadar kanserden ölebileceği anlaşılmalı).

Kansere yakalanma olasılığı (riski), kanserden ölüm riskinden iki kat daha büyük. Eğer, kanserden ölüm riski değil, sadece kansere yakalanma riski gözönüne alınacaksa, yukarıdaki değerlerin iki katını almak gerekiyor. Yukardaki örnekteki 10.000 kişiden rast-



Şekil 17: Çeşitli radyasyon kaynakları ya da etkenlerle Alman halkında oluşabilecek dozlarla karşılık, kankanseri de dahil tüm kanserler için ölüm sıklığı (1 Milyon yaşayan kişi başına)

gele 10 kişinin kansere yakalanabileceği, bunlardan 5'ininse ölebileceği sonucu çıkar.

Kan kanseri (Lösemi) riskiye, erkek ve kadınlar için aynı olup 10 mSv'lik ani (birdenbire) doz başına %0,01. Kan kanseri için doz etki bağıntısı lineer olmadığından, 10 kat daha az ani doz (1000 mSv yerine 100 mSv), kan kanseri riskini 20 kat daha azaltabiliyor.

Bu konulardaki bilimsel araştırmalar ve büyük insan topluluklarını kapsayan epidemi-

ÇEŞİTLİ KANSER OLASILIKLARI

Radyasyondan başka etkilerle, her hangi bir kimsenin rastgele kansere yakalanma olasılığı yüksek. Kanser yapabilecek kimyasal maddeler, sigara vb. gibi daha bir çok etken bulunduğundan, düşük bir radyasyon dozunun kansere yol açıp açamayacağının genellikle saptanamadığı önceki bölümlerde açıklandı.

İlgili uluslararası kurumların 2005 yılında yayımladıkları Çernobil raporunda, ileride her ne kadar 4000 kişiye varan ölümler olabileceği ileri sürülmüşse de, Çernobil'e bağlanabilecek ölümlerin sayısı olarak en çok 50 kişinin bugüne kadar belirlenebildiği yer aldı. Bunlar da, başlangıçta aşırı ışınlanıp ölen personel ve kurtarma işçilerinden oluşmakta.

Diğer yandan, ABD'de daha 1981'de, Sir Richard Doll'un, ABD Sağlık Bakanlığı'nın isteğiyle yaptığı ayrıntılı bir araştırmada, ABD'deki kanser olaylarıyla ilgili çok sayıda kayıt ve veriler, uluslararası verilerle de desteklenerek, önlenebilecek kanser nedenlerinin belirlenmesine çalışıldı.

Bu çalışmanın şaşırtıcı sonucu, kanserin ana nedeninin (%35), normal besinler ve beslenmeden kaynaklandığı olmuş (bu sayının salınım aralığıysa oldukça geniş: %20-%70). Besinlere katılan ara maddelerin etkisi gözönüne alınmamış. Ancak, bunların etkisinin önemsiz derecede düşük olduğu, ya da ölçülememiş görülmüş.

Yanlış ve aşırı beslenme kanserin ana nedeni: Et ve hayvansal yağların çok yenilmesi (özellikle meme kanserine neden olmakta),



lifleri az olan yiyecekler; hidrokarbonlar, yağ ve protein arasındaki dengesizlik (uyumsuzluk); etlerin bazı maddelerle iyice kızartılmasıyla kalıtım hücrelerinin bozulması ve yanlış beslenme sonucu aşırı kilo en önemli kanser nedenleri olmakta. Küflenmiş (Aflatoksin içeren) yiyecekler de karaciğer kanserine neden olabiliyor. Bu sonuçlar, hayvanlarda yapılan kontrollü yem yedirme deneyleriyle de ortaya çıkmış. Az yemek, ani tümörlerin ortaya çıkış olasılığını son derece azaltmaktadır.

İkinci neden tütün/sigara içilmesi ve diğer nedenlere göre bu, en iyi bir şekilde belgelenip kanıtlanmış. %30'luk sonuç, çeşitli ülkelerde şaşırtıcı kesinlikle hemen hemen hep aynı çıkmış. Sigara içilmesi sonucu, bildirildiği gibi en başta akciğer kanseri, mesane, sindirim sistemi ve kan kanseri ortaya çıkabiliyor.

Sigara içmeyenlerle karşılaştırdığında, kanser olasılıkları, aşağıda gösterildiği gibi günde içilen sigara sayısına göre sigara içmeyenlere oranla katlanarak artmakta:

yolojik çalışmaların sonuçları, ayrıntılarıyla zaman zaman UNSCEAR, ICRP ve IAEA'nın teknik raporlarıyla açıklanıyor.

Alçak Dozlarla ilgili hesaplanan kanser riski sayıları ne ölçüde belirgin?

Diğer yandan radyasyonun etkisiyle oluşan kanser ölümleriyle ilgili olarak, Uluslararası belirlemelere göre hesaplanan (yukarıdaki örneklerdeki gibi) sayılar, toplumdaki 'genel kanser ölüm sayısı' içinde kaybolup gitmekte olduğundan, bu sayıların doğru ya da yanlış olduğu gösterilemiyor. Örneğin, Şek.17'de 'yıllık ortalama radyasyon kanser ölüm riski/sıklığı', Alman halkının çeşitli kaynaklardan aldığı ortalama yıllık kişi başı dozlarına karşılık olarak, doğrusal (lineer) 'doz/kanser riski' bağıntısı varsayılarak yapılan hesaplama sonuçları görülmekte¹⁸. Diğer yandan Almanya'da her '1 milyon kişiden' yılda yaklaşık olarak ortalama 2500 kişinin 'tüm etkenlerle' kansere yakalanıp öldüğü saptanmış (Şek.17'nin üst bölümündeki yatay çizgi). Bu 'çok etkenli toplam kanser sayısının' içinde, çeşitli radyasyon kaynaklarından türediği hesaplanan kanser ölümleri katkılarının çok düşük (Şekil 17'deki alt bölümler) kalıyor. Düşük radyasyon dozlarının etkisiyle bu çok az sayıdaki ölümler gerçekten de ortaya çıkmaktaysa, bunların toplam sayının içinde kaybolduğu açıkça görülmekte.

Ölen kişilerin ölüm nedenlerinin araştırmasıysa, Almanya'da 'her yıl ölen 1 milyon kişiden' ortalama olarak 250.000'inin kanserden ölmekte olduğu sonucunu vermekte. Bunların içinde radyasyonun etkisiyle risk katsayılarından gidilerek hesaplanan ölümler sadece birkaç yüz kişi kaldığından kanıtlanamıyor.

Doz/Etki/Risk yaklaşımları ne ölçüde geçerli?

Şekil 18'de Almanyada Radyasyonla uğraşanların ve halkın Çernobil sonucu aldığı dozlar (sırasıyla N ve C) ve doz hızları (Ç) Japonya'da atılan bombaları sonucu oluşan doz ve doz hızlarıyla karşılaştırıldığında, Almanya'daki değerlerin ne kadar küçük kaldığı görülmüyor (Bu karşılaştırma yaklaşık olarak Türkiye için de geçerli). Japonyada ortaya çıkan 'birkaç bin mSv' lik ani (birdenbire) dozların oluşturduğu etkilerle, radyasyonla uğraşanların bir yıl boyunca aldıkları ve toplamı 1 mSv kadar bile olmayan 'zamana yayılmış' (süreğen) dozların vücuttaki etkilerini ortaya koyabilmek için, Japonya'daki çok yüksek dozlardan Avrupa'daki bu çok düşük dozlara doğru, aradaki farkın 10'un 3'ü kuvveti olan değerler için, uzatmayla sonuçlar çıkarmak kuşkusuz bilimsel olmaktan uzak. Bu çeşit yaklaşımların ne kadar geçersiz olacağını, aradaki farkın 10'un 7'nci kuvvetine kadar çıktığı, Şek.18'deki doz hızı karşılaştırmaları daha belirgin olarak göstermekte.

Sonuç olarak, Japonya'yla ilgili çok yüksek doz ve doz hızlarının etkilerinden gidile-



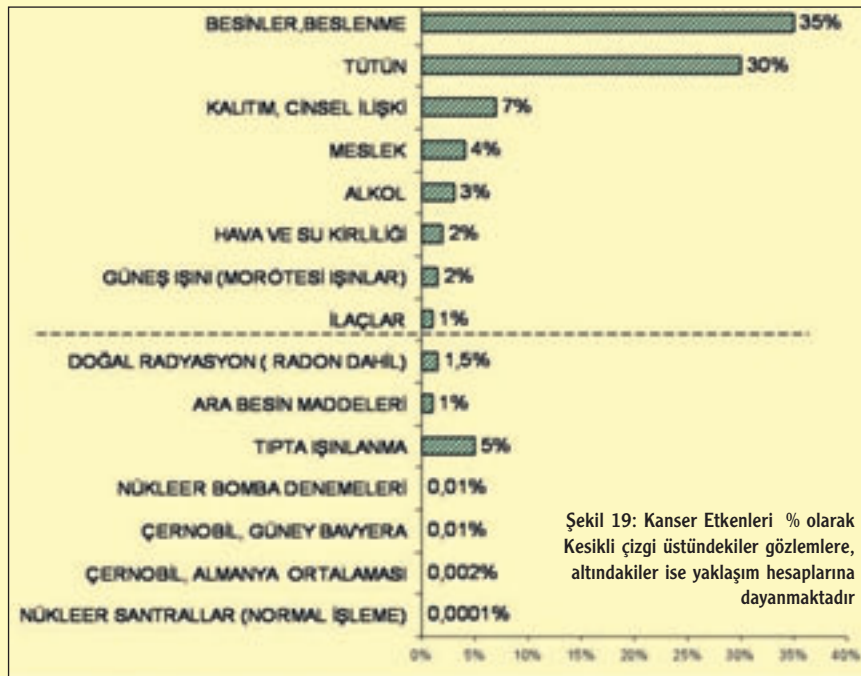
rek bulunabilecek daha büyük risk değerlerinin, Avrupa, genelinde geçerliliği tartışmalı. Ayrıca, Japonya'daki bulguların, Avrupa'daki gibi başka toplumlara taşınamayacağıyla ilgili birçok çalışma var.

Genetik hasarlar, kalıtım hücrelerinin kromozomlarındaki değişim ya da dönüşümler sonucunda, ışınlanan kişinin sonraki kuşaklarında ortaya çıkabiliyor. Genetik hasarların bazılarını da vücut onarabiliyor. Hücrelerdeki değişim ve dönüşümler (mutasyonlar) tüm canlılar için doğal olarak birdenbire ortaya çıktığı gibi fiziksel ve kimyasal etkilere zamanla da oluşabiliyorlar.

İyonlayıcı ışınların oluşturabileceği genetik hasarlarla ilgili olarak insanlar üzerinde yapılabilmemiş ve sonuçları bilimsel olarak kabul edilebilmiş bulgular yok. Japonya'da atılan atom bombalarından sonra yaşamda kalanların çocuk ve torunlarında, diğer bölgelerdeki Japon halk gruplarına oranla belirgin olarak daha ağır bir genetik hasar belirlenmedi. Hayvanlar üzerinde yapılan deneylerden, iyonlayıcı ışınların genetik hasar (kalıtım hücrelerinde değişim ve dönüşümler, mutasyon) yapabileceği bilinmekte. Bu nedenle, insanlarla ilgili genetik hasarların kestirimi, hayvanlar üzerinde yapılan deneylere dayanmakta.

İyonlayıcı ışınların etkisiyle mutasyonlar ortaya çıkabiliyor. Ancak, 10 mSv'lik bir Beta ya da Gama dozu genetik organlarca alındığında, doğan 1 milyon bebekten %0,06'sında hasar görülebiliyor. Örneğin, 10.000 kişinin herbirinin genetik organlarında bu değerde bir doz oluştuğunda, 6 bebekte hasar görülebilir; ama bu kadar çok kişinin oldukça yüksek olan bu dozu üstelik genetik organlarında almaları olasılığı da yok denecek kadar az.

ARININ KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 19: Kanser Etkenleri % olarak Kesikli çizgi üstündekiler gözlemlere, altındakiler ise yaklaşım hesaplarına dayanmaktadır



Sigara sayısı:	Kanser olasılığı:
Günde 10 sigaradan az	15 kat daha çok
Günde 10-20 sigara	20 kat daha çok
Günde 20-40 sigara	40-50 kat daha çok

Şekil 19 de çeşitli kanser nedenleri karşılaştırılmakta. Kesikli çizginin altındaki değerler, kötümser modellere göre hesapla yapılan yaklaşımlar. Kesikli çizginin üstündeki değerlerse çeşitli topluluklardaki gözlemlere dayanmakta. Görüldüğü gibi, Çernobil kazasının ve nükleer santrallerin etkisi halk kitleleri için, diğer kanser nedenleri yanında son derece az.

RADYASYONDAN KORUNMA RADYASYON DOZU

Radyoaktif maddelerden yayılan ışınların insanı en az düzeyde etkilemesi amacıyla bir dizi korunma kural ve yöntemleri geliştiriliyor. Bunlara kesinlikle uyulması, teknik ve yönetsel olarak, radyasyon fizikçilerinin gözetim ve denetimiyle sağlanmakta. Radyasyon yayan her çeşit kaynağın yakınında gereksiz yere bulunulmamalı ve gelişigüzel hareket edilmemeli. Bu nedenle her radyasyon uygulamasının bir gereksesi olmalı ve bunun 'yararı', 'zararından' daha çoksa, ancak o zaman radyasyon kaynaklarıyla çalışılmalı ya da radyasyon uygulamasına geçilmeli. Buna, radyasyonlarla çalışmada 'gerekeçlendirme' deniliyor.

Radyasyondan korunmada üç ana kural: Radyasyon kaynağına mümkün olduğunca uzak durmak, yakınında daha az süre kalmak ve kaynağa aramıza ışınları soğurup etkisini azaltıcı uygun zırh maddeleri koymak şeklinde özetlenebilir.

Uzaklık, radyasyon şiddetini büyük ölçüde azaltıyor: Küçük ama radyoaktivitesi büyük bir radyasyon kaynağından uzaklaştıkça, radyasyonun şiddeti ve dolaşısıyla etkisi, uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalıyor, örneğin 2 m uzaklıkta şiddet dörtte bire iniyor.

Radyasyon kaynağının yakınında kalınan süre kısaltılabilirse, alınan doz da bununla doğru orantılı olarak azalıyor. Yapılacak iş ya da uygulama önceden iyi planlanır ve gerekli hazırlık kaynaktan uzakta yapıp sonra uygulamaya geçilirse, örneğin süre yarıya indirilebilirse alınan doz

da yarıya iner.

İyonlayıcı ışınlar yoğunluğu fazla olan maddelerde daha çok tutulduklarından, kaynakla aramıza örneğin gama ve röntgen ışınlarına karşı kurşundan bir zırh koymamız, alacağımız doz büyük ölçüde azalır.

Diğer yandan kapsüllü olmayan (açıkta bulunan) radyoaktif maddelerle çalışırken özel giysi, plastik eldiven ve kılıflı lastik ayakkabılar kullanılarak radyoaktif maddelerin kendi giysilerimize bulaşmaması sağlanıp bunların başka yerlere taşınması önlenir. Radyoaktif maddelerle çalışmaların yapıldığı oda ve laboratuvar gibi yerlerde, kullanılan en çok radyoaktivite miktarına göre, azdan çoğa doğru olmak üzere gözlem ve denetim bölgeleri (kontrol bölgesi) kurularak buralara giriş ve çıkışlar sağlık fiziki personelinin denetlenir. Ayrıca, ilgili radyoaktif



maddelerin ya da radyasyon kaynaklarının cinslerine ve yaydığı radyasyonların şiddetlerine göre, radyasyondan korunarak nasıl çalışılacağını yol ve yöntemleri belirlenir, çalışanlar bu konularda eğitilir, uyarıcı radyasyon aletleriyle bu tür yerler donatılır. Çalışanların aldıkları dozlar, film ve cep dozimetreleri gibi çeşitli radyasyon ölçüm aletleriyle sürekli ölçülüp haftalık, aylık ve yıllık kayıtlar tutularak, gerektiğinde ilgili zorunlu önlemler alınır (örneğin çalışılan yerlerde ek zırhlama, daha iyi havalandırma, fazla doz alan kişiyi gerektiğinde bir süre iş yerinden uzaklaştırma gibi önlemler). Çalışma yerlerinde, laboratuvarlarda çeşitli radyasyon ölçü aletleri ve otomatik uyarıcı monitörlerle radyasyon düzeyi (doz hızı) sürekli ölçülür.

Halk, Çernobil kazasından sonra olduğu gibi, yağışlarla bazı bölgelerin topraklarına ve dolaylı olarak da besinlere ulaşan çok miktarda çeşitli radyoaktif maddeli serpintiler yoluyla ışınlanabilir. Radyoaktif maddelerin çevreye saçılacağı radyasyon dozunu azaltabilmek amacıyla, çevre ve besinlerdeki radyoaktivitenin cins ve miktarları ölçümlerle belirlenerek halka ve üreticilere duyurulur. Bir dizi yaptırımlı, makul ve gerekli önlemlerle

İYONLAYICI IŞINLARI

Olumlu Etkiler ve Uyum Tepkisi (Adaptiv Response) Kuramları

İyonlayıcı ışınların biyolojik yapıda olumlu etkileri olabileceği konusu, ilgili bilim dallarında tartışılıyor. Orta ve yüksek dozlarda, kötü huylu tümörlerin ortaya çıkması gibi olumsuz etkileri bilinen radyasyonun, alçak dozlarda biyolojik yapıyı olumlu etkileyebileceğiyle ilgili bazı bulgular olmakla birlikte, bunlar henüz bilimsel düzeyde kesinlik kazanmış değil. "Hormesis" denilen bu olumlu etkiler arasında önemlileri, büyümenin ve vücuttaki gelişmelerin hızlandırılması, hücrelerin sağ kalma ora-

nındaki artma, hücrelerin alçak dozla önceden ışınlanma sonrasında yüksek dozla karşı daha dirençli olması sayılabilir. Tüm bu belirtiler 200 mSv'den daha düşük dozlar için. "Radyasyon Hormesis" deyimi, organizmanın alçak dozlarda uyarılıp işlevini yapmaya başlatılması anlamını taşıyor. "Uyum tepkisi" ise alçak dozlarda ışınlanma sonrasında hücrelerin yüksek dozla karşı dirençli hale gelmesi demek.

Radyasyonun olumlu etkileriyle ilgili önemli çalışmaların öncüsü, Amerikalı Biyokimyacı T.D. Luckey. Araştırmalarının sonuçlarında bir doz/etki bağıntısı önermiş ve buna

göre radyasyonun biyolojik etkisinin, 200 mSv'lik dozun altında daha olumlu ve bu değerin üstündeyse olumsuz olduğunu ileri sürmüştü. Olumlu etkilerden olumsuza geçişte sınır değeri olarak gördüğü 200 mSv'lik dozuya, radyasyonun her hangi bir etkisinin görülmeyeceğini düşündüğü 'Sıfır Eşdeğer Nokta' ZEP (Zero Equivalent Point) olarak nitelemiştir.

İyonlayıcı ışınların alçak dozlarda insanda olumlu etkilerinin olup olmadığıyla ilgili bilgiler ancak kapsamlı epidemiyolojik çalışmalarla kazanılabilir. Özellikle farklı düzeydeki doğal radyasyonlarla yaşayan farklı yörelerdeki insan

RUNMA YÖNTEMLERİ U SINIR DEĞERLERİ

(örneğin belirli yüksek radyoaktiviteli besinlerin satılmaması, üretilip, tüketilmesi, radyoaktivitesi yüksek bölgelere halkın girmesinin önlenmesi gibi) çevrede yaşayanların gereksiz ya da aşırı radyasyon dozu alması önlenir.

Hem bu hem de diğer teknik, yönetsel önlemlere karşın insan az ya da çok ışınlatabilir.

Radyasyonlarla çalışanların ve halkın sağlığına zarar vermeyeceği düşünülen ölçüde, en az doz almaları amaçlanarak 'radyasyon dozu sınır değerleri' Uluslararası Radyasyondan Korunma Kurulunca (ICRP) belirleniyor.



Doz sınırlamasının geçirdiği evrim:

Radyasyon dozuna bir sınırlama getirme gerekliliği ilk kez 1925'te 'Tolerans Dozu' olarak ileri sürülmüş ve bu, deride kızarıklık yapan dozun %1'i olarak kabul edilmiş. O zamanlar kullanılan röntgen birimiyle deri kızartı dozu 600 Röntgen idi. Bunun %1'inin 30 günde alınabileceği düşünüldükçe, günlük tolerans dozu olarak 1936'da 200 mR belirlenmişse de, sonraları çeşitli araştırmaların ortaya koyduğu

bulgularla bu değer günde 100 mR'e indirildi. Çok çeşitli radyasyon kaynaklarının gitgide daha çok kullanılması ve çok daha büyük insan kitlelerinin ışınlamaları olasılığı ve ayrıca radyasyonların insan doku ve hücrelerinde erken ve geç hasarlar oluşturabilmesiyle ilgili olarak yapılan çalışmalar, zamanla sınır değerleri epey düşürerek bugün ICRP'ce belirlenen doz sınır değerleri ortaya çıktı.

Tüm vücut ışınlaması durumunda bugün halk için yılda ortalama etkin doz sınır değeri, kişi başına olmak üzere 1 mSv. Radyasyonlarla çalışanlar içinse bu değer 20 mSv olup, tek bir yıl için bu değerler sırasıyla 5 ve 50 mSv olarak belirlendi. Ancak, tek yıl değerleri gerçekleştiğinde, birbirini izleyen sonraki 10 yıl içinde yıllık ortalama 20 mSv ve toplam olarak da 100 mSv değerleri aşılamaz. Ayrıca, çeşitli organlar için daha yüksek doz sınır değerleri öngörülüyor. Örneğin, cilt, el ve ayaklar için yukardaki tek yıl değerlerinin 10 katı yıllık ortalama eşdeğer doz sınır değerleri. Bu son değerlerin daha yüksek olmasının nedeni, ilgili doku ve hücrelerin vücuttaki işlevleriyle ilgili farklılıklar, radyasyona duyarlılıkları (ya da dirençleri), kendilerini yenileyebilmeleriyle ilgili (örneğin, hasara uğrayan deri hücrelerinin kendilerini yenileyebilmeleri gibi).

Halk ve radyasyonla uğraşanlar arasındaki doz sınır değerlerindeki farklılığın nedeniyse, halkın çok daha büyük bir kitle oluşturması ve sürekli radyasyon deneyimi altında olamaması. Ayrıca, radyasyon-

la ilgili geç hasarların ortaya çıkmasındaki risk, doz düşük olmasına karşın kişi sayısı arttığında çoğalmakta. Bu nedenle, çevredeki halkın çok daha az ışınlamasına özen gösterilerek ilgili önlemler alınması gerekiyor.

Sınır değerler, erişilmesi hedeflenen değerler olarak değil, alınan makul, yararlı, etkin önlemlerle, mümkün olduğunca bu değerlerin altında kalınması gerektiği anlamını taşıyor. Örneğin, radyasyonlarla çalışanlar için yukardaki 20 mSv'lik sınır değerden, 19,9 mSv 'zararsız olduğu için izin verilebilir', 20,1 mSv ise 'zararlı olacağı için izin verilemez' şeklinde yanlış bir sonucun da çıkarılmaması, ve makul ölçüde sınır değerlerin çok altında kalınması gereği açık. Bu da, bugün birçok nükleer merkezde benimsenen ve radyasyonla çalışanların aldığı düşük ortalama dozlarla da kanıtlanan yöntem.



N OLUMLU ETKİLERİ?

kitleleri üzerinde yapılan bu çeşit çalışmalar önem kazanmakta. Bununla ilgili olarak dünyanın çeşitli yörelerinden gelen değerlerse birbirleriyle uyumuyor. Benzer biçimde, hayvanlar üzerinde yapılan deneyler de çelişkili sonuçlar vermekte. Çoğunlukla insan vücudu dışında, insan kanındaki alyuvarlar üzerinde ayrıntılı bilimsel çalışmalar yapılıyor. Amaç, ışınlama sonucunda bozunmuş ya da dönüşüme uğramış kromozom sayısını belirlemek. Önceden ışınlanmış grupta, önceden ışınlanmamış gruba oranla belirgin derecede daha az kromozom bozunması görülmüş. Başka araştırmalar, ani

ışınlamaların da, süregelen ışınlamalardaki gibi uyum tepkisi verdiğini göstermiş. Uyum tepkileri sağ kalmada, mutasyon ve hücrelerin dönüşümünde de gözlenmiş.

Uyum tepkisiyle ilgili birçok bilimsel yayını inceleyen Wojcik A. ve Streffer C. radyasyona, tanımladıkları dar sınır koşullarında olumlu etkilerin ve uyum tepkilerinin deneysel olarak geçerli olabileceğini ileri sürüyorlar. Ancak, bu dar sınır koşulları uyum tepkisinin genellenmesini engelliyor. Uyum tepkisinin bireylerdeki belirginliğinde de büyük farklılıklar var.

Bugüne kadar henüz tam yanıtlanamayan

soruya, gözlenen olayların temelindeki 'etkileşmenin yöntemi ya da mekanizması'. Çoğunlukla ileri sürülen tez: Alçak dozlarla yapılan ön ışınlama sonucu 'hücredeki koruma ve onarım sistemleri' uyarılarak, bunlar daha sonraki yüksek dozlu ışınlamaya hazırlıklı duruma getiriliyor.

Sonuç olarak denilebilir ki, olumlu etkiler ve uyum tepkisi kuramlarıyla ilgili bugüne kadar elde edilen bulgular, bu konuda daha derin ve kapsamlı araştırmaların yapılmasını gerektirmekte. Vücut dışında yapılan biyolojik deneylerdeki dar sınır koşulları ve biyolojik değişimler bu konulardaki genellemeleri önlemekte.

SONUÇLAR V

Doğal radyasyonlar içinde önemli bir yer tutan kozmik ışınlardan, 2004'te uçak personelinin aldığı radyasyon dozları, nükleer reaktörlerde, nükleer tıpta ve diğer nükleer araştırma merkezlerindeki personel gruplarının aldıkları yıllık ortalama dozların çok üstünde olup örneğin Almanya'daki 30.000 kişilik uçak personeli, radyasyonlarla uğraşan 313.000 kişilik toplam içinde, en çok radyasyon dozu alan grup.

Avrupa'da 1986 yılı için en fazla doz, kişi başına 0,1 mSv olup bu değer daha sonraki yıllarda çok azaldı. Yaşamboyu dozunu, 1986'daki dozun 2 ile 5 katı arasında olabileceği tahmin ediliyor. Buysa, doğal radyasyonla sadece bir yılda alınan ortalama 2,4 mSv'lik dozun çok altında ve bu nedenle 'genel toplum' için radyolojik etkisi belirgin değil.¹⁹

Bu yazıda ele alınan konulardan ve açıklamalardan görülebileceği gibi özellikle 200 mSv'in altında olup düşük sayılan radyasyon dozlarında, radyasyonun insanı etkileyişi ve sağlık riskinin 'bir miktar da olsa' belirlenebilmesi için çok çeşitli dallarda kapsamlı ve çok uzun süreli bilimsel çalışmalar yapılması gerekmektedir. Sayıları yüzünü aşan ve Japonya'da atılan atom bombasından kurtulanlar üzerinde son altmış yıldır yapılan ayrıntılı 'epidemiolojik' çalışmalar bile, kanserden ölümlerin, radyasyonun etkisiyle mi yoksa 'tüm etkenlerle' kendiliğinden ortaya çıkan kanserden mi olduğunu belirgin (signifikant) olarak, ancak çok az örnekte (o da kan kanserinden olan ölümlerde) ortaya koyabildi. Japonya'da gözlem altındaki büyük kitlenin, 'ortalama doğal radyasyon dozunun' 100 katı kadar daha çok doz almış olmasına karşın, bu grupta bile radyasyonun etkisine bağlanabilen kanserden ölüm sayısının azlığı ilginç. Buradan, Japonya'daki 200 mSv'lik ani dozun yanında, Çernobil'in Avrupa'da ve Türkiye'deki halk kitleleri için 1986/1987'de oluşturduğu ve ortalama doğal radyasyon dozunun en çok yarısı kadar olabilen, zamana yayılmış (böylelikle hücrelerin kendilerini koruma mekanizmalarının devreye girebileceği) süregelen 1 mSv'lik çok daha alçak bir dozun etkisiyle olabilecek kanserden ölümlerin belirlenemeyeceği sonucu çıkarılabilir.



Bu nedenle, alçak dozların etkileriyle ilgili değerlendirmeler, elde daha tutarlı bilimsel başka bir ölçü olmadığından, ancak o bölgedeki doğal radyasyon dozlarıyla ve bunların değişimleriyle karşılaştırılıp yapılabilmekte ve topluluk ışınlamalarında, topluluk dozu hesaplanarak bir sonuç çıkarılabilmekte. Ya da başka bir deyimle, bilimin eriştiği bugünkü düzeyde, çok düşük dozlar için 'ölçü', 'doğal radyasyon dozu' olmak durumunda.

Özetle, doğal radyasyon nedeniyle, bir kişinin yaşam süresince aldığı doz 100-200 mSv arasında. Çernobil gibi herhangi bir kaynaklı 1 mSv'lik 'ek bir doz', kanser gibi bir hastalığın oluşumu için ne 'tetikleyici bir doz', ne de 'bardağı taşıran' ek bir doz olarak görülmeli. Böyle bir 'ek doz', zaten sürekli olarak doğadan ve diğer kaynaklardan alınmakta olan dozun içinde yavaş yavaş, zamanla entegre olarak²⁰, onu bir miktar yükselten bir doz olarak görülmeli ve buna göre bilimsel olarak değerlendirilmeli. Ayrıca doğal radyasyon dozunun oldukça büyük olan 'normal salınım aralığını' da gözardı etmemek gerekiyor.

Ancak bu, özellikle büyük halk kitlelerini etkileyen düşük dozların önemsenmemesi anlamına da gelmemeli. Bugün



bilim, son altmış yıldır büyük halk kitleleri üzerinde yapılan ayrıntılı çalışmalara karşın düşük radyasyon dozlarının etkisini, gözlem ve deneyimlere dayalı olarak kanıtlanamıyorsa ve eğer gerçekten de böyle bir etki varsa, başka daha büyük etkenlerin bastırmasıyla da ayırtanamıyorsa, düşük radyasyon dozlarının etkisi bilimsel olarak yok denemez, ama var da denemez.

Çernobil kazasının 1986'da etkilediği bazı Avrupa ülkelerinde olduğu gibi halkı paniğe sürükleyebilecek 'aşırı önlemlerin' medyada ilgili ilgisiz, daha çok 'sözde uzmanlarca' önerilmesi yanlış. Halkın hergün gazetelerde yayımlanan besinlerdeki Bequerel sayılarına göre, işin aslını haklı olarak bilmeden, çok az kullanılan maydonozu bile korkarak almaları, bu yanlışın sonucu. Türkiye'de olduğu gibi bazı yetkililerin 'radyasyonlu çay daha lezzetli oluyor' şeklinde TV kameraları önündeki açıklamalarıyla radyasyonun etkisinin 'hafife alınması' ve halkın yanlış bilgilendirilmesi de bir başka yanlış.

Bu nedenle özellikle büyük insan kitlelerinin etkilenebileceği durumlarda aşırıya kaçmamak kaydıyla, radyasyondan ve radyoaktif maddelerden 'makul korunma önlemlerinin, ilgili bilimsel, teknik ve yönetimsel yöntemlerle' alınması doğru olur. Ayrıca kapsamlı bilimsel çalışmaların ve ölçümlerin özellikle yoğun radyoaktif bölge ve yörelerde, her yere yetişmeleri olanak dışı olan sadece 'resmi kurumlarca' değil, ilgili tüm üniversite ve araştırma merkezlerince başlatılması ve zaman zaman oluşturulacak ortak Bilim ve Teknik Kurulu, sonuçları değerlendirdikten sonra seçeceği 'konunun gerçek uzmanlarınca' halkın doğru bilgilendirilmesi izlenecek gerçekçi yol olacak. Bunun içinse ön hazırlıkların gerekeceği açık. Örneğin, bugün Almanya'da radyoaktif maddelerle ve bunların çevreyi ve insanı etkilemeleriyle ilgili çok çeşitli ve kapsamlı bilimsel çalışmaların yapıldığı, sayıları elliye geçen, birçoğu bağımsız araştırma merkezi, laboratuvar ve bir o kadar da üniversite var (20 kadar nükleer santralin laboratuvarları bu sayının dışında). Ayrıca her eyaletin devlet kurumlarında ve merkezdeki ilgili bakanlıklarda

VE ÖNERİLER

radioaktiviteyle ilgili ölçü sonuçlarının toplandığı, değerlendirilip bunların yıllık teknik raporlarla ve İnternet sitelerinde halka açıklandığı 'birimler' var. İleriye dönük kaza durumları için ayrıntılı planlarla zaman zaman ilgili nükleer tesislerde ve çevrelerinde denemeler yapılmakta ve 'halkı koruyucu önlemler' gözden geçirilerek planlar yenilenmekte. Ayrıca sayıları birkaç binin üzerinde olan radyasyon fizikçileri, bunların İsviçre'deki meslekdaşlarıyla birlikte kurdukları ortak büyük bir dernek, yaptıkları bilimsel çalışmaların açıklandığı dergileri ve her yıl yapılan toplantıları bu konulardaki çalışmaların önemini yansıtmakta. Diğer yandan Almanya'da bu konularla ilgili yüzlerce bilimsel ve teknik kitap, araştırma raporu yayımlanıyor.

Türkiye'de bu konulardaki çalışmalar, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda (TA-EK) deneyimli ama sayıları az, değerli meslekdaşlarımızla yapılmakta ve Almanya'dan izleyebildiğimiz kadarıyla başka araştırma merkezlerinde, üniversitelerde pek bir çalışma yapılmıyor. Ayrıca Türkiye'de, Almanya'dakilere oranla çok az sayıda radyasyon fizikçisi ve yayın var. Radyasyon fiziğiyle ilgili kitaplardansa, yazının ve bir meslekdaşının süresini doldurmuş ve mevcudu kalmamış 2-3 kitabından başkası, bildiğimiz kadarıyla, ne yazık ki yok. Almanya'nın iki katı büyüklüğündeki Türkiye topraklarında, hava, su ve besin maddelerindeki radioaktiviteyle ve bunlardan oluşabilecek radyasyon dozlarıyla ilgili kapsamlı bilimsel çalışmaların yapılabilmesi ve herhangi bir kaza duru-

muna hazırlıklı olunabilmesi için tüm Türkiye'yi kapsayan üniversitelerin, araştırma merkezlerinin, endüstrinin ve hatta 'büyük belediyelerin' TAEK'in yanında yer almaları, ilgili birimleri ve laboratuvarları kurmaları önerilir. Ayrıca bunlarla ilgili yasa ve yönetmeliklerin çıkarılması da gereklidir.

Not: Bu yazının hazırlanmasında, bir dizi öneri ve katkıları nedeniyle, Münih'teki GSF- Radyasyon Araştırma Merkezi'nde bu konularda yıllardır bilimsel çalışmalar yapan Ankara Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nden değerli arkadaşım Dr. H. Yeter Göksu ile, yazının birçok kez kontrolünün yanı sıra, tüm çizelge ve resimlerin yapımında ve yazıyı uyarlanmasında son üç aydır büyük emeği geçen eşim Fizik Y. Müh. Berksan Atakan'a burada teşekkürü bir borç bilirim.

Dr. Yüksel Atakan

Radyasyon Fizikçisi
ybatakan@gmail.com

Kaynaklar:

UNSCER 2000 Raporları (Birleşmiş Milletlerin atomik radyasyonun etkilerini inceleyen bilimsel alt kurulu raporları)

ICRP 60 ve 90 Raporları (Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu)

IAEA Raporları (Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu)

Almanya'daki çeşitli Kurumların İyonlayıcı Işınlara İlgili Bilimsel Raporları

(BMU, SSK, - GSF; W.Jacobi; A.Kellerer; JSH-Raporları/ www.bmu.de/www.ssk.de/www.gsh.de/www.ish.de)

Çernobil Kaynaklı Radyoaktif Serpintilerin Çevreye ve İnsana Etkileri, Y.Atakan, Tübitak 1994.kitabı, 190 sayfa (kitap tükendi)

Notlar

1. Nobel Ödüllü Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen'in adından (1845-1923).Röntgen'in ilk kez 1895'de araştırmaları bulduğu o zamanki 'bu gizemli ışınlara' kendisi X-ışınları adını vermiştir.
2. Nobel ödüllü Fransız fizikçi Becquerel, Antoine Henri (1852-1908)'nin adından.
3. Medyada çok kez, 'iyonlayıcı ışınlara' anlamında 'radyoaktif ışınlara' kullanılmaktadır. Bu deyim yanlıştır, çünkü radyoaktivite 'ışınlardan' değil, 'maddenin' bir özelliğidir.
4. Elektriksel yük birimi, 1 Coulomb = 6,232' 10¹⁸ e⁻ => 1 Amper.1 Saniye, Fransız fizikçi Coulomb Charles Augustin de (1736.1806)'nin adından
5. İngiliz fizikçi ve radyolog Louis Harold Gray (1905 - 1965)'in adından
6. H : İngilizce Hazard (hasar, bozunma) sözcüğünden.

Aslında İngilizce 'Hazard', arapça 'hasar' sözcüğünden türemidir !

7. İsviçreli Tıp Doktoru ve Fizikçi Sievert Rolf (1896-1966) adından

8. Pozitron : Bk.Çizelge 1

9. Nötrino : Bk.Çizelge 1

10. Yeryüzü kaynaklı

11. Dünyadaki enerji sorunu ve yakıtın pahalı olması nedeniyle, daha az yakıt kullanmak amacıyla evlerin pencere ve kapılarını iyice izole etmek önerilmektedir. Bu ise evlerin havasındaki doğal radon gazı miktarını ve dolayısıyla akciğerlerdeki radyasyon dozunu çoğaltmaktadır. Buna karşı alınacak en iyi önlem, soğuk kış günlerinde bile 1-2 dakika kapıyı pencereyi iyice açıp evi havalandırmak olmalıdır (Pencereyi bütün gün aralık tutmak, evi duvarlarıyla birlikte tümüyle soğutacağından çok daha fazla enerji kaybına neden olur).

12. Birleşmiş Milletlerin atomik radyasyonun etkilerini inceleyen bilimsel alt kurulu

13. UNSCEAR 2000 Bilimsel Raporuna göre.

14. Reaktörlerde çok az miktarda oluşan ve diğer Pu izotoplarıyla birlikte bulunan Pu 239'dan nükleer bomba yapılabileceği medyada sık sık yer almaktadır.Ancak bu çok zor ve verimi düşük bir iştir (Daha fazla bilgi için BT Dergisi Ağustos 2004 Ekindeki Prof.Dr.Vural Altın'ın açıklamalarına bakılabilir)

15. Çeşitli canlıların radyasyona duyarlılığı ya da direnci farklıdır. Yarı ölümcül doz örneğin köpek, keçi ve domuzda 2500 mSv' e düşerken, farede 5600, tavşanda 7000, alabalıkta 15000 ve arılarda ise 1 milyon mSv'e kadar çıkmaktadır.

16. Epidemioloji : Büyük halk kitlelerinde kanser gibi hastalıkların sıklık ve dağılımını, nereden kaynaklandığını, etkenini; bunların yayılmasını ve şiddetini etkileyen koşullarla birlikte araştırıp inceleyen ve başka daha sağlıklı halk kitlelerindeki aynı cins olaylarla karşılaştırıp sonuçlar çıkaran bilim dalı. Epidemiolojik çalışmalar çoğunlukla tam kanıtla sonuçlanmasa da, herhangi bir hastalığın neyin sonucu olarak ortaya çıkmış ya da çıkmamış olabileceğini gösterebilirler ve bulgu sayısı çoğaldıkça istatistiksel güvenilirlik de artar.

17. UNSCEAR : Birleşmiş Milletlerin atomik radyasyonun etkilerini inceleyen bilimsel alt kurulu

18. Prof.W.Jacobi.GSF München 'Strahlung und Risiko'

19. Bu sayı, 1 milyon yaşayan insan başındır. Daha yukarıdaki ise ölenlerin sayısına göre orandır.

20. Örneğin Çernobilden hava akımlarıyla gelen radyoaktif maddeler, bir anda insana ulaşmamış, topraktan zamanla yetişen besin maddeleri ve hayvanlar yoluyla azar azar insan vücuduna çok az düzeyde girmiştir

Yüksel Atakan'ın mesleki özgeçmişi:



Türkiye'nin ilk Radyasyon Fizikçilerinden olan Yüksel Atakan 1961 yılında Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümünü bitirdikten sonra Türkiye Atom Enerjisi Kurumunda, Çekmece Nükleer Araştırma Merkezinde ve Ankara DSİ Radyoizotop Laboratuvarında görev yaptı. 1972'de Almanya'da Heidelberg Üniversitesinde doktora yaptıktan sonra Nükleer Santrallerin projelendirilmesinde Radyasyon Fiziği dalında Almanyada Brown Boveri Reaktorbau ve SIEMENS HANAU'daki Nükleer Yakıt Elemanları yapımı firmalarında 25 yıl çalıştı.Bu arada, 1981'de Akkuyu'da planlanan Nükleer Santralin işletme öncesi 'Doğal radyasyon ölçümü planlamasını' ve 1984'de yine aynı projede, santral seçiminde radyasyona karşı önlemler konusunda IAEA ve TAEK uzmanı olarak kısa süreli görevler üstlendi. Almanyada çeşitli Nükleer Standartlar (KTA) Teknik Kurullarında görev yaptı. Emekli olduktan sonra da radyasyon fiziği konusunda çalışmalarını sürdüren Y.Atakan 2004 yılında Heidelberg'de yapımı süren 'Hızlı-Ağır İyonlarla Kanser İyileştirme Merkezi Projesinde' Radyasyondan korunmayla ilgili danışmanlık görevi üstlendi. Y.Atakan'ın TAEK, TÜBİTAK, ve Evrim Kitabevince yayımlanan üç kitabı (ikisi çeviri), ABD, Almanya ve Türkiyede yayımlanmış bir dizi teknik ve bilimsel yazısı var.

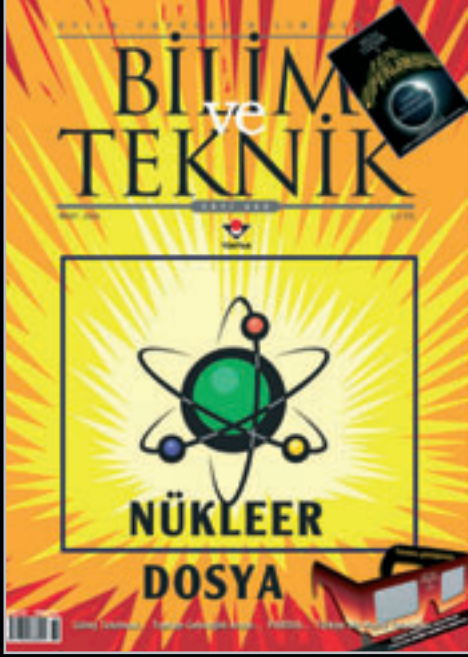


1 YILLIK ABONELİK

e-dergi:

25 YTL (25 milyon TL)

Yurtdışı: 15 Euro - 18 USD



Basılı dergi:

35 YTL (35 milyon TL)

Yurtdışı: 40 Euro - 50 USD

e-dergi:

20 YTL (20 milyon TL)

Yurtdışı: 12 Euro - 14 USD



Basılı dergi:

30 YTL (30 milyon TL)

Yurtdışı: 40 Euro - 50 USD

Değerli Bilim ve Teknik / Bilim Çocuk okurları

Hem bize daha kolay, daha çabuk ve daha ucuza erişebilmenizi sağlamak, hem de daha geniş kitlelere ulaşabilmek için yeni bir hizmetle karşınızdayız. Artık "e-dergi" aboneliği seçeneğini kullanarak dergilerinizi İnternet üzerinden de izleyebileceksiniz. Bu seçenek de, tıpkı basılı dergiye abonelik gibi sizleri şimdiye kadar çıkmış tüm dergilerimize erişme hakkına kavuşturuyor. Ama, o taze mürekkep kokusundan vazgeçemeyen, dergiyi koltuğuna kurularak okumanın tadına alışmış, koleksiyonlarının kesintiye uğramasını istemeyen okurlarımız da basılı dergi seçeneğini tıklayarak aynı ayrıcalıklara sahip olacaklar.

e-dergi uygulamasını aynı zamanda, posta maliyetlerinin yüksekliği ve iletim süresinin uzunluğu nedeniyle yeterince ulaşamadığımız yurtdışındaki büyük vatandaş kitlemiz ve Türk Cumhuriyetleri'ndeki soydaşlarımıza da erişebilmek için başlattık.

Dergilerimize abone olmak isteyen okurlarımız <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/> adresindeki e-dergi sembolü üzerine tıklayacaklar. Ulaştıkları sayfadaki seçeneğin üzerine tıkladıklarında karşlarına çıkan formları doldurup gönderecekler ve kendilerine birer kullanıcı adı ve şifre verilecek. Bunlarla dergilerimizin yeni sayılarına ve arşivine ulaşacaklar.

Ailemizin yeni üyelerini sevgiyle kucaklıyoruz...