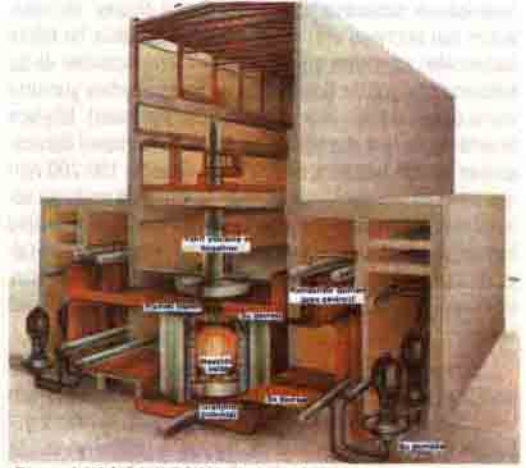


Nükleer Reaktör Kazaları ve RADYASYON

Doç.Dr. Selçuk ALSAN •

Nükleer reaktörler, uranyum atomlarının parçalanmasından elde edilen ısıyı kullanarak su buharı oluşturan ve alternatif akım jeneratörlerinin türbinlerini su buharı ile çalıştırarak elektrik enerjisi elde eden santrallardır; bunlara nükleer santral da denilmektedir. Nükleer reaktör kazası, bir reaktörün içindeki radyoaktivitenin bir bölümünün çevreye yayılmasıdır. Normalde, radyoaktif parçalanma ürünlerinden doğan milyarlarca curie'lik radyoaktivitenin % 99'u uranyum yakıt çubuklarının kristal yapısında tutulur. Bu radyoaktivitenin serbest kalmasının tek yolu, soğutucu su boruları sisteminin çalışmaması sonucu, reaktör kalbinin erimesidir. Reaktör tamamen durdurulsa bile, kısa ömürlü radyoaktif izotopların bozunması hâlâ sıcaklık oluşturur. 1979'da ABD'de Three Mile Adasındaki (Harrisburg) reaktör kazasında reaktör kalbinin erimesine çok az bir şey kalmıştı, reaktör kalbi şans eseri olarak kurtuldu.

Haflif su reaktörlerinde kalbin erimesi, reaktörlerin toplam 10.000 yıllık hayatında bir kere meydana gelir. Örneğin 1000 reaktörün 10 yıl çalışması ile 10.000 yıl doldurulmuş olur ve bu 10 yılda bir kaza olması muhtemeldir. En ağır bir reaktör kazasında 11.000 kişi hemen ölecek, 94.000 kişi gelecek yıllarda kanser olacaktır. Bu kadar ağır bir kazanın olma ihtimali 10 milyarda birdir. Daha hafif bir kazada, hemen 2 kişi ölecek, gelecek yıllarda ise 50.000 kişi kansere yakalanacaktır. Böyle bir kazanın olasılığı ise milyonda birdir. Kanser tehlikesi 5 rad'dan az ışın almışlarda daha siktir, böylece kanserlerin çoğu, reaktörden hayli uzakta olanlarda meydana gelecektir. Genellikle 500 rad altında ışın almışlar, kemikliliği nakli yapılmadan bile iyileştirilebilir. Akut radyasyon hastalığı reaktörden uzaklığı 5-8 km den az olanlarda görülür. Genellikle 50-100 rad'dan fazla radyasyon olasılığı varsa reaktörün çevresi boşaltılır. Radyasyon çok hızla yayılmışsa, radyasyon bulutu geçene kadar evlerde, tercihen bodrumda, pencereler kapalı oturmak gerekir. Bu insanlar yine de gama ışını almışlar ve radyoaktif ile kirlenmişlerdir; tehlikeli ajandan çıkar çıkmaz radyoaktiviteden arındırılmalı ve akut radyasyon hastalığı için tedaviye alınmalıdırlar. En ideal boşaltma, radyoaktif bulut oluşmadan önce olanıdır. Radyoaktiviteye maruz kalmışsa mutlaka iç ve dış gıysiler değiştirilmelidir. Duşların yararı yerine zarar olmaktadır. Eller ve yüz yıkanmalıdır. İlk 2 hafta ancak yüksek doz radyasyon almışlar hastaneye yatırılır. Bu gibi kazalarda bir insanın 600 rad üstünde radyasyon alması çok nadirdir (ancak reaktör yakınında saatlerce açıkta kalanlar bu kadar radyasyon alabilir). Ancak 600 rad üstü radyasyon alan insanlardır ki ilk 2 haftada ölür. 3-5 mil yarıçapındaki bir bölge birkaç saatte boşaltılabilir.



Çernobil'deki RBMK tipi reaktör.

İŞINLAMANIN CANLILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ NELERDİR?

Bir reaktörün oluşturduğu radyoaktif izotoplar üç türlü ışın saçar: alfa, beta ve gama. Alfa ışınları (helyum çekirdekleri) deriden geçemez, beta ışınları (elektronlar) deriden çok az nüfuz eder, gama ışınları ise (çok kısa dalgalı elektromanyetik dalgalar) deriden ve vücuttan geçer. Tehlikeli ışınlar saçan (radyoaktif) izotoplar hava, su, süt veya besinlerle vücuda girer. Alfa ve beta ışını saçan izotoplar yalnız izotopun yoğunlaştığı organlarda tahribat yaparlar, gama ışını saçan izotoplar ise tüm organlara zarar verir.

Hiroşima ve Nagasaki atom bombalarının atılışından sonra 700-800 rem dozunda ışın almış olan insanların % 90'ı bir hafta içinde öldüler. Bu insanlarda ne yanıklar vardı, ne de patlama nedenglerinden doğabilecek yaralanmalar. Bu ölümlerin nedenini başka şeylerde aramak gerekiyordu. Işın ilginç yanı 700-800 rem'lik bir enerjinin, çok küçük olmasına rağmen (bu enerji, vücut ısısını on milyonda bir yükseltmeye bile yetmez) öldürücü oluşuydu. Işınlama vücudun tüm dokularını eşit etkilemez, bazı hücreler ışınların etkisi ile diğer hücrelere göre daha çabuk ölür.

25 rem'lik bir ışınlama (öldürücü dozun otuzda biri) vücudun tamamına bir kez verilse bile vücuttaki lenfositlerin büyük bir bölümünü öldürür. Sonuç: bütün mikroplara karşı direncin kaybolması. Bereket ki bu durum geçicidir, ışınlanmadan sonraki günlerde bazı organlarda (dalak, lenf bezleri, kemik iliği ve gençlerde timüs bezi) canlı kalabilmiş ana hücreler yeni lenfositler yapar.

50 rem'lik tek bir ışınlama erbezlerindeki sperma hayvancıkları (spermatozoid) ana hücrelerinin hemen hepsini öldürür, böylece kişi kısırlaşmış olur. Bu durum da geçicidir, birkaç ay sonra ana hücrelerden yeni sperma hayvancıkları yapılır.

Bu iki örnekten anlaşılmalıdır ki, ışınlama, özellikle embriyoner tipteki (hızla çoğalan ve az farklılaşmış) hücreleri öldürmektedir. Vücudumuzda hergün bin-on bin milyar hücre ikiye bölünerek çoğalır. Bu hücre bölünmeleri, yaşlanmış hücrelerin yerine genç hücrelerin gelmesini sağlar (derinin ve

* TÜBİTAK, EGİM Müdürü

mide-barsak sisteminin yüzeyinden sürekli dökülen hücreler, bütün kan hücreleri vb); kıllar, saçlar ve tırnaklar bu hücre bölünmeleri sayesinde büyür; erkekte spermatozoidler de bu bölünmelerle çoğalır (kadınlarda yumurtalıklardaki yumurta sayısı doğurmda belirlenir ve hayat boyu aynı kalır). Böylece önemli dozda ışın alındığında bu hücre bölünmeleri duracağından bir seri bozukluk ortaya çıkar. Örneğin 150-200 rem ışın alınması sonucu şunlar görülür: lenfositlerin azalması sonucu mikroplara karşı direncin yokoluşu (her türlü mikroplu hastalığın artışı), deride yara ve litihaplar, ishal, kansızlık (alyuvar azalışı), kanın pıhtılaşmaması (kanda pıhtı hücreleri olan trombositlerin azalışı) sonucu kanamalar, geçici veya kalıcı kısırlık.

Bu ışın dozunun çok altındaki dozlar, gebeliğin ilk haftalarında düşüklere neden olur, çünkü embriyon hücreleri kolayca ölür veya bölünüp çoğalamaz hale gelir. Işınlama gebeliğin daha geç dönemlerinde meydana gelirse ya düşük olur veya anormal çocuk doğar. Örneğin 1945'de Japonya'da çeşitli anormallikleri olan bebekler doğdu (küçük kafa, geri zekâlılık vb). Bazı ülkelerde karnına 5-10 rem'den fazla ışın uygulanmış gebe kadınlarda çocuğun alınması zorunludur, çünkü anormal çocuk doğma şansı çok fazladır.

Tekrar ışın çeşitlerine gelelim. Gama ışınları saçan bir izotop, ister vücut dışında olsun (bu ışınlar rahatlıkla deriden geçer), ister hava veya besinler yolu ile vücut içine alınmış olsun, ışına duyarlı hücreleri derhal öldürür veya bu hücrelerin çekirdeklerinde (DNA ve genlerde) ilerde kansere yol açabilecek tehlikeli değişimler (mutasyonlar) yapar. Alfa ışını

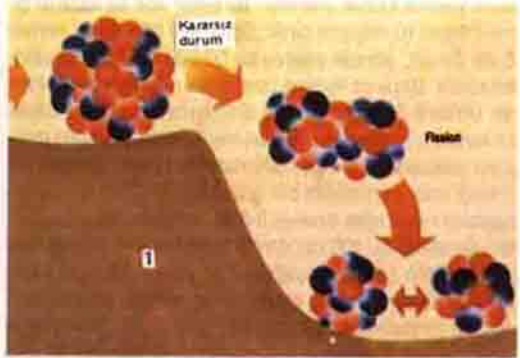
saçan izotoplar, uzun süre maruz kalmadıkça, vücut dışında tehlikesizdir. Buna karşı alfa ışınları saçan bir izotopun vücuda girmesi korkunç sonuçlar doğurur (özellikle bu izotop hemen vücuttan atılmazsa). Beta ışınları için de alfa ışınları için söylenenler doğrudur, şu farkla ki, beta ışınları alfaya göre daha nüfuz edici, daha hafif ve daha hareketli olduğundan alfa'dan daha tehlikelidir. Daha da fazlası beta ışını saçan stronsyum 90, iyod 129, iyod 131, cesium 137 gibi birçok izotop, vücuttaki organik ve inorganik moleküllerle bütünleşebilir, böylece vücutta kalış süresi uzar ve organizma birçok seviyede radyoaktivite almış olur.

Işınlamalar kansere neden olabilir mi? Bu kuvvetle muhtemeldir, fakat cevap, bazı bakımlardan kolay değildir; 1. Normal bir hücreyi kanserli bir hücreye dönüştüren olayları iyi tanımıyoruz. 2. Özellikle endüstri çağından beri, çevremizde bulunan birçok kimyasal madde kanser veya kan kanseri (lösemi) yapabilmektedir (örneğin taşkömürü ve petrol damıtma ağır yağları yanmasından elde edilen benzopyrene kanser yapıcı, benzen lösemi yapıcıdır). 3. Sağlam bir hücrenin kanserleşmesi kanser veya kan kanseri oluşmasına yetmez, vücudun kansere karşı savunması da azalmış olmalıdır (ışınlama bu savunmayı azaltabilir).

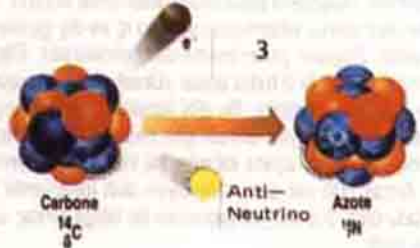
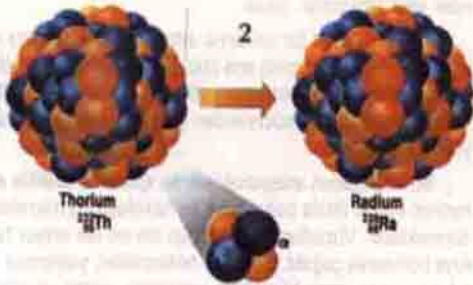
Bu nedenlerle ışınların kanser yaptığını ortaya koymak kolay değildir. Yeterli sayıda insan üzerinde istatistik sonuçlara bakılmalıdır; yalnız alınan ışın dozu değil, kişilerin sağlık durumu, beslenme şekli, diğer kanser yapıcı maddelere maruz kalışları (sigara, mesleki maruz kalışlar vb) belirtilmelidir.

ÜÇ TÜRLÜ RADYOAKTİVİTE

Simyacılardan hayalinde olduğu gibi kurşun altına dönüşmese bile, radyoaktif bir eleman diğer bir elemana dönüşmektedir. Kararsız durumdaki bir atom (1) bir yokuşun başındaki top gibidir; atom parçalanır (filyon) ve 2-3 farklı atom oluşur, bu sırada gama ışınları çıkar. Alfa radyoaktivitede bir çekirdek, alfa parçacığı (helium çekirdeği) atar (2). Beta radyoaktivitede her proton bir pozitron ve bir nötrino atarak nötrona veya her nötron bir elektron ve bir antinötrino atarak protona dönüşür. Bu ışınlar atomları iyon (elektrik yüklü atom) haline getirir. Dokuların çoğu % 60-70 su içerir. İyonizan ışınların etkisi ile H₂O molekülü H⁺ ve OH⁻ iyonlarına ayrılır, bu iyonlar



ise hücre içindeki organik molekülleri bozarlar.



RADYOAKTİVİTE ÜNİTELERİ

1 Curie	: 1 gram radyum 226'nın radyoaktivitesi, saniyede 37 milyar atomun bozunmasına eşit.
millicurie	: 10^{-3} curie,
microcurie	: 10^{-6} curie,
nanocurie	: 10^{-9} curie,
picocurie	: 10^{-12} curie,
1 Becquerel	: Saniyede 1 atomun bozunması.
1 curie	: 3.7×10^{10} becquerel
1 becquerel	: 27 picocurie
1 Rad	: İşinlenen maddenin gram başına 100 erg absorbe edildiği
1 gray (Gy)	: 100 rad
1 Rem	: (roentgen equivalent man'in başharfleri): Bir insanın aldığı radyoaktivite ölçüsüdür. Rad olarak absorbe olan dozun, ışın tipine göre değişen bir faktörle çarpılmasından elde edilir. Beta, gama ve X ışınları için bu faktör 1'dir (1 rad= 1 rem). Nötronlar için bu faktör 1-10 arasında değişir. Alfa ışınları için faktör 10'dur (1 rad= 10 rem).
1 Sievert	: 100 rem.
1 Röntgen (R)	: 1 cm ² havada bir elektrostatik birimlik iyon oluşturan radyasyon 1mR=10 ⁻³ R. Radyoaktivite gazlarda m ³ , toprakda m ² , sıvılarda litre ve katılarda kg başına ifade edilir. Vücut yumuşak dokuları 1 R'lik radyasyonda 0.93 rad'lık ışın absorbe eder.

sillere geçmeden kendiliğinden ekarte edilmiş olur. Fetüs mutasyona rağmen yaşarsa iki olasılık vardır:

1. Mutasyon dominant'dır (baskın); bu durumda mutasyonun neden olduğu ağır kusurlar, dominant kalıtım esaslarına uyarak gelecek nesillere geçer.
2. Mutasyon resesif'dir (çekinik); bu durumda mutasyon ilk nesilde gizli kalabilir ve etkileri gelecek nesillerde görülür.

Kısaca şunu diyebiliriz: ışınlama ile ışınlanmanın geç zararları arasında geçen süre çok uzundur; lösemi ve kanserler için onlarca yıl, genetik mutasyonlara bağlı ağır kusurlar veya kanserler için gelecek nesilleri de kapsayan bir zaman dilimi.

İŞINLAMA HANGİ DOZLARDA TEHLİKELİDİR?

Son 50 yılda, izin verilen ışınlama dozu büyük değişiklik

Bazı çalışmalar, alınan ışınlama dozu ile kanser sıklığı arasında istatistik bir ilişki göstermiştir. Örneğin ABD'de Ports mouth tersanesinde nükleer denizaltı yakıtı ile çalışan işçiler arasında kanserden ölüm, normale göre 2 kat artmaktadır. 1980'de Colorado'daki Rocky Flats plutonium fabrikası civarında yaşayan halk üzerinde yapılan bir inceleme şunu göstermiştir: fabrikadan uzaklaştıkça kanser sıklığı azalmaktadır.

İşinların yaptığı genetik mutasyonlara gelince, bunlar kendiliğinden oluşan mutasyonlardan farklıdır. Mutasyon, hücre çekirdeğinde DNA molekülü üzerinde yazılı genetik mesajın değişmesi demektir. DNA molekülünde nicelik olarak önemsiz değişimler, nitelik bakımından felâketler (kansere vb) doğurabilir.

Basitleştirmek için 4 türlü mutasyon ayırtedebiliriz:

1. DNA'nın değişen bölümünün önemli bir görevi yoktur veya bu değişikliği hissettirmeyecek DNA kopyaları mevcuttur, genetik mesaj iletmeye devam edecektir.
2. Mutasyon, seks hücrelerinde (yumurtada veya spermatozoidde) meydana gelmiştir. Bu tip mutasyon, embriyon'un ölümüne yolaçarsa düşük olur, embriyon yaşarsa anormal çocuk doğar.
3. Mutasyon, seks hücreleri dışındaki hücrelerde ise ilerde çeşitli kanserler oluşacaktır.
4. Çok az bir olasılıkla mutasyon yararlı olabilir. Bu durum nadirdir, çünkü milyonlarca yıllık bir evrim sonucu oluşmuş bir genetik kod'un değişmesi büyük olasılıkla zararlı olacaktır.

İşinların mutasyon yapışı ile kanser veya lösemi oluşması arasında geçen süre, işinların kaç yaşında alındığına bağlıdır. Gebelik sırasında ışın almış bir fetüs'de hemen lösemi veya kanser başlayabilir ve bu risk en az 10 yıl sürer. Işınlama doğumdan sonra meydana gelmişse, ilk lösemi olguları ışınlamadan en az 2 yıl sonra görülür ve risk en az 25 yıl devam eder, ilk kanser olguları ise ışınlamadan 15 yıl sonra görülmeye başlar ve risk en az 30 yıl devam eder.

Fetüs'ün ölümüne neden olan mutasyonlar gelecek ne-

RADYOAKTİF İZOTOPLARIN SAĞLIĞA ZARARLARI

CESİUM 137: Kaslar, dalak ve karaciğer başta olmak üzere bütün organlara girer. Beta ve gama ışınları verir. Yarıömrü 30.2 yıl.

İYOD 131: Tiroid bezinde yoğunlaşır ve 20-30 yıl sonra tiroid kanserine neden olur. Beta ve gama ışınları verir. Yarıömrü 8.05 gün.

KRYPTON 85: Lösemi ve lenf bezi kanserlerini artırır. Bütün organlarda birikir. Beta ve gama ışınları verir. Yarı ömrü 10 yıl.

RUTHENIUM 106: Kemikliğinde kan hücrelerinin ana hücrelerini öldürür. Kemikte, kalınbarsakda ve akciğerlerde birikir. Beta ve gama ışınları verir. Yarı ömrü 1 yıl.

TELLURIUM 132: Karaciğerde metabolize olduğu için bu organın kanserlerini artırır. Beta ve gama ışınları verir. Yarıömrü 78 saat.

BARYUM 140: Kalsiyum gibi kemikte konsantre olur ve 20-30 yıl sonra kemik kanserlerine neden olur. Beta ve gama ışını verir. Yarı ömrü 12.8 gün.

STRONSYUM 90: Kemikte oturarak kemikliliğini öldürür (aplastik anemi), bu durum ölümlü bitebilir. Beta ışınları verir. Yarıömrü 28 yıl.

RADYUM 226: Fosforlu saat minelerini radyumlu boya ile boyayan işçilerde fırçayı dudaklar ile sıvıltma alışkanlığı sonucu kemik ve üstçene habis tümörleri artmaktadır.

BİR YILDA ALINMASINA İZİN VERİLEN EN YÜKSEK RADYASYON DOZLARI*

(Reaktörlerde Oluşan En Önemli İzotoplar İçin)

İZOTOPUN ADI	BESİNLER YOLU İLE (becquerel)	HAVA İLE (becquerel/m ³)
Iyod 131	1 milyon	2 milyon
Kripton	- (gaz)	5 milyon
Stronsyum 90	1 milyon	7 yüz bin
Zirconium 95	50 milyon	5 milyon
Niobium 95	80 milyon	50 milyon
Molibden 99	40 milyon	100 milyon
Ruthenium 103	70 milyon	60 milyon
Tellurium 132	8 milyon	9 milyon
Cesium 137	4 milyon	6 milyon
Baryum 140	20 milyon	50 milyon
Lanthanum 14	20 milyon	50 milyon
Neptunium 239	60 milyon	90 milyon

* International Atomic Energy Agency, Vienna, 1982 Safety Series No: 9 Safety Standarts. Bu değerler radyasyonla çalışan işçiler içindir. Halk için uygulanan sınırlar bu dozlardan on kat daha düşüktür.

Türkiye'de havada ve besinlerde ölçülen radyoaktiviteler bu değerlerin çok altındadır. Türkiye'de havada ve besinlerde tehlikeli radyoaktivite daha önce oluşmamıştır ve bugün de yoktur.

gösterdi; bu değişikliğin nedenleri yeni bilgiler kazanılması ve farklı ışınlamaların farklı etki yaptığının anlaşılmasıdır. 1930'larda Enternasyonal Radyasyon Korunma Komisyonu yıllık izin verilen maksimum ışınlama dozunu 46 rem olarak tesbit etmişti; bu doz birçok kereler azaltılarak değiştirildi. Bugün nükleer reaktörlerde bulunan her izotop için izin verilen kişi başına yıllık ışınma dozu "becquerel" olarak yukarıdaki tabloda verilmiştir.

Radyoaktif bulut içinde en sık bulunan 3 iyon iyod 131, cesium 137 ve stronsyum 90'dır. Iyod 131'in yarılanma ömrü 8 gün kadardır. Bu izotop, tiroid bezini tarafından alınır ve ilerde tiroid'in az çalışmasına veya tiroid kanserine neden olabilir. Tiroid bezinin ¹³¹I alışı, ağızdan iyodür hapları vererek önlenir. Cesium potasyum'un ve stronsyum kalsiyum'un kimyasal özelliklerini taşır, bu nedenle cesium 137 kaslara ve stronsyum 90 kemiklere yerleşir.

KAZAYA UĞRAMIŞ BİR NÜKLEER REAKTÖRÜN HANGİ RADYOAKTİF MADDELER KAÇABİLİR?

Bir nükleer reaktör bir nükleer bomba gibi patlamaz, çünkü reaktörün kalbi kalın çelik ve beton duvarlarla örülüdür. Bu duvarlar bütünlüğünü kaybederse reaktör kalbinde mev-

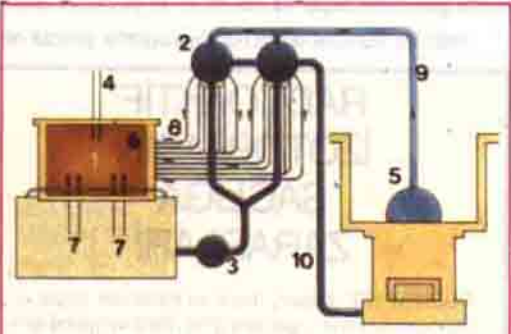
cut radyoaktif maddeler serbest kalır. Hangi maddeler? Bu birçok faktöre bağlıdır: reaktörde mevcut uranyum vb miktarı ve radyoaktivite seviyesi (yakıtın reaktörde kalma süresi), oluşan radyoaktif maddelerin yarıömrü ve nihayet reaktör kalbindeki ısı ve kazanın oluş biçimi.

Basınçlı su ile çalışan bir Fransız reaktörünü (PWR) alalım, bu reaktör 1000 megawatt gücündedir, çalışmak için 100 ton kadar yakıt gerektirir. Yakıt başlangıçta parçalanabilen (fissil) uranyum 235 ile (% 3.25) parçalanamayan (non-fissil) uranyum 238 karışımından ibarettir. Uranyum 238, bir nötron kaparak parçalanabilen plütonyum 239'a dönüşür.

Atom çekirdeği parçalanması (filyon) çok ağır çekirdeklerle özgül bir olaydır. Bir nötron'un çarpması sonucu ağır çekirdek, 2 veya 3 daha küçük ve hafif parçaya ayrılır, bu hafif çekirdeklerin hepsi radyoaktiftir, bunlara filyon ürünleri denir.

Bir reaktörün bir günde oluşturduğu filyon ürünlerinin gram olarak ağırlığı, o reaktörün megawatt olarak ısısal (termik) gücüne eşittir. Örneğin 1 gr U 235 veya plütonyum'un parçalanması (yani yaklaşık 1 gr filyon ürünleri oluşması) sırasında reaktör 1 megawatt/gün ısı enerjisi verir. O halde 3000 megawatt'lık bir reaktör günde 3000 gr = 3 kg filyon ürünleri oluşturacaktır. Bir yıl sonra bu reaktörde yaklaşık 1 ton (3x360=1080 kg) filyon ürünleri birikecektir. Bu ise 1000 Hiroşima atom bombası demektir (Hiroşima'da 700 gr U 235 parçalanmıştı). PWR (pressurized water reactor) tipi reaktörlerin kalbinde 2 milyar curie'den fazla radyoaktivite birikir. Böyle bir reaktörde başlıca 20 kadar radyoaktif madde oluşur: iyod 131, 133 ve 135 stronsyum 89, 90 ve 91, yttrium 91, cesium 134 ve 137; tellurium 129, 131 ve 132; baryum 140; lanthanum 140 vb.

Kaza halinde bu elemanların hepsi atmosfere karışmaz. Iyod 131 gibi en uçucu olanlar gaz şeklinde, stronsyum ve cesium gibi diğerleri havada asılı taneçikler (aerosol) olarak dışarı çıkar. Bir elemanın ne kadarının reaktörü terkedeceği elemanın elemana değişir, elemanların reaktörü terkedeceği yüzdeleri şöyledir: iyod 131, 133 ve 135 % 70-100; cesium



RBMK tipi bir reaktörün şeması

1. Reaktör kalbi, 2. Kondansör (su buharını suya çevirici), 3. Su pompası, 4. Yakıt yükleme ve boşaltma, 5. Türbin ve alternatif akım jeneratörü, 6. Uranyum çubukları, 7. Kontrol çubukları, 8. Kuvvet tüpleri, 9. Su buharı (280°C) 10. Su dolaşımı

DÜNYADAKİ NÜKLEER REAKTÖR KAZALARI

Dünyada bugün 375 sivil nükleer santralin faaliyette olduğu tahmin ediliyor. Sovyetler Birliği'ndeki ilk nükleer santralin 1954'te çalışmaya başlamasından bu yana nükleer santrallerin toplam 3.800 yıllık deneyim kazandıkları hesaplanıyor.

Bilinen reaktör kazalarının başlıcaları şunlar:

7 Ekim 1957-İngiltere'de Liverpool'un kuzeyindeki plutonyum üreticisi Windscale reaktöründe çıkan bir yangın, çevreye radyoaktif maddelerin yayılmasına neden oldu. 1983 yılında İngiltere hükümeti bu kaza yüzünden 39 kişinin ölmüş olabileceğini açıkladı.

1957-ABD'de Colorado'da Rocky Flats nükleer reaktöründe yangın ve patlamalar sonucu çok yüksek doz radyoaktif plutonyum ile yüklü 620 filtrenin hepsi yerinden koptu ve etrafa saçıldı. 12 mil ötedeki okulların bahçesinde bile uranyum ve plutonyum bulundu.

3 Ocak 1961-ABD'de Idaho Falls'daki bir deneysel reaktör kontrolü çıktı. Üç teknisyen öldü.

5 Ekim 1966-ABD'nin Detroit kentindeki Enrico Fermi deneysel hızlı-üretken reaktörünün kalbi, sodyumla çalışan soğutma sisteminin arızalanması nedeniyle eridi.

21 Ocak 1969-İsviçre'de Lucens Vad yöresinde bulunan deneysel bir yeraltı reaktörünün soğutma sisteminin arızalanması üzerine, mahzenlerden binne büyük miktarda radyoaktivite yayıldı. Mahzen mühürlendi.

17 Ekim 1969-Yakıt yükleme sırasında yapılan bir hata, Fransa'nın gaz soğutmalı Saint-Laurent nükleer enerji reaktöründe kısmi erimeye neden oldu. Çevreye az miktarda radyoaktivite sızdığı bildirildi.

22 Mart 1975-Alabama'nın Decatur kentindeki Brown Ferry reaktöründe hava kaçaklarını tespit etmeye çalışan teknisyenin neden olduğu yangın, 100 milyon dolarlık hasara yol açtı. Yangın elektronik denetim sistemlerini devre dışı bırakarak, soğutma sistemindeki su düzeyini tehlikeli ölçüde düşürdü. Radyoaktif sızıntı olmadığı açıklandı.

28 Mart 1979-Pensilvanya'nın Harrisburg kenti yakınlarındaki "Three Mile Island" reaktöründe teknisyenlerin ve makinelerin neden olduğu bir dizi hata nükleer yakıtın önemli erimesine sebep oldu. Nükleer reaktör kalbinin tam erimesine 30-60 dakika kalmıştı. O tarihten bu yana reaktörün radyoaktivite denetimlenmesine çalışılıyor.

7 Ağustos 1979-ABD'nin Tennessee eyaletindeki Erwin kentinde çok gizli bir nükleer yakıt santralinden yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyum çevreye sızdı. Çevrede bulunan 1000 kişi normal olarak 1 yıl içinde alacağı radyo aktivitenin 5 katına maruz kaldı.

25 Nisan 1981-Japon resmi makamları Tsuruga'daki bir nükleer santralin tamiri esnasında 45 işçinin radyoaktiviteye maruz kaldığını açıkladılar.

23 Eylül 1983-Buenos Aires yakınındaki Constituyentes kentinde bulunan Ra-2 araştırma reaktöründe operatör hatası sonucu kaza oldu. Bir teknisyen öldü.

6 Ocak 1986-ABD'nin Oklahoma eyaletindeki Kerr-McGee nükleer santralında nükleer malzeme dolu bir silindir aşırı ısıtılma sonucu patladı. Bir işçi öldü; 100 kişi yaralandı.

137 % 90-50; tellurium 132 % 25-30; lanthanum 140 ve ytrium 91 % 0.1-1

Bu çeşitli elemanların çevreye yayılma hızları hava şartlarına (meteoroloji), engemelere ve parçacıkların çökme hızına bağlıdır. Bu hız bir eleman için ne kadar büyükse, reaktör civarındaki toprak o elemanla o kadar kirlenecek, radyoaktif bulutsa o elemanı o kadar az içerecektir. Parçacıkların yere çökme hızı parçacık büyüklüğü ve rüzgârla ilgilidir.

Kazanın büyüklüğüne göre, reaktör çevresinde 100 m-100 km yarıçapındaki bir alanda, hava tehlikeli (radyoaktif) hale gelebilir ve bu bölgenin boşaltılması gerekir.

Reaktör kazalarından sonra reaktör üzerine helikopterlerle tonlarca kum, bor ve kurşun dökülmesi gerekir, reaktör bunların altına gömülür. Çernobil'de bu uygulanmıştır. Çernobil reaktör kazasında Sovyet makamlarının bildirdiğine göre kazadan ½-1 saat sonra havaya tek bir radyoaktif püskürme olmuştur; havanın radyoaktif kirlenmesi bundan sonra durmuştur. Bu husus Moskova'ya çağrılan Vlyana Enternasyonel Atomik Enerji Ajansı'nı nükleer güvenlik direktörü Moris Roser tarafından da doğrulanmıştır. Ayrıca reaktörü soğu-

tan radyoaktifleşmiş suyun toprağa sızarak çevredeki su ve ırmakları kirlenmesini önlemek için, açılan yeraltı tünellerinden reaktörün altına kalın bir beton platform örülmektedir. Bu duvar örülene kadar reaktör çevresindeki toprak dondurulmuş ve radyoaktif suların etrafa sızması böylece önlenmiştir.

ÇERNOBİL KAZASI NASIL OLDU?

26 Nisan 1986 Cumartesi Moskova saati ile 1.23'de 4 reaktörden oluşan Çernobil reaktör kompleksinin 4 No'lu reaktöründe bir hidrojen patlaması meydana geldi. Hemen bir yangın çıktı ve reaktörün kalbi kısmen tahrip oldu. Reaktör bu sırada toplam gücünün çok altında (% 7'sinde) çalışıyordu, çünkü yakıt değiştirilmekte idi. Patlamadan 4 dakika sonra reaktör itfaiyesi yetişti, az sonra komşu kasaba Pripet ve daha sonra 130 km uzaktaki Kiev itfaiyesi geldi. Saat 2.15'de Çernobil çevresinde 15 km yarıçapında bir alana görevliler dışında giriş yasaklandı. Santraldeki teknisyenler boşaltıldı. 27 Nisan Pazar günü binalardaki yangın söndürülmüştü. Reaktörün kalbi sorun olmaya devam ediyordu. Saat 14'de hal-kin boşaltılmasına başlandı, 27 km uzunlukta bir konvoy oluş-

turan 1100 otobüs, 40.000 kişiyi büyük bir disiplinle tehlikeli bölgeden uzaklaştırdı. Bu insanlar derhal tıbbi kontrolden geçirildi ve radyasyon almış olanlar hastanelere yatırıldı. Ukrayna otoriteleri, santralin etrafındaki 30 km yarıçaplı bir daireyi yasak bölge ilan ettiler. 150 kişi santralde kalarak diğer 3 reaktörü yavaşlattı ve durdurdu. Gece helikopterler reaktör üzerine kum vb atmaya başladılar.

Kazayı anlamak için bu tip reaktörlerin yapısını bilmek gerekir. Bunlara RBMK reaktörü denmektedir. Rusça "kaynar sulu çok güçlü reaktör" anlamına gelmektedir. SSCB'de 1985'de çalışan 46 reaktörden 15'i bu tipti (4'ü Leningrad'da, 3'ü Kursk'da vb), bu tip reaktörler toplam 13.706 megawatt elektrik sağlıyordu, bu miktar Sovyet nükleer enerjisinin % 46'sı ve total enerji üretiminin % 5'i idi.

Bu nükleer santrallerin amacı, SSCB'nin Avrupa'da kalan bölümüne elektrik sağlamaktır. RBMK reaktörlerinin kalbi 12.2 m yarıçapında ve 7m yükseklikte her yanı kapalı çelik bir silindirdir. Silindirin içine grafit bloklar yığılmış ve silindir helyum ve azotla doldurulmuştur. Bu grafit bloklarını dikine 1600 kuvvet borusu delip geçmektedir. Kuvvet boruları üstte zirconium ve niobium alaşımından, altta inox'dan yapılmıştır. Boruların içinde yakıt olarak uranyum çubukları vardır. Reaktör kalbinde soğutma suyu devreder. Reaktör kalbi metal bir blok üzerindedir, bu metal blok da kalın beton bir blok üstüne oturmuştur. Reaktörün üzerinde, ışınları filtre etmek üzere büyük bir su deposu bulunur. Reaktörün tavanı kalın beton bir blokla kaplıdır. Uranyum çubukları uranyum bioksit'ten yapılmıştır. Reaktör kalbinde % 1.8'e zenginleştirilmiş 160 ton kadar uranyum bulunur. (Zenginleştirilmiş uranyum şu demektir: doğadaki uranyum % 99.3 U 238 ve % 0.7 U 235 içerir. Nükleer enerji için U 235 oranı yükseltilmiş uranyum gereklidir. Uranyum değişik yöntemlerle zenginleştirilir: gaz difüzyonu, çok hızlı santrifüjler, lazer vb). Kuvvet borularından saate saate 5800 ton soğutma suyu geçer, bu su, aslında 65-70 bar basınçlı kaynar sudur. Reaktör kalbine nötron tutucu 221 adet cadmium veya bor çubuğu daldırılabilir, bunlar kontrol çubuklarıdır, reaktör kalbine ne kadar sokulurlarsa zincirleme reaksiyonu o kadar yavaşlatırlar. Boruların içindeki 284°C sıcaklıkta ve 70 atmosfer basınçdaki su buharı, reaktörün üst bölümünde toplanıp, her biri 500 megawatt'lık 2 türbine yönelir. Daha sonra bu buhar, buhar temizleme, alçak basınçta ısıtma ve gaz giderme cihazlarından geçerek, reaktörün alt bölümünde yeniden sıcak su halini alır ve güçlü pompalarla yeniden dolaşıma girer.

Reaktörde hidrojen patlaması tahminen şöyle olmuştur: elektrik kesilmesi veya yanlış bir manevra sonucu, soğutucu suyun dolaşımı durmuştur, bunun sonucu uranyum ve su içeren borular aşırı ısınmıştır. Boruların yapısındaki zirconium H₂O'nun O₂'sini bağlayıp hidrojenini serbest bırakmıştır, bu hidrojen patlamıştır. Bu patlama reaktör kalbinin çelik zırhını delmiş ve üstteki su deposundan reaktör kalbine su akmaya başlamıştır, bu durumda sıcak zirconium yeniden H oluşturmuş ve yeni bir patlama olmuştur. Reaktör tavanındaki beton yanı sıra, radyoaktif maddeler havaya karışmaya başlamıştır. Bu sırada grafit 2000°C'ye ısınmıştır. Grafit 1200°C'deki havada alev alır. Reaktör kalbine hava girdiğinden grafit yanmaya başlar ve yangın bütün reaktöre yayılır.

Bu kaza için 2 olasılık daha olabilir:

1. Soğutucu su borularının patlaması ile aynı zamanda kontrol çubuklarını kalbe indiren mekanizmanın arızalanması sonucu reaktörün aşırı ısınması.
2. Nötronların grafitte birikmesi sonucu grafitin kristal yapısının bozulması (Wigner etkisi) ve bunun sonucu kuvvet borularının patlaması. Böyle bir olay 1957'de İngiltere'deki Windscale reaktör kazasında meydana gelmişti.

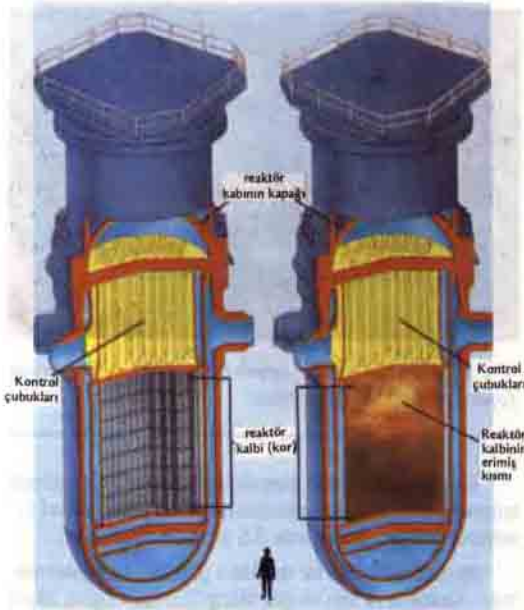
Reaktör borularının erimmiş olması imkânsızdır, çünkü zirconium niobium alaşımı 2800°C'da erir. Reaktör bu sıcaklığa erişseydi, actinid grubu elementlerinin (uranyum vb) buharlaşması gerekirdi, bu durumda ise çevrenin radyoaktif analizlerinde alfa ışınlarına rastlanması beklenirdi, oysa değişik ülkelerdeki ölçmeler alfa ışını veren hiçbir izotop göstermemiştir.

Halen SSCB'de 46 reaktör çalışmaktadır. 1993 yılına kadar 57 reaktör daha hizmete girecek, böylece toplam 103 reaktör elektrik üretecektir. Yeni reaktörlerin bir bölümü RBMK tipi, çoğu ise VVER tipidir; VVER tipi reaktörler RBMK'dan farklı olarak kaynar su yerine basınçlı su, grafit yerine su ve uranyum oksit yerine zenginleştirilmiş uranyum kullanmaktadır.

Batı'daki bazı reaktör tipleri en eleştirilenler arasındadır. Örneğin Fransa'daki 41 sivil reaktörden 35'i basınçlı su tipi reaktördür (PWR=pressurized water reactor), Fransa'da böylece 21 reaktör daha yapılmaktadır. Oysa ABD'de Nükleer Mevzuat Komisyonu 1979'da Kongre'ye verdiği raporda, basınçlı su reaktörlerinin 14 tip kusuru olduğunu belirtmiştir: boru defolani, paslama sorunları, kullanılan materyalin çok dayanıksız oluşu, çatlaklar vb. Fransa'da Gravelines 1, Fessenheim ve Bugey 2 reaktörleri, reaktör kalbinde metal şişler meydana geldiğinden aylarca durdurulmuştur.

ABD'DEKİ BÜYÜK NÜKLEER REAKTÖR KAZASI

Three Mile Adası nükleer reaktör kazası nasıl oldu? ABD'de Pensilvanya'da Susquehanna Irmağı üzerinde Three Mile Adası. Sabaha karşı saat 4. Parlak ışıklı kontrol odasında teknisyenler nöbet tutuyorlar. Birden kontrol panosunda kırmızı bir lamba yanıp sönmeye ve alarm zilleri çalmaya başlıyor. Teknisyenler uzun süre ne olduğunu anlayamıyor ve neden sonra reaktör soğutma borularındaki bir kapağın açık durumda sıkıştığını anlıyorlar. Reaktörün kalbi bir düdüklü tencereyi andırmaktadır, içinde uranyum vb radyoaktif maddeler vardır. Teknisyenler çığınca etrafı araştırırken tonlarca radyoaktif su, reaktörden dışarı fırlatarak düşermede toplanıyor. Artık soğutulamayan reaktör 2400°C'a ısınıyor ve reaktör kalbinin üst 1/3'ü eriyor. Binanın içini radyoaktif krypton 85 ve çok yanıcı hidrojen gazları dolduruyor. Binanın bodrumunda bütün ölçü aletleri su altında. Bir hafta süren bir mücadeleden sonra soğutma borularından buhar ve gaz boşaltılarak reaktör ısı tehlikeli sınıra altına indiriliyor. Bir ay sonra soğutma sistemi yeniden çalışıyor ve temizleme başlıyor. Temizleme ekibi binanın içini dolduran radyoaktif krypton gazını defalarca atmosfere vererek reaktördeki radyoaktiviteyi kontrollu bir şekilde azaltıyor. Ekip koruyucu elbiseler ve gıysilerle çalışıyor. İlk iş radyoaktif suyun radyoaktivitesini gidermektir. Reaktörün teknik planlama direktörü John



Soldaki resim normal reaktör, sağdaki resim kalbi kısmen erimiş reaktör.

DeVine şöyle diyor: "Bir ırmağın ortasındayız. Bina duvarları 120 cm kalınlıkta betondur ve çelik astarlıdır, fakat bina asla radyoaktif artıkları depolayıcı şekilde yapılmamıştır". Reaktör binasının bodrumundaki yüksek radyoaktifiteli su, her an Susquehanna ırmağına sızabiliyordu. Reaktördeki su, organik reçineli filtreler kullanılamayacak kadar fazla radyoaktif idi. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda bu suyu radyoaktiviteden arındırmak için zeolitten yapılmış yeni filtreler geliştirildi. Bu filtreler tehlikeli Sr ve Cs'u tutarak yerine Na veriyordu. Bu işler 1983'e kadar sürdü (4 yıl). Bundan sonra reaktörün içi sonarla tarandı, yapılan 500.000 ölçme bilgisayara verildi. Reaktördeki birdelikten içeri bir video kamera sarkıtıldı. Reaktörün üst 1/3'ü erimişti, içindeki kalem kalınlığındaki ve 3.5 m uzunluğundaki 30.000 uranyum çubuğu kırılmış veya unufak olmuştu. Reaktör kabı, kapağı ve plenum denen kontrol çubuklarını kontrol cihazı zarar görmemişti. Böylece o çok korkulan "Çin Sendromu" nun olmadığı anlaşıldı. Çin Sendromu bir reaktör kalbinin 6000°C'ye ısınması ve reaktör kabının dibini ve binanın döşemesini eriterek toprağa gömülmesidir (bir bilim-kurgu romanında böyle bir reaktör toprağa gömülüp battıkça batar ve dünyanın karşıt noktasında Çin'den dışarı çıkar). Çin sendromunda havaya öldürücü radyoaktivite karışması kaçınılmazdır.

Mayıs 1984'de reaktör kalbi kapağını yerinde tutan herbiri 300 kg lık 60 adet dev civatanın dev hidrolik İngiliz anahtarları ile sökülmesine başlandı. 160 tonluk çelik kapak, vinçlerle kaldırıldı; radyoaktif su damlatmaması için altına geniş plastik bir örtü kondu. 1985'de 55 tonluk plenum yine vinçlerle kaldırılıp güvenlik için su dolu bir kanala indirildi. Reaktör kalbinin içi ancak kepçeleri, kısıkaçları vb olan robot makinelerle temizlenebilecektir. Temizliğin 1988'de bitmesi beklenmektedir. Temizlik için yaklaşık 1.5 milyar dolar harcancaktır.

Three Mile Adası kazasında 57.000 curie'lik kripton 85 atmosfere verildi. Atmosfere verilebilecek yıllık maksimum doz ise 4000 curie'dir. Demek ki tavan çok aşılmıştır. Kazadan sonra civardaki sığırlarda sezaryen ameliyatlara ve ölü doğumlar çok artmıştır. İnsanlarda ise kan eozinofilleri artmıştır. Bu bakımdan bu reaktör kazasında sızıntı olmadığı doğru değildir, 1984'den itibaren bu bölgede lösemilerin, 1994'den itibaren de kanserlerin artması beklenir. Kazadan sonra çevredekilerde ruhsal sıkıntılar başgöstermiş, % 13'ün de alkol, % 31.9'unda tütün ve % 22.5'unda uyku ve sinir hapları tüketimi artmıştır. ABD Nükleer Regülasyon Komisyonuna göre Three Mile Adasındaki tipte bir reaktörde kaza olasılığı 1/100 dür, bu çok yüksek bir olasılıktır. 12 yıl kadar önce OPEC'in petrol fiyatlarını arttırması ile dünya bir enerji krizine girince, ABD Başkanı Nixon, Project Independence'i (Bağımsızlık Projesi) başlattı, amaç 2000 yılından önce ABD'nin elektriğinin yarısını nükleer santrallerden elde etmesi idi. Amerika 1979'da Three Mile Adası nükleer santral kazasını yaşadıkdan bu yana ABD'de yeni nükleer reaktörler yapılmadı, 1974'den beri yapılmış bütün siparişler iptal edildi, yarıda kalan inşaatlarda 15 milyar dolar kaybedildi. Nükleer santraller ABD'de elektrik üretimi fiyatlarını arttırmıştı. Planlanan reaktörlerin iptalinde en büyük etken, kazadan sonra Başkan Jimmy Carter'in emri ile kurulan 12 kişilik kazayı inceleme komisyonunun, ABD reaktör sisteminin zayıf noktaları olduğunu ortaya koyması oldu. Three Mile Adası kazasında şu önemli hatalar bulundu:

1. Soğutma borularının kapaklarından biri açık kaldığı halde, göstergeler kapağın kapalı olduğunu göstermekteydi.
2. Kontrol odasına bağlı olmayan bir diğer hayati kapak elle kapatılabiliyordu, fakat bu yapılmamıştı.
3. Kontrol odası bilgisayarı 2.5 saat rötarlı idi ve 73 dakika süre ile yanlış sonuçlar vermişti.
4. Soğutma devresi pompaları, alışık olmadıkları şekilde buhar ve kaynar su karışımı pompaladıkları için tehlikeli bir şekilde titremeye başlamışlardı.
5. Soğutucu su aşağı inip reaktörü soğutmak yerine, buhar jeneratörlerinden reaktör kabine doğru gidiyordu.
6. Babcock ve Wilcox firmasınınca yapılan bu PWR tipi reaktörlerde, borularda oluşabilecek gazları dışarı sifonlayacak delikler yoktu, bu nedenle borularda oluşan hidrojen temizlenemedi.
7. Reaktörün sızıntı yapmaması gereken bazı noktaları sızıntı yapmıştı.
8. Radyoaktif sıvıları reaktör binası içinde tutmakta görevli boru ve sarnıçlardan sızıntı olmuştu.
9. Havayı radyoaktif iyodan temizlemekle görevli filtreler çalışmamıştı. □

Yazımızın gelecek sayımızda yer alacak ikinci bölümünde "Nükleer silahlar ve Radyasyon" konusunda bilgiler aktaracağız.