

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za primijenjenu matematiku

SEMINARSKI RAD IZ KOLEGIJA
ERGONOMIJA RAČUNALNE I PROGRAMSKE OPREME

RIZICI POJAVE KARCINOMA USLIJED
IZLOŽENOSTI IONIZIRAJUĆEM
ZRAČENJU

Hrvoje Librenjak

2003./2004.

SADRŽAJ

1. UVOD	2
1.1. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE.....	2
1.2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE.....	3
2. VRSTE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	5
2.1. ALFA ČESTICE.....	5
2.2. BETA ČESTICE	6
2.3. GAMA ZRAKE	7
2.4. X-ZRAKE	8
3. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	9
4. PRIRODNI IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA.....	10
4.1. KOZMIČKO ZRAČENJE	10
4.2. PRIRODNO ZRAČENJE RADIOAKTIVNIH MATERIJALA.....	11
4.3. RADON	12
5. UMJETNI IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA.....	14
5.1. IONIZACIJSKI DETEKTORI DIMA. RADIOAKTIVNI GROMOBRANI	14
5.2. NUKLEARNA ORUŽJA	16
5.3. MEDICINSKE PRIMJENE	18
6. UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ZDRAVLJE.....	19
6.1. VRSTE IZLOŽENOSTI. RADIOAKTIVNA KONTAMINACIJA.....	19
6.2. PODJELA UČINAKA NA ZDRAVLJE	20
6.3. RIZICI POJAVE KARCINOMA USLJED IZLOŽENOSTI IONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU	21
6.4. ZDRAVSTVENI UČINCI IZLOŽENOSTI RADONU	22
6.5. ZAŠTITA	22
7. LITERATURA.....	24

1. UVOD

Ionizirajuće zračenje je oblik energije, poput svjetlosti ili topline. Uključuje čestice i zrake koje emitiraju radioaktivni materijali, zvijezde, visokonaponska oprema i nuklearni reaktori. Većina ionizirajućeg zračenja je prirodna pojava, a dio je proizvod ljudskih aktivnosti. Vrste ionizirajućeg zračenja koje su važne za zdravlje su:

- alfa čestice
- beta čestice
- gama zrake
- X-zrake

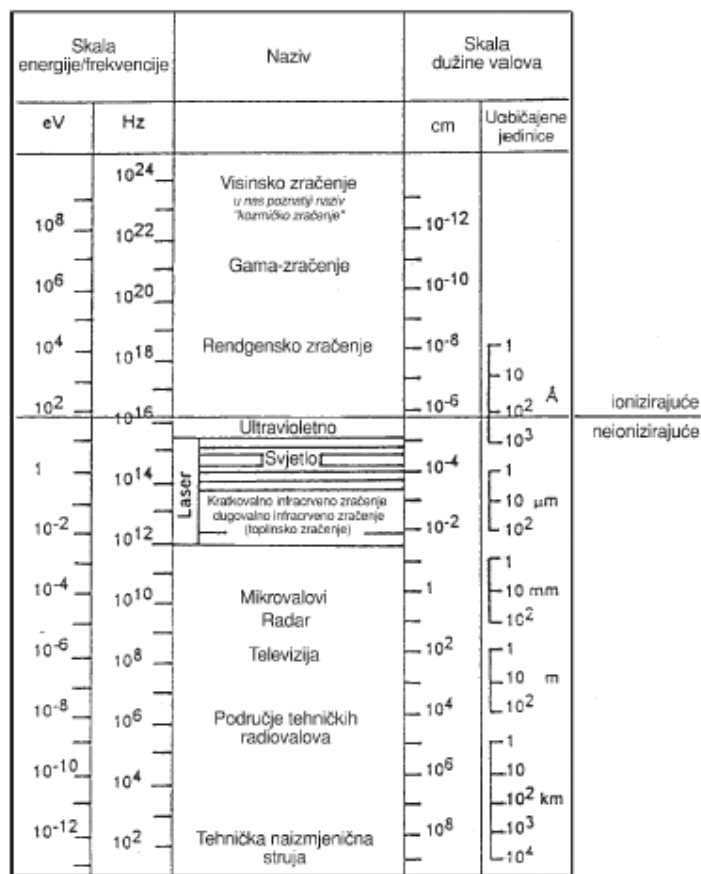
Alfa i beta čestice su subatomske čestice velike brzine koje radioaktivni materijali emitiraju pri raspadu. Gama zrake i X-zrake su vrste elektromagnetskog zračenja. Ove čestice i zrake imaju dovoljno energije da pri sudaru izbace elektron iz ljuske atoma. Taj se proces naziva ionizacija, a zračenje koja ga uzrokuje ionizirajuće zračenje.

Ljudi su izloženi ionizirajućem zračenju od Sunca, stijena, tla, prirodnih izvora u ljudskom tijelu, padalina koje su rezultat nuklearnih testova, nekih potrošačkih proizvoda i radioaktivnih materijala koje ispuštaju bolnice te nuklearne i termoelektrane. Većim dozama zračenja izloženi su piloti, astronauti, radnici u nuklearnim elektranama te medicinsko osoblje.

1.1. Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetsko zračenje je fizikalna pojava širenja električnih i magnetskih valova, odnosno ultrasitnih čestica zvanih fotoni. Fotoni su čestice bez mase koje se gibaju brzinom svjetlosti (300000 km/s) i sadrže određenu količinu energije. Elektromagnetski valovi svrstani su u elektromagnetski spektar koji se proteže od valova najmanje frekvencije i najveće valne dužine (tehnička izmjenična struja) do valova najveće frekvencije i najmanje valne dužine (visinske kozmičke zrake). Energija valova, odnosno fotona, veća je što je veća frekvencija titraja valova i što je kraća valna dužina. Elektromagnetski spektar dijeli se na dva dijela: neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. Valovi, zrake velike energije, mogu iz ljuske atoma izbaciti elektrone i time ionizirati atom, zato se zovu ionizirajuće zrake. Ionizirajuće zrake: rendgenske (X-zrake), gama zrake, kozmičke zrake, mogu štetno djelovati na ljudske stanice. Zrake manje energije: radiovalovi, mikrovalovi, vidljiva svjetlost, infracrvene i ultraljubičaste zrake nemaju te jačine da ioniziraju i zato se zovu neionizirajuće zrake. Njihovo djelovanje na organska tkiva, zbog slabe energije, može biti štetno pri dugom izlaganju, ali mnogo manje štetno od ionizirajućih zračenja.

ELEKTROMAGNETSKI VALOVI



1.2. Ionizirajuće zračenje

Atomi i molekule normalno se nalaze u neutralnom stanju, tj broj pozitivnih protona u jezgri jednak je broju negativnih elektrona u ljusci. Ako atom, uslijed sudara s drugom česticom (npr. fotonom, drugim elektronom, jezgrom helija), izgubi elektron, rezultirajući atom naziva se ion i njegova svojstva se uvelike razlikuju od originalnog atoma. Čestice koje imaju dovoljno energije da izbace elektron iz ljuske nazivaju se ionizirajuće zračenje.

Ionizirajuće zračenje može biti produkt radioaktivnog raspada, nuklearne fisije, nuklearne fuzije, ekstremno toplih objekata i ubrzanih naboja. Kako bi zračenje bilo ionizirajuće, čestice moraju imati dovoljno energije i mogućnost reagiranja s elektronima. Fotoni snažno reagiraju s nabijenim česticama pa su fotoni s dovoljnom količinom energije ionizirajući. Nivo energije na kojem fotoni postaju ionizirajući nalazi se u ultraljubičastom dijelu elektromagnetskog spektra. Nabijene čestice kao što su elektroni, pozitroni i alfa čestice također snažno reagiraju s elektronima.

Neutroni, s druge strane, slabo reagiraju s elektronima pa ne mogu direktno ionizirati atome. Neutroni mogu reagirati s atomskom jezgrom (ovisno o jezgri i brzini neutrona) i tako proizvesti nestabilne radioaktivne jezgre koje pri raspadu emitiraju ionizirajuće zračenje.

Kako bi se jezgra radioaktivnog atoma stabilizirala, ona emitira subatomske čestice i visoko-energetske fotone. Taj proces se naziva radioaktivni raspad.

Negativno nabijeni elektroni i pozitivno nabijene jezgre stvorene ionizirajućim zračenjem mogu uzrokovati oštećenje živog tkiva. Ako je doza zračenja dovoljno velika, učinak se može vidjeti gotovo odmah, u obliku radijacijskog trovanja. Niže doze mogu uzrokovati karcinom i druge dugoročne probleme. Učinak vrlo malih doza ionizirajućeg zračenja još uvijek je predmet raprava.

Radioaktivni materijali obično emitiraju alfa čestice (čestice slične jezgri helija), beta čestice (elektroni ili pozitroni koji se gibaju velikom brzinom) ili gama zrake. Alfa i beta čestice mogu biti zaustavljene listom papira ili tankom čeličnom pločom. Najviše oštećenja uzrokuju ako se emitiraju unutar ljudskog tijela. Gama zrake su slabije ionizirajuće od alfa i beta čestica, ali zahtijevaju deblju zaštitu (olovne ploče). Gama zrake uzrokuju oštećenja slična X-zrakama: opekline, karcinom i genetske mutacije.

Izvori ionizirajućeg zračenja mogu se podijeliti na prirodne (pozadinske) i umjetne. Prirodno ionizirajuće zračenje dolazi iz tri glavna izvora: kozmičko zračenje, prirodno zračenje radioaktivnih materijala i radon. Radon često najviše pridonosi pozadinskom zračenju. Umjetni izvori su po svojoj prirodi i učinku identični prirodnim izvorima. Umjetni izvori su: medicinske procedure (dijagnostičke X-zrake, nuklearna medicina, terapija zračenjem), građevinski materijali, detektori dima, ciklus nuklearnog goriva (obuhvaća cijeli slijed od rudnika urana, cijepanja atoma u nuklearnim reaktorima do odlaganja otpada).

2. VRSTE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

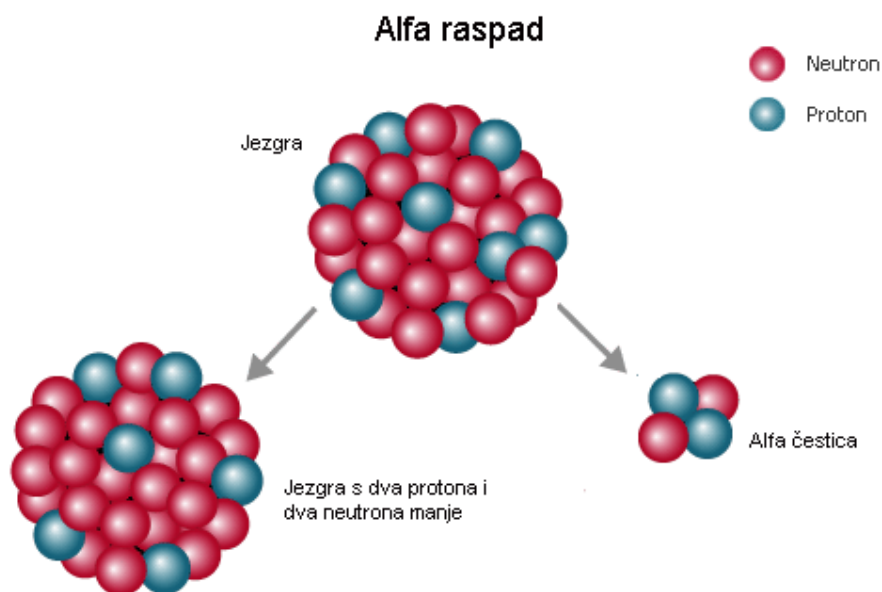
Glavne vrste ionizirajućeg zračenja nastaju kao rezultat spontanog raspada radioaktivnih atoma. Jezgre takvih atoma mogu mijenjati strukturu i time emitirati energiju u tri glavna oblika: alfa čestice, beta čestice i gama zrake. Još jedna važna vrsta ionizirajućeg zračenja, X-zrake, rezultat je procesa izvan jezgre, tj. emitiraju ih elektroni iz ljuske atoma.

Alfa i beta čestice su atomi ili subatomske čestice koje imaju energiju i naboj te mogu direktno reagirati s elektronima kroz coulombove sile pa se nazivaju direktno ionizirajućim zračenjem. Gama zrake i X-zrake su elektromagnetske zrake, električki neutralne pa ne mogu reagirati s elektronima i stoga se nazivaju indirektno ionizirajućim zračenjem.

2.1. Alfa čestice

Alfa čestica identična je jezgri helija, a sastoji se od dva protona i dva neutrona. To je relativno teška i visoko-energetska subatomska čestica sa pozitivnim nabojem +2 zbog svoja dva protona. Brzina alfa čestice u zraku je otprilike jedna dvadesetina brzine svjetlosti.

Kad je omjer neutrona i protona u jezgri određenih atoma prenizak, oni emitiraju alfa česticu kako bi uspostavili ravnotežu. Naprimjer: polonij-210 ima 126 neutrona i 84 protona što je omjer od 1.50 naprema 1. Nakon radioaktivnog raspada emitiranjem alfa čestice, omjer postaje 124 neutrona naprema 82 protona ili 1.51 naprema 1. Budući da broj protona u jezgri određuje element, polonij-210 nakon emisije alfa čestice postaje olovo-206 koji je stabilan element.



Atomi koji emitiraju alfa čestice uglavnom su vrlo veliki atomi, tj. imaju visoke atomske brojeve. Mnogo je prirodnih i umjetnih radioaktivnih elemenata koji emitiraju alfa čestice. Prirodni izvori alfa čestica imaju atomski broj najmanje 82, uz neke iznimke. Najvažniji alfa emiteri su: americij-241 (atomski broj 95), plutonij-236 (94), uran-238 (92), torij-232 (90), radij-226 (88), radon-222 (86). Alfa emiteri su prisutni u različitim količinama

u gotovo svim stijenama, tlu i vodi. Nakon emisije, alfa čestice se zbog velike mase i električnog naboja gibaju relativno sporo (otprilike 1/20 brzine svjetlosti) i u zraku potroše svu energiju nakon nekoliko centimetara i tada vežu slobodne elektrone i postaju helij.

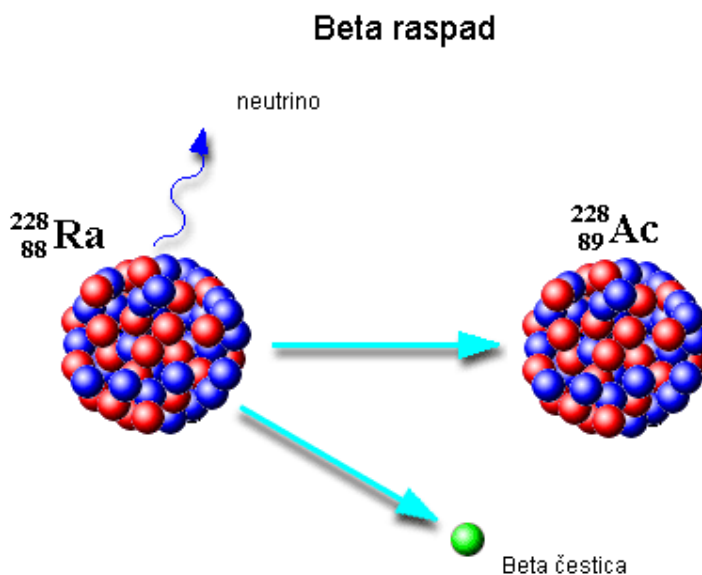
Pozitivan naboj alfa čestica može biti koristan u nekim industrijskim procesima. Naprimjer, radij-226 se koristi za liječenje karcinoma. Polonij-210 služi za neutraliziranje statičkog elektriciteta u mnogim industrijama. Alfa čestice zbog svog pozitivnog naboja privlače slobodne elektrone i tako smanjuju statički naboj.

Neki detektori dima koriste emisiju alfa čestica americija-241 za stvaranje električne struje. Alfa čestice sudaraju se s molekulama zraka unutar komore i oslobađaju elektrone. Rezultat su pozitivno nabijeni ioni i negativno nabijeni elektroni koji stvaraju električnu struju između pozitivno i negativno nabijenih pločica unutar komore. Kad čestice dima uđu u uređaj, nabijene čestice ih privlače prekidajući struju i tako se aktivira alarm.

2.2. Beta čestice

Beta čestice su ekvivalentne elektronima. Razlika je u tome što beta čestice potječu iz jezgre, a elektroni se nalaze u omotaču. Beta čestice imaju električni naboj -1. Masa beta čestice iznosi otprilike 1/2000 mase protona ili neutrona. Brzina pojedinačne beta čestice ovisi o tome koliko energije ima i varira u širokom opsegu.

Iako beta čestice emitiraju radioaktivni atomi, one same po sebi nisu radioaktivne. Njihova energija u obliku brzine nanosi štetu živim stanicama tako što razbija kemijske veze i stvara ione.



Emisija beta čestice događa se kada je omjer neutrona i protona u jezgri prevelik. Znanstvenici smatraju da se neutron transformira u proton i elektron, s tim da proton ostaje u jezgri, a elektron se izbacuje. Proces smanjuje broj neutrona za jedan i povećava broj protona

za jedan i tako nastaje novi element. Beta čestica često je praćena i emisijom gama zrake. Nakon izbacivanja beta čestice jezgra još uvijek ima višak energije koju otpušta u obliku gama fotona.

Radioaktivni raspad tehnećija-99, koji ima previše neutrona da bi bio stabilan, je primjer beta raspada. Ostali značajniji beta emiteri su: fosfor-32, tricij, ugljik-14, stroncij-90, kobalt-60, jod-129 i 131, cezij-137.

Beta emiteri imaju mnoge upotrebe, osobito u medicinskoj dijagnostici i liječenju (fosfor-32 i jod-131), ali i u raznim industrijskim instrumentima koji služe za mjerenje debljine vrlo tankih materijala.

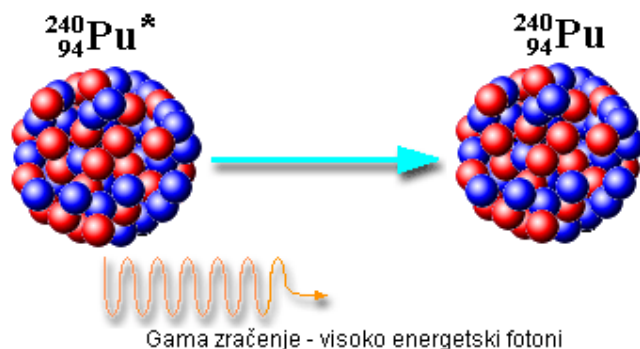
Beta čestice u zraku putuju nekoliko desetaka centimetara i lako se zaustavljaju čvrstim materijalima. Kada beta čestica ostane bez energije, ponaša se kao bilo koji drugi slobodni elektron.

2.3. Gama zrake

Gama zraka je paket elektromagnetske energije, tj. foton. Gama fotoni su fotoni s najviše energije u elektromagnetskom spektru. Emitiraju ih jezgre nekih radioaktivnih atoma.

Gama fotoni nemaju masu ni električni naboj, ali imaju vrlo visoku energiju, otprilike 10000 puta veću od energije fotona u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra. Zbog visoke energije gama čestice putuju brzinom svjetlosti i u zraku mogu prijeći stotine tisuća metara prije nego što potroše energiju. Mogu proći kroz mnogo vrsta materijala uključujući i ljudsko tkivo. Vrlo gusti materijali, poput olova, obično se koriste za zaštitu od gama zračenja.

Gama raspad



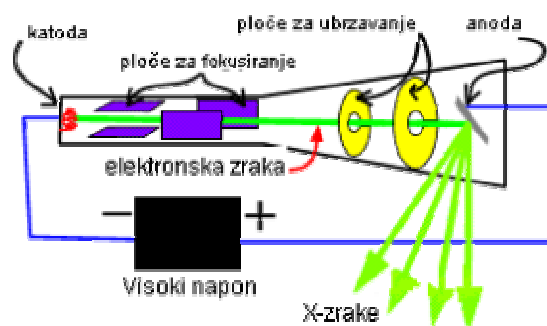
Do emisije gama zrake dolazi kada jezgra radioaktivnog atoma ima previše energije, a obično slijedi emisiju beta čestice. Cezij-137 pruža dobar primjer radioaktivnog raspada emisijom gama zrake. Neutron iz jezgre se transformira u proton i beta česticu. Dodatni proton mijenja atom u barij-137. Jezgra izbacuje beta česticu, ali još uvijek ima previše energije pa emitira gama foton da bi se stabilizirala.

Radioaktivni elementi koji emitiraju gama zrake najrašireniji su izvori zračenja. Moć prodiranja gama zraka ima mnogo upotreba. Iako gama zrake mogu prodrijeti kroz mnoge materijale, one ne čine te materijale radioaktivnim. Najkorišteniji emiteri gama zraka su kobalt-60 (steriliziranje medicinske opreme, pasteriziranje hrane, liječenje karcinoma), cesij-137 (liječenje karcinoma, mjerenje i kontrola toka tekućina u industrijskim procesima, istraživanje podzemnih izvora nafte) i tehnećij-99m (dijagnostičke studije u medicini). Gama zrake koriste se i za poboljšanje fizikalnih svojstava drva i plastike te za ispitivanje metalnih dijelova u industriji.

Gama zrake postoje samo dok imaju energije. Kada potroše energiju, bilo u zraku ili u čvrstom materijalu, one prestaju postojati.

2.4. X-zrake

X-zrake su elektromagnetsko zračenje slično svjetlosti, ali s višom energijom. Strojevi za generiranje X-zraka imaju vakuumiranu staklenu cijev na čijim krajevima su postavljene elektrode, negativna katoda i pozitivna anoda. Na elektrode je doveden visoki napon koji može biti u rasponu od nekoliko tisuća volti do nekoliko stotina tisuća volti. Razlika potencijala tada elektrone nakupljene na katodi ubrzava prema anodi te oni udaraju u metalnu ploču s velikom energijom. Pri sudaru s metalnom pločom elektrone će privući pozitivno nabijena jezgra atoma metala, pri čemu se smanjuje energija elektrona, tj. dolazi do emisije X-zraka, koje imaju veliku moć prodiranja.



X-zrake koje nastaju kao rezultat sudara elektrona s metalnom pločom imaju širok raspon energije, međutim maksimalna energija koju mogu imati određena je razlikom potencijala između elektroda koje ubrzavaju elektrone. Naprimjer, ako je razlika potencijala između elektroda 50 keV, rezultirajuće X-zrake imat će energiju do, ali ne i preko 50 keV.

Veliki dio energije elektronskog snopa na anodi se pretvara u toplinu pa se stoga cijevi za generiranje visokoenergetskih X-zraka često hlade vodom. Moć prodiranja X-zrake čini idealnim za korištenje u medicinskoj dijagnostici, ali i u razne industrijske svrhe. Međutim, visoka energija X-zraka može uzrokovati ionizaciju i čini X-zrake biološki opasnim ako apsorbirana doza nije ispod preporučenog minimuma.

3. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Postoje četiri u osnovi različita pristupa mjerenju ionizirajućeg zračenja i najmanje osam različitih mjernih jedinica u kojima se ta mjerenja mogu izraziti. Aktivnost izvora zračenja može se izraziti u broju raspada po sekundi, kiriiima ili bekerelima. Zračenje kojem je neki objekt izložen izražava se u rendgenima. Mjerne jedinice koje se koriste za izražavanje zračenja koje je neki objekt apsorbirao su gray i rad. Mjerne jedinice kojima se izražava doza zračenja su rem i sievert.

SI jedinica za radioaktivnost je bekerel (Bq) koji označava jedan raspad u sekundi. Kiri (Ci), originalno definiran kao aktivnost jednog grama radija-226, sada se definira kao 3.7×10^{10} raspada po sekundi, što znači da je $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. Rendgen (R) označava količinu X-zračenja ili gama zračenja potrebnu da nastane 1 jedinični naboj po cm^3 suhog zraka u standardnim uvjetima. Rendgen je ograničen samo na X-zračenje i gama zračenje s energijom manjom od 3 MeV.

Apsorbirana doza zračenja ili rad (Radiation Absorbed Dose) je količina apsorbiranog zračenja koja predaje 0.01 J energije po kilogramu izloženog materijala. Međutim, jednake doze različitih oblika zračenja imaju različite biološke učinke. Stoga je definiran rem kao količina apsorbiranog zračenja koja proizvodi isti biološki učinak kao jedan rad terapijskih X-zraka, ili kao produkt apsorbirane doze u rad i doznog ekvivalenta zračenja RBE (Relative Biological Effectiveness). Budući da je teško precizno izmjeriti dozni ekvivalent pojedinih vrsta zračenja, biofizičari preferiraju definirati rem kao produkt rad i faktora kvalitete (QF) koji se odnosi na linearni prijenos energije (LPE) pojedinih vrsta zračenja. LPE je količina energije koja se rasipa (izražena u keV) po duljini puta (u μm). Zračenju s visokim LPE dodjeljuje se visoki QF budući da RBE raste s porastom LPE, osim kod vrlo velikih vrijednosti za LPE. Tipične vrijednosti faktora kvalitete prikazane su u slijedećoj tablici:

Tip zračenja	Faktor kvalitete
X-zrake ili gama zrake	1
beta čestice > 0.03 MeV	1
beta čestice < 0.03 MeV	1.7
alfa čestice	20

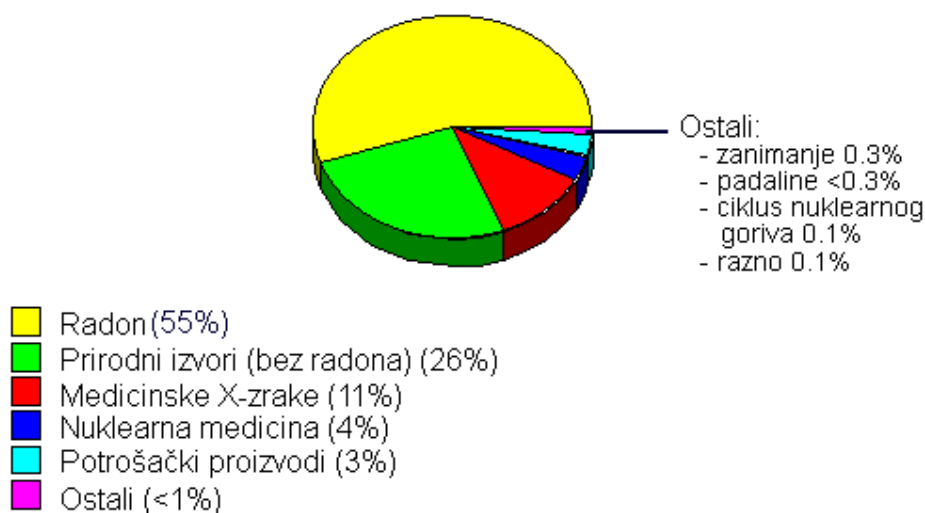
Gray (Gy) i sievert (Sv) su SI zamjene za rad i rem, respektivno. Gray se definira kao 1 J apsorbiranog zračenja po kilogramu materijala, što znači da je $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$. Sievert je mjerna jedinica za dozni ekvivalent i vrijedi $\text{Sv} = \text{J} / \text{kg}$.

Zbrka koja je rezultat velikog broja mjernih jedinica pojačana je nedostatkom jednostavnih konverzija između pojedinih mjernih jedinica. Nije lako promijeniti količinu zračenja kojoj je objekt izložen u količinu apsorbiranog zračenja, budući da apsorbirana energija ovisi o atomskom broju izloženog materijala i energiji zračenja. Naprimjer, kada se uzorci težine 1 g izlože jednom R X-zraka energije 0.1 MeV, zrak apsorbira 0.87 rem, mekano tkivo 0.95 rem, kost 1.75 rem. Ni mjere radioaktivnosti nije jednostavno pretvoriti u količinu apsorbiranog zračenja. Aktivnosti ugljika-14 i kalija-40 u ljudskom tijelu otprilike su jednake i iznose 0.1 pCi, ali dozni ekvivalent izražen u mrem/god za kalij-40 je gotovo 20 puta veći.

4. PRIRODNI IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Izvori ionizirajućeg zračenja mogu se podijeliti na prirodne i umjetne. Prirodno pozadinsko ionizirajuće zračenje dolazi iz tri glavna izvora: kozmičko zračenje, prirodno zračenje radioaktivnih materijala i radon. Kozmičko zračenje dolazi iz svemira i uključuje energetske protone, elektrone, gama zrake i X-zrake. Primarni radioaktivni elementi u prirodi su uran, torij, kalij i njihovi radioaktivni derivati. Ovi elementi emitiraju alfa i beta čestice ili gama zrake. Međutim, većina prirodnog zračenja potječe od plina radona, koji je produkt raspada urana i torija. Radon se emitira iz tla i koncentrira se u zgradama. Radioaktivni elementi često se nazivaju radioaktivni izotopi ili radioaktivni nuklidi ili samo nuklidi.

Izvori ionizirajućeg zračenja



4.1. Kozmičko zračenje

Kozmičko zračenje čini otprilike 13% od ukupnog prirodnog pozadinskog zračenja. Dijeli se na dva tipa, primarno i sekundarno. Primarno kozmičko zračenje sastoji se od čestica vrlo visoke energije (do 10^{18} eV), a to su uglavnom protoni, alfa čestice, teži ioni i elektroni. Veliki postotak primarnog kozmičkog zračenja dolazi izvan našeg Sunčevog sustava, dok jedan dio dolazi od našeg Sunca.

Vrlo malo primarnog kozmičkog zračenja prodre do Zemljine površine. Velika većina reagira s Zemljinom atmosferom proizvodeći sekundarno kozmičko zračenje koje se sastoji od fotona, elektrona, neutrona i gama zraka i koje dolazi do površine. Atmosfera i Zemljino magnetsko polje također se ponašaju kao štit protiv kozmičkog zračenja smanjujući količinu koja dolazi do površine. Na kozmičko zračenje utječe i Sunčeva aktivnost čije pojačanje uzrokuje pojačanje Zemljinog magnetskog polja, a time i slabljenje učinka kozmičkog zračenja. Može se zaključiti da godišnja doza apsorbiranog kozmičkog zračenja ovisi o nadmorskoj visini. U Sjedinjenim Američkim Državama osoba će u prosjeku primiti dozu od 27 mrem godišnje, a taj iznos se otprilike udvostručuje sa svakih 2000 metara nadmorske visine. Putujući od pola do ekvatora na razini mora dolazi do smanjenja količine kozmičkog zračenja od samo 10%, dok je na nadmorskoj visini od 18000 metara smanjenje 75% što je

rezultat djelovanja Zemljinog i Sunčevog magnetskog polja na primarno kozmičko zračenje. Putovanje avionom može povećati godišnju dozu kozmičkog zračenja, ovisno o učestalosti letenja, visini leta i vremenu provedenom u zraku. Najčešći nuklidi koji su rezultat kozmičkog zračenja prikazani su u slijedećoj tablici:

Nuklid	Vrijeme poluraspada	Aktivnost
ugljik-14	5730 god.	0.22 Bq/g
tricij	12.3 god.	1.2×10^{-3} Bq/kg
berilij-7	53.28 dana	0.01 Bq/kg

4.2. Prirodno zračenje radioaktivnih materijala

Radioaktivni materijali prisutni su svuda u prirodi, u tlu, stijenama, vodi, zraku i vegetaciji. Najvažniji nuklidi što se tiče prirodnog zračenja su kalij, uran i torij. Dotični nuklidi prisutni su još iz vremena stvaranja Zemlje i imaju vrlo velika vremena poluraspada, često i reda 100 milijuna godina. Aktivnost ovih nuklida s vremenom se smanjivala pa je na primjer današnja doza kalija-40 otprilike upola manja nego u vrijeme stvaranja Zemlje.

Nuklid	Vrijeme poluraspada	Aktivnost
uran-235	7.04×10^8 god.	0.72 % prirodnog urana
uran-238	4.47×10^9 god.	99.2745% prirodnog urana
torij-232	1.41×10^{10} god.	1.6 do 20 ppm* u običnim stijenama
radij-226	1.6×10^3 god.	16 Bq/kg u vapnencu; 48 Bq/kg u vulkanskim stijenama
radon-222	3.82 dana	plemeniti plin; 0.6 Bq/m^3 do 28 Bq/m^3
kalij-40	1.28×10^9 god.	tlo - 0.037 do 1.1 Bq/kg

* ppm - parts per million

U slijedećoj tablici prikazana je količina prirodne radioaktivnosti u tlu po kvadratnoj milji na dubini od jedne stope. Treba napomenuti da aktivnost uvelike ovisi o tipu tla, sastavu minerala i gustoći.

Nuklid	Masa	Aktivnost
uran	2200 kg	31 GBq
torij	12000 kg	52 GBq
kalij-40	2000 kg	500 GBq
radij	1.7 g	63 GBq
radon	11 μg	7.4 GBq

U slijedećoj tablici prikazana je količina prirodne radioaktivnosti u oceanima.

Nuklid	Aktivnost		
	Pacifik	Atlantik	Svi oceani
uran	22 EBq	11 EBq	41 EBq
kalij-40	7400 EBq	3300 EBq	14000 EBq
tricij	370 PBq	190 PBq	740 PBq
ugljik-14	3 EBq	1.5 EBq	6.7 EBq
rubidij-87	700 EBq	330 EBq	1300 EBq

Prirodne radionuklide možemo pronaći i u ljudskom tijelu.

Nuklid	Masa	Aktivnost	Dnevni unos nuklida
uran	90 µg	1.1 Bq	1.9 µg
torij	30 µg	0.11 Bq	3 µg
kalij-40	17 mg	4.4 kBq	0.39 mg
radij	31 pg	1.1 Bq	2.3 pg
ugljik-14	22 ng	3.7 kBq	1.8 ng
tricij	0.06 pg	23 Bq	0.003 pg
polonij	0.2 pg	37 Bq	0.6 µg

Prirodna radioaktivnost može se naći i u nekim građevinskim materijalima. U slijedećoj tablici su navedeni neki uobičajeni građevinski materijali i procjene koncentracije urana, torija i kalija u njima.

Materijal	uran	torij	kalij
	mBq/g	mBq/g	mBq/g
Granit	63	8	1184
Pijesak	6	7	414
Cement	46	21	237
Beton od vapnenca	31	8.5	89
Beton od pijeska	11	8.5	385
Žbuka	14	12	89
Umjetni gips	186	66	5.9
Prirodni gips	15	7.4	148
Drvo	-	-	3330
Glinena opeka	111	44	666

4.3. Radon

Radon je prirodni radioaktivni plin koji je prisutan svugdje na Zemlji i pridonosi otprilike polovini naše izloženosti prirodnom pozadinskom zračenju. Vjeruje se da izloženost povišenim količinama radona svake godine uzrokuje na tisuće smrti od karcinoma pluća. Radon, Rn-222 (vrijeme poluraspada 3.82 dana) je produkt raspada radija, Ra-226, koji potječe od urana U-238. Toron, Rn-220, (vrijeme poluraspada 56 s) je produkt raspada torija, Th-232, i prisutniji je u Zemljinoj kori od radona. Međutim, zbog vrlo kratkog vremena poluraspada, toron nestaje prije nego što napusti tlo i nema značajnijeg biološkog učinka.

Velika količina doze zračenja ne dolazi od samog radona, nego od njegovih produkata koji emitiraju alfa čestice, polonija Po-218 (vrijeme poluraspada 3 min) i Po-214 (vrijeme poluraspada 0.164 ms) te beta emitera bizmuta Bi-214 (vrijeme poluraspada 19.7 min). Produkti koji nastaju raspadom radona tvore fine aerosole koji se udisanjem ugrađuju u pluća. Kako su to ujedno alfa i beta emiteri visoke energije, opasnost je velika.

Prosječna doza prirodnog pozadinskog zračenja uvelike ovisi o geološkim faktorima, rudnicima, količini radija i radona u zalihama vode. Općenito, visoke količine radona povezuju se s granitnim vulkanskim stijenama, kvarcnim stijenama, fosfatnim zalihama i nekim pješčanim plažama koje sadrže visoke količine urana i torija, čijim raspadom nastaje radon. Tipična koncentracija radija-226 u fosfatnim rudama je otprilike 40 pCi/g pa ruda koja je blizu površine uzrokuje vrlo visoke koncentracije radona.

Glavni izvor radona-222 u atmosferi (najmanje 80%) su emisije iz stjenovitih formacija blizu Zemljine površine koje su proizvod raspada urana-238 preko radija-226 do radona-222.

Radon može prodrijeti u kuće iz raznih izvora i na razne načine. Koncentraciji radona u kućama najviše pridonosi tlo iz kojeg radon može izaći kroz veće ili manje otvore u temeljima kuća. Budući da radon konstantno izlazi iz tla, uvijek je prisutan u zraku, ali u određenim okolnostima koncentracija radona u zgradi može biti značajno veća od normalne koncentracije u zraku. Većina zgrada ima ograničen prostor s ograničenim kretanjem zraka i sporom izmjenom s vanjskim zrakom. Kad radon jednom uđe u zgradu dolazi do njegovog raspada i povećanja koncentracije produkata tog raspada. Razlika u tlaku glavni je način prelaska radona iz tla u zgrade budući da je tlak unutar zgrada obično niži nego u tlu.

Koncentracija radona u pravilu će biti najveća u podrumu i u prizemlju. Koncentracija na prvom katu bit će upola manja, dok je koncentracija radona iznad prvog kata obično zanemariva. Koncentracija radona unutar zgrade obično je 2 do 3 puta veća nego na otvorenom.

5. UMJETNI IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Umjetni izvori su po svojoj prirodi i učinku identični prirodnim izvorima. Ionizirajuće zračenje se sve više koristi u medicini, stomatologiji i industriji. Glavni korisnici umjetnog ionizirajućeg zračenja su: medicinske ustanove poput bolnica i farmaceutskih ustanova; ustanove za istraživanje i učenje; nuklearni reaktori i njihove pomoćne ustanove. Mnoge od ovih ustanova stvaraju radioaktivni otpad i neke otpuštaju kontrolirane količine zračenja u prirodu. Radioaktivni materijali također se koriste i u raznim potrošačkim proizvodima kao što su duhan (polonij-210), građevinski materijali, televizori, rendgenski sistemi na aerodromima, detektori dima (americij), elektronske cijevi, radioaktivni gromobrani itd.

Izloženost zračenju prosječne osobe iznosi otprilike 3.6 mSv godišnje, od čega 81% dolazi iz prirodnih izvora. Preostalih 19% dolazi iz umjetnih izvora zračenja. Neki umjetni izvori zračenja utječu na čovjeka kroz direktno zračenje, dok drugi poprimaju oblik radijacijskog trovanja i ozračuju čovjeka iznutra. Najznačajniji izvori umjetnog zračenja kojima su ljudi izloženi dolaze iz medicinskih procedura, kao što su dijagnostičke X-zrake, nuklearna medicina i terapija zračenjem. Glavni radionuklidi koji se koriste u medicini su jod-131, tehnećij-99m, kobalt-60, iridij-192 i cezij-137 i oni se rijetko ispuštaju u okolinu.

U manjem stupnju ljudi su izloženi i zračenju koje potječe iz ciklusa nuklearnog goriva, koji uključuje čitav niz od iskopavanja i obrade urana, preko nuklearnih reaktora pa sve do odlaganja radioaktivnog otpada, međutim učinci takve izloženosti još uvijek nisu pouzdano izmjereni.

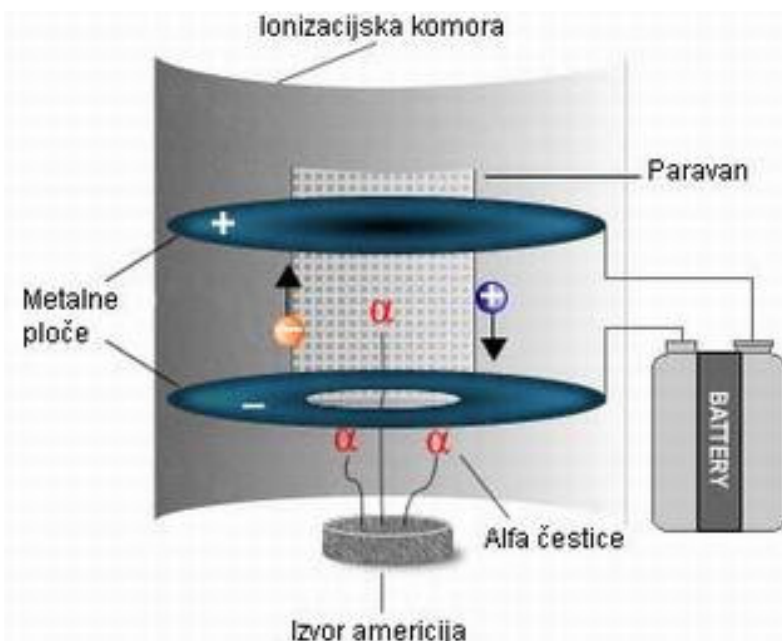
U slučaju nuklearnog rata, gama zrake iz padalina proizvedenih nuklearnim oružjem najvjerojatnije bi prouzrokovale najveći broj žrtava. Neposredno niz vjetar od mete, doza zračenja bi premašivala 30000 R na sat, a 450 R (tisuću puta više od pozadinskog zračenja) je fatalno za polovinu normalne populacije. Nije dokumentirano da je itko preživio dozu veću od 600 R. U slijedećoj tablici prikazani su najvažniji umjetni radionuklidi.

Nuklid	Vrijeme poluraspada	Izvor
tricij	12.3 god.	fisijski reaktori; proizvodnja nuklearnog oružja
jod-131	8.04 dana	produkt fisije; koristi se u medicinske svrhe
jod-129	1.57×10^7 god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
cezij-137	30.17 god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
stroncij-90	28.78 god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
tehnećij-99	2.11×10^5 god.	produkt raspada molibdena-99
plutonij-239	2.41×10^4 god.	produkt bombardiranja urana-238 neutronima

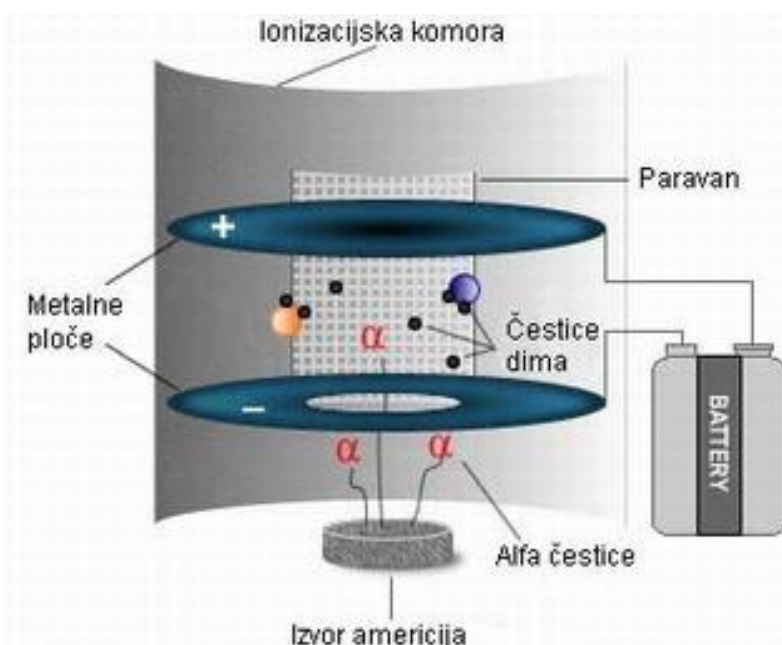
5.1. Ionizacijski detektori dima. Radioaktivni gromobrani

Ionizacijski detektori dima sadrže malu količinu americija-241 ugrađenog u zlatnu zavojnicu unutar ionizacijske komore. Ta zavojnica debela je otprilike 1 μm , promjer joj iznosi otprilike 3 do 5 mm, a težina 0.5 g. Prosječna aktivnost zavojnice je otprilike 1 μCi . Americij emitira alfa čestice i nisko energetske gama zrake. Vrijeme poluraspada americija je otprilike 432 godine što znači da se raspada vrlo sporo i da detektor dima, nakon što mu istekne radni vijek od 10 godina, u osnovi zadržava svu svoju početnu aktivnost.

Zavojnica detektora je obložena slojem srebra debelim otprilike 0.25 mm te slojem paladija debelim 2 μm . Ovakva obloga je dovoljno debela da zadrži radioaktivni materijal, ali je dovoljno tanka da propusti alfa čestice. Ionizacijska komora detektora sastoji se od dvije metalne ploče, jedne pozitivno nabijene i druge negativno nabijene. Molekule zraka, sastavljene uglavnom od atoma kisika i dušika, pri sudaru s alfa česticama koje emitira američij, gube elektron i postaju ionizirane. Rezultat su pozitivno nabijeni atomi kisika i dušika te negativno nabijeni elektroni.



Pozitivno nabijeni atomi gibaju se prema negativno nabijenoj ploči, dok se negativno nabijeni elektroni gibaju prema pozitivno nabijenoj ploči. To gibanje stvara slabu, ali stalnu električnu struju. Kada dim prođe u ionizacijsku komoru, on ometa struju budući da se čestice dima vežu za ione i vraćaju ih u neutralno stanje čime se smanjuje tok struje.



Kada struja opadne ispod određenog praga, oglašava se alarm. Ionizacijski detektori dima vrlo brzo reagiraju kod požara sa snažnim plamenom koji proizvodi malo dima.

Glavna opasnost ionizacijskog detektora dima je njegova radioaktivna komponenta americij-241. Americij je otpadni produkt nuklearnih reaktora i nalazi se obložen unutar detektora. Međutim, ukoliko dođe do oštećenja detektora (naprimjer, za vrijeme požara) americij se može osloboditi i tada se lako apsorbira u plućima i može izazvati karcinom i genetska oštećenja.

Prije Domovinskog rata u Republici Hrvatskoj bilo je postavljeno otprilike 50000 ionizacijskih detektora dima. U razdoblju od 1991. do 1995. godine otprilike 40% državnog teritorija trpjelo je ratna razaranja. Prilikom oštećenja zgrada može doći do oštećenja detektora i nekontroliranog širenja radioaktivnog materijala u okoliš, a još je opasnije ako netko pronade takav izgubljen ili oštećen detektor i dulje ga zadrži u svojoj blizini. U najvećoj su opasnosti djeca kojima se takvi predmeti mogu činiti zanimljivom igračkom.

Radioaktivni gromobrani koriste radioaktivno zračenje za ionizaciju zraka iznad gromobrana. Time se povećava vodljivost zraka pa se tako usmjerava i pomaže pražnjenje atmosferskog elektriciteta na željenom mjestu. Ionizirajuće polje radioaktivnog gromobrana prostire se u promjeru od 300 metara iznad gromobrana, a kako ima oblik stošca okrenutog nagore, ne djeluje na prizemne slojeve. Međutim ako gromobran padne s krova ili sa stupa na zemlju, zračenje se u njegovoj blizini širi horizontalno pa se tada u polju zračenja mogu naći i ljudi. Najzastupljeniji radionuklidi u gromobranima su kobalt-60 te europij-152 i 154. U Republici Hrvatskoj prije rata bilo je postavljeno 430 radioaktivnih gromobrana.

5.2. Nuklearna oružja

Tri su uobičajena tipa nuklearnog oružja:

- fisijska bomba
- fuzijska bomba
- prljava bomba

Fisijska bomba koristi energiju nuklearne fisije, gdje se teške jezgre (urana ili plutonija) bombardiraju neutronima i cijepaju u lakše elemente. Fisijske bombe koriste kemijski eksploziv da komprimiraju podkritičnu količinu urana-235 ili plutonija u gustu, nadkritičnu masu koja se onda izlaže izvoru neutrona. Time se započinje nekontrolirana lančana reakcija koja proizvodi velike količine energije. Jedan kilogram urana-235 može proizvesti 82 TJ energije.

Fuzijske bombe temelje se na nuklearnoj fuziji, gdje se lagane jezgre poput vodika ili helija spajaju u teži element i pri tom ispuštaju velike količine energije. Fuzijske bombe nazivaju se još i H-bombe jer im je fuzijsko gorivo najčešće u obliku vodika, ili termonuklearne bombe budući da fuzijska lančana reakcija zahtijeva ekstremno visoke temperature. H-bomba ima primarni uređaj (fisijsku bombu) koji detonira i započinje fuzijsku reakciju u sekundarnom uređaju (fuzijsko gorivo). Teoretski se može povezati neograničen broj sekundarnih uređaja i time postići značajno veća snaga od fisijske bombe.

Prljava bomba je termin za radiološko oružje, tj. nenuklearnu bombu koja raspršuje radioaktivni materijal koji se nalazi unutar bombe. Kad bomba eksplodira, raspršeni

radioaktivni materijal uzrokuje radioaktivnu kontaminaciju i zahvaćeno područje može učiniti neprikladnim za život na desetke godina. Nakon terorističkih napada na SAD 9.11.2001. jedan od najvećih strahova zapadnih vlada je teroristički napad prljavom bombom na naseljena područja.

Najsnažnija moderna termonuklearna oružja, osim primarnog fisijskog uređaja i sekundarnog fuzijskog uređaja, sadrže i vanjsku ljusku od urana. Brzi neutroni iz fuzijske faze uzrokuju fisiju urana čime se mnogostruko povećava snaga oružja. Postoje još dva tipa naprednih termonuklearnih oružja:

- kobaltna bomba
- neutronska bomba

Kobaltna bomba koristi kobalt u ljusci, a fuzijski neutroni pretvaraju kobalt u kobalt-60, snažan emiter gama zračenja s vremenom poluraspada od 5.26 godina. Kobalt-60 može uzrokovati tešku radioaktivnu kontaminaciju zahvaćenog područja. Inicijalno gama zračenje fisijskih produkata ekvivalentne bombe s uranom u vanjskoj ljusci je snažnije od kobalta-60: 15000 puta nakon jednog sata; 35 puta nakon jednog tjedna; 5 puta nakon jednog mjeseca; i otprilike je jednako nakon 6 mjeseci. Nakon jedne godine zračenje kobalta-60 postaje 8 puta jače od produkata fisije urana, a nakon pet godina 150 puta jače. Kobaltna bomba može proizvesti ekstremno radioaktivne padaline i čini zahvaćeno područje izuzetno neprikladnim za život.

Neutronska bomba je malo termonuklearno oružje kod kojeg se izboj neutrona generiran fuzijskom reakcijom namjerno ne apsorbira unutar oružja, već mu se dopušta da izađe. Vanjska ljuska oružja izrađena je od kroma i nikla čime je omogućen izlaz neutrona. Ovaj intenzivan izboj visokoenergetskih neutrona je visoko destruktivan mehanizam, iako su toplinski i udarni učinci ovakve bombe manji nego kod standardnih nuklearnih oružja. Neutroni imaju veću moć prodiranja od gama zračenja i biloški su štetniji što je dovelo do ideje o bombi koja bi mogla pobiti sve ljude na nekom području uz minimalnu fizičku štetu.

Energija koju ispušta nuklearno oružje dolazi u četiri glavna oblika:

- udar, 40-60% ukupne energije
- toplinsko zračenje, 30-50% ukupne energije
- ionizirajuće zračenje, 5% ukupne energije
- radioaktivne padaline, 5-10% ukupne energije

Ionizirajuće zračenje izazvano nuklearnom eksplozijom sačinjavaju neutroni, gama zrake, alfa čestice i elektroni koji se gibaju ekstremno velikim brzinama. Neutroni su isključivo produkt fisijske i fuzijske reakcije, dok su gama zrake također produkt tih reakcija ali i rezultat raspada produkata fisije. Intenzitet ionizirajućeg zračenja smanjuje se s povećanjem udaljenosti od mjesta eksplozije. U blizini mjesta eksplozije zračenje neutrona jače je od gama zračenja, a s povećanjem udaljenosti zračenje neutrona postaje zanemarivo u odnosu na gama zračenje.

Radioaktivna kontaminacija nakon nuklearne eksplozije pojavljuje se u obliku radioaktivnih padalina i radioaktivnosti izazvane neutronima, a dolazi iz tri izvora:

- produkti fisije
- fisijsko gorivo
- radioaktivnost izazvana neutronima

Fisijski produkti rezultat su cijepanja urana ili plutonija. Postoji preko 300 različitih produkata fisije s različitim vremenima poluraspada, od nekoliko sekundi do nekoliko godina, a najčešće emitiraju alfa i beta čestice.

Nuklearna oružja relativno su neučinkovita što se tiče iskorištavanja fisijskog goriva i velik dio urana i plutonija biva raspršen nakon eksplozije, a da nije prošao fisiju. Takvi materijali sporo se raspadaju emitirajući alfa čestice i relativno su male važnosti.

Neutroni koje emitira inicijalno nuklearno zračenje uzrokovat će radioaktivnost ostataka oružja, ali i tla, zraka i vode na mjestu eksplozije. Atomske jezgre koje su izložene zračenju neutrona će vezati neutrone i tako postati radioaktivne.

5.3. Medicinske primjene

Jedna od najranijih i najuobičajenijih primjena ionizirajućeg zračenja je za dijagnosticiranje ozljeda i bolesti. Roentgenovo otkriće X-zraka omogućilo je liječnicima pogled unutar ljudskog tijela bez operiranja.



Danas se zračenje koristi na mnoge načine u liječenju bolesti. U Sjedinjenim Američkim Državama godišnje se izvede više od 11 milijuna postupaka koji koriste nuklearnu medicinu. Zračenje se također koristi u laboratorijskim testovima na uzorcima tjelesnih tekućina i tkiva radi dijagnosticiranja bolesti.

Ionizirajuće zračenje se naširoko koristi za dijagnosticiranje i liječenje karcinoma, povećavajući postotak preživljavanja i poboljšavajući kvalitetu života pacijenata. Naprimjer, obećavajuća terapija za leukemiju uključuje "naoružavanje" antitijela s radioaktivnim izotopima. Antitijela se proizvode u laboratoriju i napravljena su tako da se vežu za specifične proteine stanica tumora. Kad se ubrizgaju pacijentu, dotična antitijela vežu se za stanice tumora i ubijaju ih svojom radioaktivnošću, dok zdrave stanice ostaju neoštećene.

- Ostale primjene zračenja za dijagnozu i liječenje karcinoma uključuju:
- mamografiju za otkrivanje karcinoma dojke u ranoj fazi
 - X-zrake koje služe za povećanje sigurnosti, točnosti i informativnosti biopsija
 - praćenje reakcije tumora na liječenje i razlikovanje malignih od benignih tumora
 - skeniranje koštane srži i jetre radi otkrivanja širenja karcinoma

6. UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ZDRAVLJE

Izloženost niskim dozama prirodnog ionizirajućeg zračenja nema utjecaja na zdravlje ljudi. Izloženost visokim dozama ionizirajućeg zračenja može uzrokovati opekline, gubitak kose, mučninu, razne bolesti i smrt. Učinak izloženosti zračenju ovisi o količini apsorbiranog zračenja, trajanju izloženosti te spolu, starosti i zdravstvenom stanju izložene osobe. Kod osoba koje su bile izložene ionizirajućem zračenju prije rođena može doći do poremećaja mentalnih funkcija. Povećanje doze zračenja rezultira težim posljedicama. Izloženost ionizirajućem zračenju također povećava rizik od pojave karcinoma. Kao i s ostalim učincima, vjerojatnost pojave karcinoma raste s povećanjem doze zračenja.

6.1. Vrste izloženosti. Radioaktivna kontaminacija

Izloženost ionizirajućem zračenju može biti kronična i akutna. Kronična izloženost predstavlja kontinuiranu izloženost niskim dozama zračenja kroz dugi vremenski period. Svi ljudi su kronično izloženi prirodnom pozadinskom zračenju. Učinci kronične izloženosti zračenju mogu se vidjeti tek neko vrijeme nakon početka izloženosti. Ti učinci uključuju genetske promjene, karcinom, benigne tumore, kataraktu i oštećenja kože.

Akutna izloženost je izloženost jednoj velikoj dozi zračenja ili seriji doza kroz kratki vremenski period. Akutna izloženost može biti rezultat slučajne ili hitne izloženosti kod medicinskih procedura (terapija zračenjem). U većini slučajeva akutna izloženost može uzrokovati trenutne i zakašnjele učinke. Trenutni učinci uključuju brzu pojavu radijacijskog trovanja, poremećaje probavnog trakta, bakterijske infekcije, krvarenje, anemiju, gubitak tjelesnih tekućina. Zakašnjele biološki učinci uključuju kataraktu, sterilnost, karcinom i genetske promjene. Ekstremno velike doze akutne izloženosti mogu uzrokovati smrt u roku od nekoliko sati, dana ili tjedana. Ekstremni primjeri akutne izloženosti su:

- trenutni bljesak nuklearne eksplozije
- rukovanje radioaktivnim materijalima
- nesreće u laboratoriju ili tvornici
- namjerne ili slučajne visoke doze u medicini

Radioaktivna kontaminacija označava prisustvo radionuklida na ili u organizmu u dozama većim od propisanih maksimalnih doza. Te su doze uočljivo veće od količina koje se mogu smatrati prirodnom radioaktivnošću nekog područja. Kontaminacija može biti:

- vanjska - radionuklid se nalazi na tijelu
- unutarnja - radionuklid je unutar organizma

Od vanjske kontaminacije se može zaštititi i znatno je lakša dekontaminacija. Stoga je vanjska kontaminacija znatno manje opasna od unutarnje pri kojoj se radionuklidi mogu ugraditi u organizam. Putevi unutarnje kontaminacije su:

- dišni - inhalacijom
- probavni - ingestijom
- kroz kožu - perkutalno

Zrakom u organizam mogu ući radionuklidi koji dolaze u obliku aerosola, bilo u elementarnom obliku bilo u obliku drugih topivih spojeva koji su otopljeni u aerosolu zraka. Posljedice finih radioaktivnih aerosola u zraku ovise o veličini i količini aerosola u zraku, topivosti radionuklida, opsegu i brzini resorpcije, vrsti zraka i energiji koju radionuklidi emitiraju te vremenu poluraspada. Što je čestica veća to teže dospjeva u plućnu alveolu.

Samim time veća je mogućnost da bude iskašljana ali i progutana. Veće čestice imaju sporiju topivost, a time i manju brzinu apsorpcije. Topivi nuklidi se dobro resorbiraju kroz alveole i vrlo lako ulaze u organizam. Vrijeme biološke polueliminacije za dobro topive radionuklide je 5-6 dana. U pravilu polovica inhaliranih topivih radionuklida biva otopljena i apsorbirana u krv te raznesena po cijelom organizmu. Jedan dio može biti iskašljan i izbačen iz organizma, no dio će se zaustaviti u usnoj šupljini i bit će progutan. Oksidi su najčešće veličine oko 5 mikrometara. Dio ih se zadrži u gornjim dišnim putevima i biva izbačen, a dio prodre do alveola. Kako nisu topivi, ne resorbiraju se. Stoga im je djelovanje ograničeno na pluća (karcinom pluća). Što je topivost radionuklida veća, brzina resorpcije u plućima bit će veća. Što je kraće vrijeme poluraspada, opasnost je veća i veće su štete. Naime, u kraćem vremenu će se raspasti radionuklidi i samim time će se osloboditi velika količina radioaktivnog zračenja.

6.2. Podjela učinaka na zdravlje

Učinci zračenja na zdravlje podijeljeni su u dvije kategorije: granični i negranični učinci. Granični učinci se pojavljuju kad je dostignuta određena količina izloženosti zračenju i dovoljno stanica je oštećeno da učinak bude vidljiv. Negranični učinci se pojavljuju pri nižim dozama izloženosti zračenju. Granični učinci se pojavljuju kad je količina izloženosti zračenju na desetke, stotine ili tisuće puta veća od pozadinskog zračenja, a trajanje izloženosti nekoliko minuta. U slijedećoj tablici prikazani su neki granični učinci i doze pri kojima se javljaju.

Doza [rem]	Učinak
5-20	mogućnost pojave karcinoma; mogućnost aberacije kromosoma
25-100	promjene u krvi
veća od 50	privremeni sterilitet kod muškaraca
100	udvostručena vjerojatnost genetskih mutacija
100-200	povraćanje, proljev, slabljenje imuniteta, poremećaj rasta kostiju kod djece
200-300	ozbiljno radijacijsko trovanje, mučnina
veća od 300	stalan sterilitet kod žena
300-400	uništenje koštane srži
400-1000	akutna bolest i brza smrt (u roku od nekoliko dana)

Negranični učinci mogu se pojaviti pri bilo kojoj količini izloženosti zračenju, ali se rizik od štetnih učinaka na zdravlje općenito povećava s porastom apsorbirane količine zračenja. Negranični učinak koji se najviše proučava je karcinom. To proučavanje je zakomplicirano činjenicama da svaki karcinom nije uzrokovan zračenjem, da izloženost određenoj količini zračenja može uzrokovati karcinom kod jedne osobe ali ne i kod svake i da se karcinom često pojavljuje mnogo godina nakon izloženosti zračenju. U ovom trenutku je nemoguće odrediti koji karcinom je uzrokovan zračenjem, a koji ostalim kancerogenim tvarima u prirodi. Sklonost karcinomu izazvanom zračenjem ovisi o nekoliko faktora kao što su dio tijela koji je ozračen, spol i dob. Dijelovi tijela u kojima stanice brzo rastu i brzo se množe te u kojima se koncentriraju radioaktivni materijali skloniji su pojavi karcinoma.

6.3. Rizici pojave karcinoma usljed izloženosti ionizirajućem zračenju

Ionizirajuće zračenje utječe na ljude tako da odlaže energiju u tkivu i tako uzrokuje oštećenje ili smrt stanica. Kad stanica apsorbira zračenje, moguća su četiri učinka. Prvo, stanica može biti toliko oštećena da prestane normalno funkcionirati i odumre. Drugo, stanica može izgubiti sposobnost reprodukcije. Treće, genetski materijal unutar stanice (DNA) može biti oštećen tako da su buduće kopije stanice promijenjene što može uzrokovati karcinom. Konačno, može se dogoditi da apsorpcija zračenja nema nikakvog štetnog učinka na stanicu.

Stanice su građene od molekula. Oštećenja stanice nastaju interakcijom zračenja s tim molekulama. Ako zračenje pogodi molekulu koja je kritična za funkcioniranje stanice, kao što je DNA, šteta će biti mnogo veća nego ako zračenje naprimjer pogodi molekulu vode. Neke stanice su podložnije učincima zračenja, a najviše one koje se brzo reproduciraju. Stanice često mogu popraviti štetu nastalu zračenjem, ali ako se stanica podijeli prije nego je šteta popravljena, novonastale stanice bit će promijenjene.

Nastanak karcinoma je stohastički događaj. Karcinom ima isti učinak na organe bilo da je nastao kao rezultat visoke ili niske doze zračenja. Sve što se mijenja je vjerojatnost nastanka karcinoma, koja raste s povećanjem doze zračenja. Ne postoji karcinom koji nastaje isključivo kao rezultat zračenja. Međutim, neke vrste karcinoma postaju učestalije uz određene doze zračenja. Rizik od pojave karcinoma također varira ovisno o starosti u trenutku izloženosti, s tim da je rizik veći kod onih osoba koje su zračenju izložene kao djeca.

Neke vrste karcinoma koje se povezuju s visokim dozama zračenja su leukemija, karcinom dojke, mjehura, debelog crijeva, jetre, pluća, multipli mijelom. Vremenski period između izloženosti zračenju i pojave karcinoma naziva se latentni period. Za leukemiju, minimalni vremenski period između izloženosti zračenju i pojave bolesti iznosi 2 godine. Za čvrste tumore latentni period iznosi više od 5 godina.

Za informacije o učinku visokih doza zračenja znanstvenici se oslanjaju na epidemiološke podatke Japanaca koji su preživjeli eksplozije atomskih bombi, radnika koji su bili u nuklearnoj elektrani u Černobilu u vrijeme nesreće 1985. i ljudi koji su izloženi visokim dozama zračenja pri medicinskoj terapiji. Ti podaci pokazuju veću incidenciju karcinoma kod izloženih osoba i veću vjerojatnost pojave karcinoma ako je doza zračenja veća. Otprilike 134 radnika i vatrogasca koji su se borili s vatrom u Černobilu primili su velike doze zračenja, od 700 do 13400 mSv i bolovali su od akutnog radijacijskog trovanja, a 28 ih je umrlo od ozljeda uzrokovanih zračenjem. U nedostatku direktne informacije ovi se podaci koriste za procjenu učinka nižih doza zračenja. Znanstvenici pretpostavljaju da su šanse pojave karcinoma proporcionalne količini zračenja i da je rizik jednak za kroničnu i akutnu izloženost. Drugim riječima, nijedno izlaganje zračenju nije bez rizika.

6.4. Zdravstveni učinci izloženosti radonu

Američka nacionalna akademija znanosti objavila je 1998. izvještaj odbora BEIR VI (Biological Effects of Ionizing Radiation) o učinku izloženosti radonu na zdravlje. Taj izvještaj je najkonkretniji skup znanstvenih podataka o radonu i potvrđuje da je radon drugi po redu uzrok karcinoma pluća u Sjedinjenim Američkim Državama. Studija procjenjuje da radon uzrokuje otprilike 15000 smrti od karcinoma pluća godišnje.

Iako je radon kemijski inertan i električki neutralan, radioaktivan je, što znači da se atomi radona u zraku spontano raspadaju i tako nastaju drugi elementi. Elementi koji nastaju raspadom radona su električki nabijeni i mogu se zakačiti na čestice prašine u zraku. Te čestice prašine mogu se lako udahnuti i doći u pluća. Radioaktivni atomi se tada raspadaju i emitiraju alfa zračenje koje ima potencijal za uništavanje stanica pluća. Alfa zračenje može oštetiti DNA stanica pluća i tako dovesti do nastajanja karcinoma. Alfa zračenje u tijelu prelazi ekstremno male udaljenosti i ne može doseći stanice niti jednog drugog organa osim pluća.

Odbor BEIR VI je koristio informacije iz istraživanja karcinoma pluća kod rudara, koji su izloženi visokim dozama radona, za procjenu rizika izloženosti radona u kućama. Odbor se koristio podacima iz 11 velikih studija koje su uključivale otprilike 68000 rudara od kojih je 2700 umrlo od karcinoma pluća. Odbor se složio s nekoliko ranijih grupa stručnjaka koji su zaključili da rizik od nastanka karcinoma pluća raste linerano s porastom doze zračenja.

Međutim, većina rudara iz studija bili su pušači i udisali su prašinu i druge zagađivače iz rudnika. Budući da i radon i dim cigareta uzrokuju karcinom pluća, teško je razlučiti učinke te dvije vrste izloženosti, a najveći problem je bila procjena rizika od radona kod nepušača na temelju podataka dobivenih od pušača. Problem je i u tome što su gotovo svi rudari bili muškarci, dok populacija koja je izložena radonu u kućama uključuje i žene i djecu.

1995. u Sjedinjenim Američkim Državama od karcinoma pluća je umrlo otprilike 157400 ljudi. Od 95400 muškaraca koji su umrli od karcinoma pluća, otprilike 95% su bili pušači; od 62000 žena, otprilike 90% su bile pušači. Procjenjuje se da je 1995. otprilike 11000 nepušača umrlo od karcinoma pluća. BEIR VI odbor procjenjuje da u Sjedinjenim Državama od karcinoma pluća izazvanog radonom godišnje umre između 15400 i 21800 ljudi uključujući pušače i nepušače. Također se procjenjuje da je od 11000 smrti nepušača uzrokovanih karcinomom pluća između 2100 i 2900 povezano s izloženosti radonu.

6.5. Zaštita

Postoje četiri načina zaštite od zračenja:

- trajanje izloženosti - za ljude koji su uz prirodno pozadinsko zračenje izloženi dodatnim izvorima zračenja, ograničavanje ili minimiziranje trajanja izloženosti smanjit će dozu zračenja.
- udaljenost - intenzitet zračenja smanjuje se povećavanjem udaljenosti od izvora zračenja; doza zračenja drastično se smanjuje što se više udaljavamo od izvora

- štitovi - barijere od olova, betona i vode pružaju dobru zaštitu od prodirućeg zračenja kao što je gama zračenje. Zbog toga se neki radioaktivni materijali spremaju ili se rukuje njima pod vodom ili korištenjem daljinskog upravljanja u prostorijama izgrađenim od debelog betona ili obloženim olovom. Postoje posebni plastični štitovi koji zaustavljaju beta čestice, dok zrak zaustavlja alfa čestice. Postavljanje odgovarajućeg štita između izvora zračenja i ljudi uvelike će smanjiti ili potpuno eliminirati dodatnu dozu zračenja
- zatvaranje - radioaktivni materijali zatvaraju se u što je moguće manji prostor i drže se izvan okoliša. Radioaktivni izotopi koji se koriste u medicinske svrhe odlažu se u zatvorenim ustanovama, dok nuklearni reaktori funkcioniraju unutar zatvorenih sistema sa nekoliko barijera koje zatvaraju radioaktivni materijal. Prostorije s radioaktivnim materijalom imaju snižen tlak tako da može doći samo do curenja u prostoriju, ali ne i iz prostorije.

U slučaju nuklearnog rata, atomska skloništa smanjuju izloženost zračenju najmanje 1000 puta. Većina ljudi može primiti dozu od 100 R raspoređenu kroz nekoliko mjeseci, ali uz povećani rizik za pojavu karcinoma kasnije u životu.

Zastupnički dom Hrvatskog državnog sabora donio je 5. ožujka 1999. Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja. Tim se zakonom određuju načela i mjere zaštite od ionizirajućih zračenja, postupanje u izvanrednim događajima, način postupanja s radioaktivnim otpadom te nadzor nad provedbom mjera zaštite od ionizirajućih zračenja. Zakon se odnosi na rendgenske i druge električne uređaje koji proizvode ionizirajuća zračenja, radioaktivne tvari, uređaje i postrojenja s radioaktivnim tvarima, radioaktivni otpad, nuklearna postrojenja, sve tvari i predmete iz ciklusa nuklearnog goriva, radioaktivne tvari koje se nalaze u okolišu zbog nuklearnih eksplozija te sve djelatnosti i intervencije u svezi s izvorima ionizirajućih zračenja.

7. LITERATURA

1. Ionizing Radiation Fact Sheet Series, dostupno na url:
<http://www.epa.gov/radiation/docs/ionize/ionize.htm>
2. Ionizing Radiation and Health, dostupno na url: http://www.arpansa.gov.au/is_rad.htm
3. Ionizing Radiation, dostupno na url:
<http://seer.cancer.gov/publications/raterisk/risks90.html>
4. Natural Sources of Ionizing Radiation, dostupno na url:
<http://chemed.chem.purdue.edu/chemed/bodnergrouper/archive/publications/radiation.html>
5. Health Effects of Ionizing Radiation, dostupno na url:
http://www.arpansa.gov.au/basics/health_ion.htm
6. Ionizing Radiation, dostupno na url:
http://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation.htm
7. Radioactivity in Nature, dostupno na url:
<http://www.physics.isu.edu/radinf/index.html>
8. The Health Effects of Exposure to Indoor Radon, dostupno na url:
<http://www.nsc.org/ehc/radon/public.htm>
9. What Are the Health Effects of Ionizing Radiation, dostupno na url:
http://www.ag.ohio-state.edu/~rer/rerhtml/rer_24.html
10. Nuclear Weapon, dostupno na url: <http://www.answers.com/topic/nuclear-weapon>
11. Smoke Detectors & Radiation, dostupno na url:
http://www.epa.gov/radiation/sources/smoke_alarm.htm
12. Jedinice radioaktivnosti, dostupno na url:
<http://www.hlede.net/radiobiologija/RAD11-20.htm>