

Vrste i mehanizmi oštećenja stanica ionizirajućim zračenjem

Perić, Lovre

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:176:852207>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Sveučilišni odjel zdravstvenih studija
SVEUČILIŠTE U SPLITU

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University Department for Health Studies, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU

Podružnica

SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA

PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ

RADIOLOŠKA TEHNOLOGIJA

Lovre Perić

**VRSTE I MEHANIZMI OŠTEĆENJA STANICA
IONIZIRAJUĆIM ZRAČENJEM**

Završni rad

Split, 2014.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

Podružnica

SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA

PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI TUDIJ

RADIOLOŠKA TEHNOLOGIJA

Lovre Perić

**VRSTE I MEHANIZMI OŠTEĆENJA STANICA
IONIZIRAJUĆIM ZRAČENJEM**

Završni rad

Mentor:

Prof.dr.sc. Stipan Janković

Split, 2014.

SADRŽAJ

1. UVOD	1, 2
1.1. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE U MEDICINI	2-4
1.2. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	4,5
2. CILJ RADA	6-10
3. REZULTATI RADA	11
3.1. IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	11
3.1.1. PRIRODNI IZVORI	11
3.1.1.1. KOZMIČKO ZRAČENJE	11, 12
3.1.1.2. PRIRODNO ZRAČENJE RADIOAKTIVNIH MATERIJALA	12
3.1.1.3. RADON	12, 13
3.1.2. UMJETNI IZVORI	13, 14
3.2. INTERAKCIJA RENDGENSKIH ZRAKA S MATERIJOM	15, 16
3.2.1. EFEKTI MEĐUDJELOVANJA IONIZIRAJUĆIH ZRAKA S MATERIJOM	16
3.2.1.1. COMPTONOV RASAP	16, 17
3.2.1.2. PRAVA APSORPCIJA ILI FOTOELEKTRIČNI EFEKT	17
3.2.1.3. PROCES STVARANJA PAROVA	18
3.3. NAČINI DJELOVANJA IONIZIRAJUĆIH ZRAKA NA ORGANIZAM	18
3.3.1. INDIREKTNO DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ORGANIZAM	18-20
3.3.2. DIREKTNO DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ORGANIZAM	20, 21
3.4. ČIMBENICI O KOJIMA NAJVIŠE OVISI BIOLOŠKI UČINAK IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	22
3.4.1. IZLOŽENOST STANICA I STANIČNI CIKLUS	22, 23
3.4.1.1. BIOLOŠKI UČINCI PRILIKOM RADIOTERAPIJE	23-26
3.4.2. APSORBIRANA DOZA	26, 27
3.4.3. KVALITETA I VRSTA SNOPI ZRAČENJA	27, 28

3.4.4. BRZINA PRIMLJENE DOZE	28, 29
3.5. UČINCI ZRAČENJA NA PLOD	29, 30
3.6. DOZE ZRAČENJA PRI PROFESIONALNOM RADU	30
4. RASPRAVA	31 - 33
5. ZAKLJUČAK	34, 35
6. SAŽETAK	36, 37
7. SUMMARY	38,39
8. LITERATURA	40, 41
9. ŽIVOTOPIS	42

1. UVOD

Ionizirajuće zračenje jest svako zračenje, bilo u obliku čestica ili elektromagnetskih valova, sposobnih neutralne atome pretvoriti u ione. Ionizirajuće se zrake, prilikom prolaska kroz materiju, sudaraju s elektronima. Ti elektroni imaju istu ili manju energiju vezanja za atom te ih na taj način ionizirajuće zrake izbacuju iz elektronskog omotača. Na taj način neutralni atom postaje ion.

Ionizacija može biti prouzročena teškim i lakim nabijenim česticama, elektromagnetskim zračenjem te električki neutralnim česticama – neutronima.

Naziv **teške nabijene čestice** potječe od činjenice što su one relativno znatno teže od elektrona s kojim interferiraju prolaskom kroz materiju. U teške nabijene čestice spadaju protoni, deuteroni,¹ tritoni² i općenito ionizirani atomi – ioni. Svojom velikom energijom električnog polja povlače za sobom bliske elektrone i izbacuju ih iz veza s njihovim jezgrama. Rezultat je niz ioniziranih atoma, koje poput traga, nabijena čestica ostavlja za sobom. Pritom teška nabijena čestica postupno gubi svoju energiju sve do zaustavljanja.

Lagane nabijene čestice su elektroni i pozitroni. Ionizacija može nastati kao posljedica sudaranja upadnog elektrona s elektronima neutralnih atoma i kao posljedica sudaranja pozitrona s njegovom antičesticom – elektronom, pri kojem dolazi do njihovih poništenja – anihilacije, pretvaranja njihove mase u energiju, praćene emisijom dviju gama-zraka, koje također nastavljaju daljnu ionizaciju stanica kroz koje prolaze.

Ionizacija neutralnih atoma **neutronima** može nastati indirektnim procesima na nekoliko načina. Sudaranjem neutrona s jezgrom atoma nastaje nestabilna jezgra atoma koja zbog novonastale nestabilnosti izbacuje proton, koji je teška nabijena čestica, te se daljnja ionizacija odigrava kao u slučaju teških nabijenih čestica. Udarom neutrona u atomsku jezgru može doći i do oslobađanja znatne energije, koja se nadomješta emisijom gama-zrake, tako da se daljnja ionizacija okolnih atoma provodi i elektromagnetskom vrstom zračenja. Ako su u ozračenoj materiji prisutni fisibilni elementi, to će za posljedicu imati fisiju, vrlo jak izvor ionizirajućeg zračenja. Fisija je proces cijepanja jezgre atoma na manje dijelove u kojima se oslobađaju novi neutroni, nastaju gama-fotoni i nove manje jezgre. Nuklearna fisija proizvodi

¹ Deuteroni su izotopi vodika koji imaju dvostruko veću masu u odnosu na obični vodik. $A=2$, $Z=1$. Otkriveni su 1933. godine.

² Tritoni su pozitivno nabijene čestice sastavljene od dvaju protona i jednog neutrona, što odgovara jezgri tricija, izotopa vodika. $A=3$, $Z=2$. Otkriveni su između 1930. i 1935.

snagu za nuklearnu energiju i pokreće eksploziju nuklearnog oružja. Najbogatiji izvor neutrona su nuklearni reaktori. Energetski spektar neutrona iz fisije proteže se od nekoliko keV-a, do više od 10 MeV-a. Pogodno je neutrone klasificirati prema njihovoj energiji. Na dnu energetske skale su „hladni” neutroni, koji su u termičkoj ravnoteži s okolinom hladnijom od sobne temperature, energija im se proteže unutar intervala 0–0,025 eV. Slijede ih „termički” neutroni kojima najvjerojatnija energija iznosi 0,025 eV, a u termičkoj su ravnoteži s molekulama i atomima na sobnoj temperaturi od 20° C. Klasifikacija neutrona prema energiji nastavlja se redom: „epitermički” (0,025 eV – 0,4 eV), „kadmijevski” (0,4 eV – 0,6 eV), „epikadmijevski” (0,6 eV – 1 eV), „spori” (1 eV – 10 eV), „rezonantni” (10 eV – 300 eV), „intermedijatni” (300 eV – 1 MeV), „brzi” (1 MeV – 20 MeV) i „relativistički” s energijom iznad 20 MeV-a.

1.1. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE U MEDICINI

Gotovo sva današnja medicinska radiologija, izuzevši magnetsku rezonanciju i ultrazvuk, zasniva se na ionizacijskim zrakama elektromagnetskog spektra visokih energija koje mogu izazvati promjene neutralnih atomskih, odnosno molekulskih struktura kroz koje prolaze. Upravo zbog tog svojstva, mogućnosti stvaranja iona u neutralnoj električki nabijenoj materiji kroz koju prolazi, to zračenje nazivamo ionizirajuće zračenje. Možemo ga stvoriti pomoću rendgenske cijevi ili nastaje radioaktivnim raspadima u izvorima zračenja nestabilnih atomskih jezgri.

Još su se mnogi znanstvenici prije Williama Roentgena susretali s x-zrakama no nisu ih znali iskoristiti i definirati. W. Roentgen je 1895. godine, eksperimentirajući s katodnim cijevima, primijetio da kristali barijevog platin-cijanida fluoresciraju kada se kroz katodnu cijev pušta električna struja. Daljnjim istraživanjem utvrdio je zacrnjenje fotografske ploče pod djelovanjem katodne cijevi priključene na akumulator. Vrhunac svog otkrića obilježio je 22. prosinca 1895., snimivši ruku svoje žene Berte te nakon pravilne fotografske obrade, jasno prikazao kosti šake i dva prstena koja je nosila (slika 1A). Taj datum smatra se rođenendanom radiologije.

Nakon Roentgenova otkrića, uslijedila su mnogobrojna daljna istraživanja i ispitivanja različitih načina primjene zračenja te općenito njegovih karakteristika. Znanstvenici su vrlo rano utvrdili da osim fizikalnih, zrake imaju i biološke učinke na ozračena tkiva te su ih neki

liječnici koristili u terapijama tumorskih stanica. Prvi pisani dokaz biološkog djelovanja ionizirajućeg zračenja opisao je E. Thompson u časopisu „Electrical Engineering“ 1896. godine, ukazujući na posljedice nakon duljeg ili kraćeg razdoblja latencije. Na žalost, ove spoznaje nisu doprijele do mnogih znanstvenika i liječnika te su nastavili primjenu rendgenskih zraka bez ograničenja i opreza. Posljedično su već 1910. godine zabilježeni mnogobrojni slučajevi težih oboljenja i smrti uzrokovanih rendgenskim zračenjem.

Henri Becquerel je 1896. godine uzeo prirodne fluorescentne minerale kako bi proučavao svojstva rendgenskih zraka, koje je W. Roentgen otkrio godinu dana ranije. Roentgen je vjerovao da uran apsorbira sunčevu energiju pa poslije emitira rendgensko zračenje. Becquerel je, ipak, otkrio da uran emitira zračenje čak i kad prije toga nije bio izložen suncu. Kaže se da je Becquerel prvi otkrio radioaktivnost. Nedugo nakon tih otkrića, otkrili su se i drugi radioaktivni izvori zračenja i njihovi biološki učinci. Godine 1900. Pierre Curie opisao je promjene vlastite kože izložene manjoj količini radija (slika 1B). Nakon toga, počela su različita istraživanja na područjima biologije i kemije koja su dokazala opasne učinke otkrivenih zračenja te su se počeli uvoditi različiti pravilnici i zakoni o zaštiti prilikom rukovanja ionizirajućim zračenjem.



A



B

Slika 1. PREUZETO: fr.wikipedia.org; A) Ruka Berthe Roentgen, prva radiografska snimka, 1895. B) Pierre Curie sa ženom Mariom

Rendgenske su zrake neizostavan dio medicinske radiološke dijagnostike i terapije, ali i drugih različitih područja čovjekova rada (pretrage prtljage na graničnim prijelazima, kontrole

kvalitete varova na brodovima u brodogradilištima, određivanja starosti različitih materijala, različite kontrole u avio i automobilskej industiji itd.).

Danas je, korisna medicinska primjena ionizirajućih zračenja svojevrsno mjerilo napretka neke zemlje. Moderna je medicina nezamisliva bez primjene ionizirajućeg zračenja, a izloženost bolesnika i profesionalnog osoblja sve više raste. Na žalost, uz poželjne efekte zračenja, pojavljuju se i brojni nepoželjni efekti. Biološko djelovanje ionizirajućeg zračenja posljedica je fizikalnih i kemijskih procesa u stanici koji se međusobno nadovezuju.

1.2. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Ionizirajuće zračenje pokušava se što točnije i preciznije izmjeriti različitim načinima i tehnikama izračunavanja kako bi se što bolje, učinkovitije i manje opasno moglo njime rukovati. Vrijednosti ionizirajućeg zračenja najčešće prikazujemo u obliku četiriju različitih izračuna i u obliku jedinice za radioaktivnu aktivnost.

Ekspozicija doza jest zbroj električnih naboja svih iona istoga naboja stvorenih u jedinici mase tvari pri prolasku rendgenskih ili gama-zraka. Mjerna jedinica je C/kg, a kratica za ekspoziciju je X. Stara mjera za ekspozicijsku dozu je rendgen (R); $1\text{C/kg} = 3867\text{ R}$.

Apsorbirana doza jest količina energije ionizirajućeg zračenja koju apsorbira tvar na koju zračenje djeluje. Mjerna jedinica je 1 grej (Gy) koji je jednak 1 J/kg; 1 Gy predstavlja 1 J (Joul) energije koju je ionizirajuće zračenje predalo 1 kilogramu (kg) tvari. Kratica za apsorbiranu dozu je D. Stara mjerna jedinica je rad. $1\text{ Gy} = 100\text{ rada}$, odnosno $1\text{ rad} = 0,01\text{ Gy}$. Omjer ekspozicijske doze u odnosu na apsorbiranu dozu približno iznosi $1 : 0.96$.

Kako apsorbirana doza, u različitim uvjetima, ne izražava dovoljno precizno težinu štetnih učinaka zračenja na organizam, uveden je pojam **ekvivalentne doze** (ekvivalentan znači jednakomjeran, istog značaja). Ekvivalentna je doza ili dozni ekvivalent (H, eng. RBE – Relative Biological Effectiveness) jednaka umnošku apsorbirane doze (D), faktora kvalitete (Q) i proizvoda ostalih čimbenika (N). Jedinica za ekvivalentnu dozu je Sievert (Sv = J/kg).

$$H = D \times Q \times N$$

H je ekvivalentna doza ili dozni ekvivalent u Sv (Sievert; $\text{Sv} = \text{J/kg}$), D izražava apsorbiranu dozu u grejima ($\text{Gy} = \text{J/kg}$), Q je faktor kvalitete kojim trebamo pomnožiti

apsorbiranu dozu kako bismo saznali kolika je šteta nanescena ozračenim jedinkama bilo kojom vrstom ionizirajućeg zračenja. Q ovisi o linearnom prijenosu energije (eng. Linear Transfer Energy-LTE; više u poglavlju 3.4.3.) pojedinih vrsta zraka; vrijednosti Q za rendgensko zračenje, gama-zračenje i beta-čestice Q je 1, a za alfa-čestice Q je 20. N iskazuje sve ostale modifikacijske čimbenike, iznosi 1. Stara jedinica za ekvivalentnu dozu je rem, koji je iznosio sto puta manje od 1 Sv.

Za određivanje stupnja ozračenosti čovjekova organizma kao cjeline uvedena je **efektivna ekvivalentna doza**. Opisuje težinski faktor pojedinog organa koji primi određenu količinu ekspozicijske doze. Težinski faktor je vjerojatnost nastanka biološkog efekta pri zračenju u odnosu na težinski faktor ozračenosti cijelog tijela. Označava se slovom W . Za cijelo tijelo W iznosi 1, za jajnik i testise W je 0,25 (25 %), za koštanu srž 0,12 (12 %), površina kostiju 0,03 (3 %), štitnu žlijezdu 0,03 (3 %), prsni koš 0,15 (15 %), pluća 0,12 (12 %) te za ostala tkiva W iznosi 0,30 (30 %).

Aktivnost radioaktivnog izvora izražena je brojem raspada atomskih jezgri u jedinici vremena. Iskazujemo je mjernom jedinicom becquerel (Bq) što predstavlja 1 radioaktivni raspad u sekundi. Stara mjerna jedinica za radioaktivni raspad je curie (Ci), $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ Bq. Vrijeme radioaktivnog raspada obično se iskazuje u obliku poluraspada, odnosno iskazuje koliko je potrebno da se broj početnih radioaktivnih jezgri raspadne na pola.

2. CILJ RADA

Ionizirajuće zračenje utječe na organizam na mikroskopskoj razini, odnosno na razini atoma. Ljudsko se tijelo sastoji od mnoštva atoma, pretpostavlja se – od njih 10^{28} koji su povezani u molekule i međusobno interferiraju. Atomi su građeni od atomske jezgre i elektronskog omotača. Jezgra se sastoji od pozitivno nabijenih čestica protona i neutralnih čestica neutrona. U elektronskom omotaču nalaze se negativno nabijene čestice elektroni, koji su svrstani u elektronske ljuske pripadajuće energije vezivanja za jezgru atoma. Današnja istraživanja ukazuju da su i protoni, neutroni i elektroni građeni od još manjih čestica – kvarkova i leptoni. Kvarkovi su pozitivnog naboja, dok leptoni mogu biti negativnog ili neutralnog naboja. Ti najsitniji elementi mogu se povezivati na različite načine, a ovisno o tome, na različite načine međudjeluju s okolinom, a i s ionizirajućim zračenjem.

Ionizirajuće zrake koje se koriste u medicinske svrhe zrake su visoke energije elektromagnetskog spektra zračenja. Karakteriziraju ih valne duljine manje od 10 nm proporcionalno većih frekvencija i energije. Prolaskom kroz materiju, ljudsko tijelo, ioniziraju neutralne atome sukladno svojim karakteristikama. U medicinske svrhe najčešće se koriste četiri vrste ionizirajućih zraka: alfa, beta i gama-zrake koje nastaju kao posljedica raspada nestabilnih radioaktivnih atomskih jezgri (slika 2) te rendgenske zrake koje nastaju u rendgenskoj cijevi. Uz te četiri vrste ionizirajućih zraka, u suvremenoj medicini, točnije u onkologiji i radioterapiji, sve se više koriste i protoni, u obliku čestičnog zračenja, koji se ubrzavaju u protonskim akceleratorima u svrhe tretiranja i terapije malignih karcinoma.

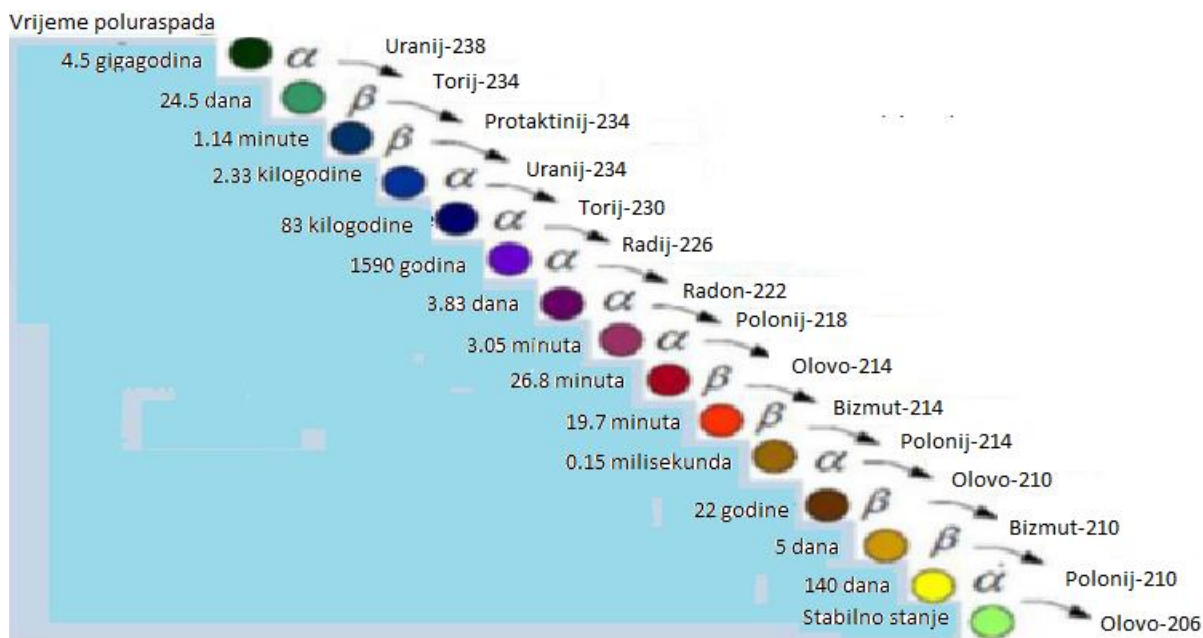
Alfa-zrake nastaju raspadom atomske jezgre koja ima prevelik omjer protona u odnosu na neutrone, oslobađajući alfa-česticu. Oslobodena alfa-čestica sastoji se od dva protona i dva neutrona, odnosno jezgre helija veće brzine gibanja, koja iznosi oko 1/20 brzine svjetlosti. Alfa-čestica je velike mase, a kratkog dometa. Ima veliki ionizacijski koeficijent materije, jedna zraka može proizvesti od 50 000 do 200 000 ionskih parova u nekoliko centimetara dosega. Rijetko se koriste u medicinske svrhe, ali treba biti vrlo oprezan zbog ozbiljnih posljedica u slučaju unosa alfa-emitera u organizam. 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 -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 u vodi. Pozitivan

naboj alfa-čestica može biti koristan u nekim industrijskim procesima. Na primjer, radij-226 koristi se za liječenje karcinoma, dok 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.

Beta-zrake mogu nastati kada jezgra sadrži veći broj neutrona ili protona. U slučaju viška neutrona, raspadom nastaje elektronsko zračenje uz istovremeno nastajanje protona i antineutrina. 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. Nakon izbacivanja beta-čestice, jezgra još uvijek ima višak energije koju otpušta u obliku gama-fotona. Ako jezgra ima višak protona, taj proton spontano prelazi u neutron, uz zračenje pozitrona i neutrina, a također emitira višak energije u obliku gama-fotona. Beta-čestice nemaju mase i imaju brzinu $1/4$ do maksimalne brzine svjetlosti. Ionizacijski koeficijent im je nešto manji od alfa-čestica, no i dalje je jako visok. Prolaskom kroz plin stvaraju 20-400 ionskih parova. Beta-emitere najčešće koristimo u nuklearnoj medicini, tomografiji s pozitronskim zračenjem te tumorskim terapijama. Beta-emiter koji se najviše upotrebljava jest tehnecij-99, koji ima previše neutrona da bi bio stabilan. Ostali značajniji beta-emiteri su: fosfor-32, tricij, ugljik-14, stroncij-90, kobalt-60, jod-129 i 131, cezij-137. Beta-emiteri se često koriste, osobito u medicinskoj dijagnostici i liječenju (fosfor-32 i jod-131), ali i u raznim industrijskim uređajima koji služe za mjerenje debljine vrlo tankih materijala.

Gama-zrake su najprodornije poznate zrake elektromagnetskog spektra s valnom duljinom mjerenom u pikometrima. Nastaju oslobađanjem viška energije uzbuđene jezgre i često su posljedica alfa i beta raspada. Nastali fotoni imaju energiju koja je i do milijun puta veća od fotona vidljive svjetlosti i naziva se gama-foton ili gama-zraka. Broj protona i neutrona ostaje isti, a promijenjena je samo uzbuđena energija jezgre koja se spustila s veće na nižu razinu. Ionizacijski koeficijent je puno manji nego kod prethodna dva zračenja, a najveća predaja energije gama-fotona je na kraju samog dosega. To svojstvo koristimo često u nuklearnoj medicini, iščitavajući vrijednosti nakupljanja pojedinih gama-emitera u određenim

tkivima pomoću gama-kamere. Najkorišteniji emiteri gama-zraka su kobalt-60 (steriliziranje medicinske opreme, pasteriziranje hrane, liječenje karcinoma), cezij-137 (liječenje karcinoma, mjerenje i kontrola toka tekućina u industrijskim procesima, istraživanje podzemnih izvora nafte) i tehnecij-99m (dijagnostička medicina). Gama-zrake koriste se i za poboljšanje fizikalnih svojstava drva i plastike te za ispitivanje metalnih dijelova u industriji.

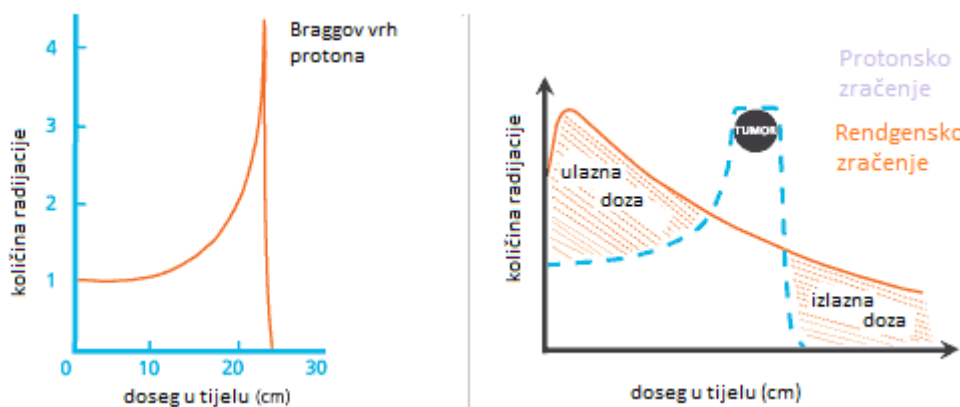


Slika 2.PREUZETO I PREUREĐENO: Fizika zračenja, prof. dr. Darijo Radović – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje, 2014.; Radioaktivni izotopi, vrste zračenja i vrijeme poluraspada

Rendgenske zrake su elektromagnetski valovi, nešto manjih valnih duljina u odnosu na gama-zrake, ali iste brzine – brzine svjetlosti. Nastaju u rendgenskoj cijevi rendgenskog uređaja, ubrzavanjem elektrona s katode na anodu. Rendgenska je cijev najvažniji dio rendgenskog uređaja. Procesom termoionizacije elektroni se s katode ubrzavaju u vakuumskoj cijevi i udaraju u anodu, građenu od legure volframa i renija, koja je na disku građenu od molibdena (ima visoki toplinski kapacitet), i grafita. Naime, kada brzi elektroni udare u žarište anode, 99 % njihove energije pretvara se u toplinu, a samo 1 % ili manje u energiju rendgenskih zraka. Rendgenske zrake se najčešće upotrebljavaju u svrhu dijagnosticiranja različitih patoloških stanja u medicini.

Zračenje **protonima**, teškim česticama, prema sadašnjim je saznanjima boljih karakteristika i mogućnosti iskoristivih u medicinske terapijske svrhe u odnosu na druga zračenja. Prolaskom kroz materiju, na početku svoga puta, gdje ima veliku brzinu, približno

polovicu brzine svjetlosti, jako malo ionizira neutralne ione. Daljnjim prolaskom gubi brzinu te u vrlo kratkom preostalom putu gubi svu svoju energiju i maksimalno interferira s atomima tzv. Braggov vrh (slika 3). Upravo te karakteristike potrebne su u radioterapiji tumora. Ipak, radioterapija protonima koristi se u samo 25 institucija diljem svijeta zbog velike cijene uređaja i njegove fizičke veličine. Znanstvenici su uspjeli napraviti uređaj veličine do pet metara i cijene od oko 30 milijuna dolara.



Slika 3. PREUZETO I PREUREĐENO: www.floridaproton.org; Doseg protonskog zračenja u tijelu bolesnika i usporedba s rendgenskim zračenjem

Ionizacijska zračenja različitih karakteristika mogu prouzročiti somatske i genetske (hereditarne), stohastične i nestohastične posljedice djelujući direktno ili indirektno na stanice ljudskog organizma. Različita radijacijska oštećenja u stanici, uključujući i neke nepopravljene mutacije DNK-a, mogu prouzročiti smrt stanice ili je onesposobiti za razmnožavanje. Smrt stanice može nastupiti kao posljedica nepopravljivih oštećenja većih razmjera kao što je nekroza ili kao „programirano samouništenje“ stanice – apoptoza.³ I mala doza zračenja može uništiti određeni broj stanica, no to uvjetno ne utječe na zdravlje, zahvaljujući brojnosti stanica i procesima njihova nadomještanja i oporavka. Tek veće doze mogu izazvati masovno razaranje stanica, što može biti pogubno za ozračeno tkivo pa i za cijeli organizam. Učinci na zdravlje pri masovnom zračenju stanica velikim dozama nazivaju se determinističkim jer će sigurno nastupiti iznad određenog praga doze, no pri malim se dozama deterministički učinci obično ne opažaju. Iznimno, pri ozračenju embrija u maternici,

³ Apoptoza je aktivacija endogenog genskog programa samouništenja stanice. Aktivni je enzimski proces koji troši energiju. Normalna je pojava u organizmu i nije praćena upalom, ali može nastati i kao posljedica vanjskog utjecaja. Počinje kondenziranjem plazme koja dovodi do fragmentiranja stanice na manje dijelove dok ih fagociti pojedinačno ne unište.

razaranje nekoliko ključnih stanica u vrijeme razvoja organa može izazvati teške kliničke posljedice novorođenčeta. Stoga se učinci ozračenja embrija promatraju kao izdvojena kategorija. Ionizacijska zračenja mogu značajno oštetiti stanice organizma, što ovisi o dijelu tijela koje je izloženo, vrsti izloženih stanica i njihovom staničnom ciklusu, apsorbiranoj dozi, vrsti ionizirajućeg zračenja te brzini kojom je doza primljena.

Genski učinci nastaju kao posljedica oštećenja stanica koje sudjeluju u reprodukciji i naposljetku se prenose na potomstvo. Somatski, pak, učinci pogađaju samu osobu koja je bila izložena zračenju. Nadalje, učinke zračenja dijelimo na stohastične i nestohastične. Stohastični učinci nastaju zbog mutacije stanica. Oni nemaju prag primljene doze, već mogu nastati kao posljedica malih apsorbiranih doza zračenja. Ipak, vjerojatnost njihova pojavljivanja proporcionalna je primljenoj dozi. Za razliku od stohastičnih oštećenja, nestohastična nastaju zbog smrti stanice ili trajnih oštećenja koja posljedično onemogućavaju daljnje normalno dijeljenje i rast stanice. Nastaju tek iznad specifičnog praga apsorbirane doze i ozbiljnost im raste s njezinom količinom. Svi nestohastični učinci ujedno su i somatski.

Najvažniji stohastični učinak ozračenja jest izazivanje malignih oboljenja – karcinogeneza. Obično se dijeli u tri faze: iniciranje raka, promocija i maligna progresija. Pretpostavlja se da zračenje najviše pridonosi fazi iniciranja raka. Karcinogeneza je razmjerna količini primljene doze. Ovisno o lokalizaciji, apsorbiranoj dozi i brojnim drugim čimbenicima, radijacijski se tumori pojavljuju nakon dugogodišnje latencije, u prosjeku nakon 33 godine. Prema proračunima ICRP-a⁴, rizik nastanka radijacijskog karcinoma iznosi 1 novi tumor na 20 000 ozračenih bolesnika dozom od 0.01 Gy. To se odnosi na karcinome probavnog trakta, nadbubrežne žlijezde i nekih parenhimnih organa, dok su karcinomi pluća i dojke još i učestaliji pri tako malim dozama izloženosti.

⁴ ICRP – International Commission on Radiological Protection, neovisna i nevladina organizacija koja pomaže unapređivanju zaštite od zračenja te praćenja bolesti i posljedica prouzročenim ionizirajućim zračenjem.

3. REZULTATI RADA

3.1. IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Izvori ionizirajućeg zračenja mogu biti iz prirode ili mogu biti umjetno stvoreni. Najnovija istraživanja američke populacije pokazuju da prosječan čovjek godišnje primi oko 6.25 Sv, od čega polovicu pretežno iz građevinskog materijala koji sadrži radon, a drugu polovicu ozračenja primi iz umjetnih izvora, što je posljedica sve veće upotrebe dijagnostičkih medicinskih rendgenskih uređaja. Sva ta zračenja na poseban način djeluju na materiju kroz koju prolaze i s kojom interferiraju na različite načine.

3.1.1. PRIRODNI IZVORI

Prirodno pozadinsko ionizirajuće zračenje dolazi iz triju glavnih izvora: kozmičko zračenje, prirodno zračenje radioaktivnih materijala i radon. Kozmičko zračenje dolazi iz svemira i uključuje energetske protone, elektrone i gama-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.

3.1.1.1. KOZMIČKO ZRAČENJE

Postojanje kozmičkog zračenja poznato je od 31. prosinca 1958. godine, kada je prvi svemirski brod upućen sa Zemlje. Uočeno je ogromno zračenje. Poslije toga, mnogi sateliti su oštećeni istim zračenjem. Učinci kozmičkog zračenja vidljivi su i na površini Zemlje. Kozmičko zračenje čini otprilike 13 % od ukupnog prirodnog pozadinskog zračenja. Oko 89 % dolazećih kozmičkih zraka jednostavni su protoni (jezgre vodika), 10 % su jezgre helija (alfa-čestice) i 1 % su teži elementi. Te jezgre vodika i helija čine 99 % kozmičkih zraka. Pojedinačni elektroni (poput beta-čestica) čine ostalih 1 % galaktičkih kozmičkih zraka, zraka koje dolaze izvan Sunčevog sustava. Vrlo malo primarnog kozmičkog zračenja prodre do Zemljine površine. Velika većina reagira sa Zemljinom atmosferom, proizvodeći sekundarno

kozmičko zračenje koje se sastoji od fotona, elektrona, neutrona i gama-zraka koje dolaze do površine Zemlje. Atmosfera i Zemljino magnetno 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. Podrijetlo kozmičkih zraka je različito, jedan dio dolazi od Sunca, kao i od ostalih zvijezda, a drugi dio dolazi iz nepoznatih izvora najudaljenijih dijelova Svemira. Kozmičke zrake imaju energiju veću od 10^{20} eV, puno veću nego što stvara akcelerator čestica (10^{12} do 10^{13} eV). Može se zaključiti da godišnja doza apsorbiranog kozmičkog zračenja ovisi o nadmorskoj visini. U Sjedinjenim Američkim Državama osoba će u prosjeku primiti dozu od 2.7 mSv godišnje, a taj iznos se otprilike udvostručuje sa svakih 2000 metara nadmorske visine. Putovanje avionom može povećati godišnju dozu kozmičkog zračenja, ovisno o učestalosti letenja, visini leta i vremenu provedenom u zraku.

3.1.1.2. PRIRODNO ZRAČENJE RADIOAKTIVNIH MATERIJALA

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

3.1.1.3. 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 postoji u obliku različitih izotopa: Rn-222 (vrijeme poluraspada 3,82 dana) je produkt raspada radija (Ra-226) koji potječe od urana (U-238). Velike količine doze zračenja ne dolaze od samog radona, nego od njegovih produkata koji emitiraju alfa-čestice, polonija (Po-218, vrijeme poluraspada 3 min, 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 od oštećenja 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, 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 %) jesu emisije iz stijena 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 kojega 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 njegova 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 otvorenome.

3.1.2. UMJETNI IZVORI

Umjetni su izvori po svojim karakteristikama i učinku gotovo identični prirodnim izvorima. Ionizirajuće zračenje sve se više koristi u medicini, stomatologiji i u industriji. Glavni korisnici umjetnog ionizirajućeg zračenja su medicinske i farmaceutske ustanove, ustanove za istraživanje i učenje, nuklearni reaktori i njihove pomoćne ustanove. Mnoge od ovih ustanova stvaraju radioaktivni otpad i neke otpuštaju nekontrolirane količine zračenja u prirodu. Radioaktivni materijali također se koriste i u raznim potrošačkim proizvodima kao što su duhan, građevinski materijali, televizori, rendgenski sistemi na aerodromima, detektori dima, elektronske cijevi, radioaktivni gromobrani itd. Neki umjetni izvori zračenja utječu na čovjeka kroz direktno zračenje, dok drugi poprimaju oblik radijacijskog trovanja i ozračuju čovjeka iznutra preko posrednika. Najznačajniji izvori umjetnog zračenja kojima su ljudi

izloženi dolaze iz medicinskih procedura, kao što su dijagnostičke rendgenske zrake, nuklearna medicina i terapija zračenjem. Glavni radionuklidi koji se koriste u medicini su jod-131, tehnecij-99m, kobalt-60, iridij-192 i cezij-137. Oni se rijetko ispuštaju u okolinu. U manjem stupnju ljudi su izloženi i zračenju koje potječe iz ciklusa nuklearnog goriva, što 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 prouzročile najveći broj žrtava. Prema izračunima znanstvenika, neposredno niz vjetar od mete, doza zračenja bi premašivala 30 Gy na sat što bi dovelo do katastrofalnih posljedica jer je dokazano da je 4,5 Gy (tisuću puta više od pozadinskog zračenja) smrtonosno za polovicu normalne populacije. Nije dokumentirano da je itko preživio dozu veću od 6 Gy.

Zabrinjavajuće su činjenice provedenih rezultata Kliničkog bolničkog centra Split, koje pokazuju količinu primljene doze prilikom različitih dijagnostičkih i intervencijskih radioloških metoda snimanja. Uzimajući u obzir te rezultate, možemo vidjeti da su primljene doze prilikom određenih pretraga ozbiljno visoke s obzirom na moguće izazivanje bioloških oštećenja bolesnika, a daje se naslutiti da se ne uzima u obzir maksimalna opravdanost pretrage u odnosu na moguće posljedice zračenja. Tijekom istraživanja, bilježili su se dob pacijenta, tjelesna težina, spol, visina, ozračena površina bolesnika, a izračunavao se DAP – umnožak predane doze zračenja i ozračene površine izražene u $\text{mGy} \cdot \text{m}^2$. Najveće primljene doze očitale su se u dijaskopskim pretragama. Tako su prilikom intravenozne urografije rezultati DAP-a iznosili i do $4000 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2$, prilikom pasaže gastroduodenuma $2000 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2$, kod koronarografije i irigografije čak i do $6000 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2$. Kod intervencijske radiologije, odnosno koronarne angioplastike, vrijednosti DAP-a su dosežale i do $10\,000 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2$, a mjerena je i apsorbirana doza na površini kože koja je iznosila i do 2 Gy. Kod radiografskih snimaka DPA se kreće između 10 do $60 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2$. Također su se mjerila zračenja prilikom dijagnostike CT-uređajem. Rezultati su pokazali da se u prosjeku po 1 cm preda oko 200 mGy zračenja.

3.2. INTERAKCIJA RENDGENSKIH ZRAKA S MATERIJOM

Osnovna, neutralna i najmanja jedinica građe ljudskog organizma je atom. Udruženja atoma čine molekulu, a skupovi molekula izgrađuju stanicu. Stanice zajedno grade različita tkiva koja se umnožavaju i oblikuju organe koji tvore organski sustav i na kraju organizam. Ljudsko je tijelo građeno od različitih vrsta tkiva – hrskavičnog, pokrovnog, mišićnog, živčanog i koštanog tkiva. Zračenje djeluje različito na pojedine vrste tkiva. Reproductivni i probavni sustav najviše bivaju oštećeni od zračenja, dok su koštani, mišićni i krvožilni sustavi manje osjetljivi na učinke zračenja. Kako je riječ o djelovanju zračenja na atomske strukture tijela, važno je spomenuti građu atoma.

Atom je u osnovi građen od elektronskog omotača i jezgre. Elektronski omotač sastavljen je od energetske nivoa (atomske ljuske) koje popunjavaju elektroni koji su negativnog naboja. Elektroni u atomu najprije popunjavaju orbitale najmanje energije, a to su one bliže jezgri. Ako su, pak, popunjena sva niža stanja, kaže se da je atom u osnovnom ili stabilnom energijskom stanju. Ako je energija atoma veća od osnovne, tada se govori o pobuđenom ili ekscitiranom stanju. To znači da su u strukturi atomskog elektronskog omotača niža energetska stanja nepopunjena, dok se određeni elektroni nalaze u ljuskama veće energije. Atom se, naime, spontano vraća u osnovno stanje emisijom energije, a elektron popunjava slobodno mjesto u nižoj energetskoj ljusci. Proces pobuđivanja atoma naziva se apsorpcija, a proces relaksacije atoma jest emisija energije. Električni neutralan atom postaje ion ako elektron napusti elektronski omotač ili ako omotač primi elektron. Jezgru grade tzv. nukleoni, sastavljeni od protona i neutrona. Protoni su pozitivnog naboja, a neutroni su neutralnog naboja. Današnja istraživanja ukazuju da su i protoni, neutroni i elektroni građeni od još manjih čestica – kvarkova i leptoni. Kvarkovi su pozitivnog naboja, dok leptoni mogu biti negativnog ili neutralnog naboja. Kod atoma, energija potrebna za pobuđenje elektrona na više energijsko stanje kreće se od nekoliko eV do oko tisuću eV. Za pobuđenje nukleona u jezgri tipična je vrijednost od oko jednog MeV, dok kod pobuđenja kvarkova u protona to iznosi oko 300 MeV. Masa elektrona je oko 2000 puta manja od mase protona, a mase protona i neutrona približno su jednake. Atom ima promjer radijusa približno 10^{-10} m, dok mu je promjer jezgre oko 10^{-15} m. Masa jezgre atoma iznosi oko 99,9 % mase cjelokupnog atoma. Za jezgru su usko vezani pojmovi atomski broj Z , koji označava ukupan broj elektrona ili protona u atomu, te maseni broj koji označava ukupan broj nukleona u jezgri ($A = Z + N$). Što se tiče jezgre, nukleoni imaju gotovo jednaku masu te jednaku vrijednost unutrašnjeg momenta količine gibanja tj. spina. Energija vezanja jezgre jest energija koja drži nukleone na

okupu. Atomi i njihove jezgre ne moraju uvijek biti u osnovnom stanju ni povezani u molekule, stoga razlikujemo izotope, izobare i izomere. **Izotopi** su atomi čija jezgra sadrži isti broj protona, ali različit broj neutrona. Izotopi se međusobno razlikuju po masi, a kemijska su im svojstva identična. **Izobari** su izotopi različitih elemenata s jednakim masenim brojevima (npr. ^{54}Cr i ^{54}Fe , ^{112}Cd i ^{112}Sn). **Izomeri** su spojevi koji imaju istu empirijsku formulu, ali se razlikuju po prirodi ili slijedu vezivanja atoma ili po rasporedu atoma u prostoru. Kao primjer možemo uzeti dimetileter (CH_3OCH_3) i etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), strukturne izomere opće formule $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$.

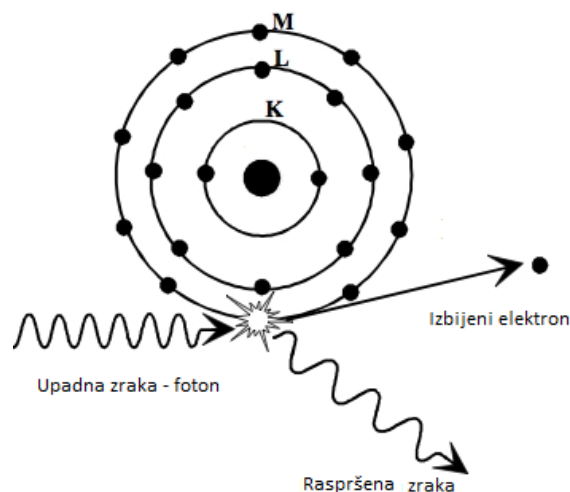
3.2.1. EFEKTI MEĐUDJELOVANJA IONIZIRAJUĆIH ZRAKA S MATERIJOM

Prolaskom zračenja kroz materiju dolazi do ionizacije, pri čemu se energija zračenja najčešće prenosi na elektrone u atomima materije. Prolaskom kroz materiju zračenje slabi dok ne nestane ili mu prodorna moć potpuno oslabi do mjere nedokazane štetnosti. Zračenjem tijela bolesnika najčešće dolazi do triju različitih efekata međudjelovanja ionizirajućih zraka s materijom. To su Comptonov rasap, prava apsorpcija i proces stvaranja parova.

3.2.1.1. COMPTONOV RASAP

Arthur H. Compton je 1923. rendgenskim zrakama, točno određene valne duljine, gađao metu građenu od grafita. Rendgenske zrake su se na meti raspršivale. Compton je mjerio valnu duljinu raspršenih zraka u ovisnosti o kutu pod kojim su se raspršile. Pod kutom od nula stupnjeva raspršena zraka je imala jednaku valnu duljinu kao i upadna zraka. Što je bio veći kut izlaska raspršene zrake u odnosu na početnu ulaznu rendgensku zraku, to je bila veća valna duljina raspršene zrake. Taj efekt je potom primijetio i pri testovima s drugim materijalima, a ne samo s grafitom.

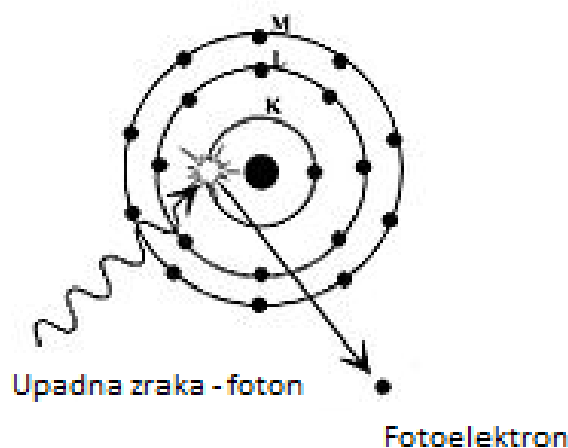
Prilikom Comptonovog rasapa, rendgenska se zraka sudara s jednim od elektrona te ga izbija, a zraka se odbija pod određenim kutom (slika 4). Ta raspršena zraka je manje energije, odnosno veće valne dužine, naspram upadne zrake. Comptonov rasap je česta pojava u terapijskoj radiologiji.



Slika 4. PREUZETO I PREUREĐENO: en.wikibooks.org; Comptonov efekt

3.2.1.2. PRAVA APSORPCIJA ILI FOTOELEKTRIČNI EFEKT

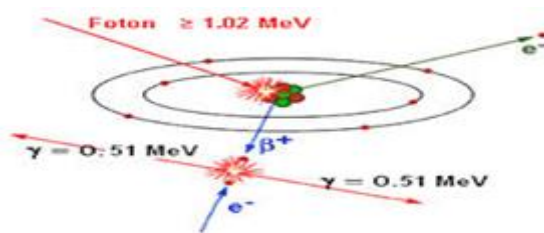
Ova pojava nastaje kada rendgenska zraka prilikom sudara izbaci jedan elektron iz elektronskog omotača i pritom se jedan dio energije upadne zrake utroši na otcjepljenje tog elektrona, a drugi dio energije se pretvara u kinetičku energiju fotoelektrona (slika 5). Fotoelektron dalje na svom putu interferira s drugim elektronima dok potpuno ne izgubi energiju. Ova vrsta rasapa je dominantna u rendgenskoj dijagnostici, pogotovo kod primjene mekih rendgenskih zraka (energije do 12 keV).



Slika 5. PREUZETO I PREUREĐENO: en.wikibooks.org; Fotoelektrični efekt

3.2.1.3. PROCES STVARANJA PAROVA

Proces stvaranja parova moguć je jedino kada je energija upadnog fotona jednaka ili veća od 1,02 MeV. Proces se događa interakcijom upadnog fotona u Columbovom polju jezgre gdje foton nestaje, a stvaraju se elektron i pozitron. Nakon vrlo kratkog vremena, nastali se pozitron spaja s nekim od elektrona iz okoline i pritom nestaju obje čestice, a nastaju dva fotona suprotnih smjerova gibanja (slika 6).



Slika 6. PREUZETO: www.galenotech.org; Proces stvaranja parova

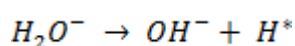
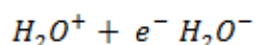
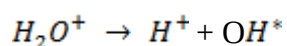
3.3. NAČINI DJELOVANJA IONIZIRAJUĆIH ZRAKA NA ORGANIZAM

Opisani efekti djeluju na određene molekule i ostavljaju biološke učinke. Mogu djelovati direktno i indirektno na organizam, izmjenjujući prirodne biokemijske reakcije usmjeravajući ih u nepoželjnom smjeru. Najčešće neželjene posljedice ionizirajućeg zračenja nastaju indirektnim djelovanjem zračenja na cijeli organizam putem molekula vode.

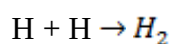
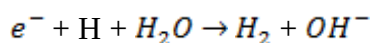
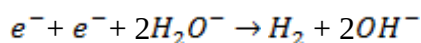
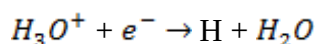
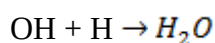
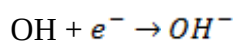
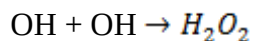
3.3.1. INDIREKTNO DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ORGANIZAM

Djelovanjem energije zračenja na molekulu vode nastaju metabolička oštećenja organizma kao posljedica raspada vode na slobodne radikale – radioliza. U vodi ionizirajuće zračenje proizvodi u velikoj mjeri sekundarne elektrone čija energija iznosi od 10 do 70 eV. Oni se usporavaju vrlo brzo, predajući energiju molekulama vode čime ih ioniziraju sve dok im energija ne padne na razinu energije ekscitacije tekuće vode koja iznosi manje od 7,4 eV. Energija zračenja izbacuje iz molekule vode jedan elektron pri čemu molekula postaje električni kation, a samim time i vrlo nestabilna. Nastali se kation veže u različitim kemijskim

reakcijama, a oslobođeni radikal, zbog velike kemijske reaktivnosti, ne može opstati da ne uđe u međudjelovanje s drugim molekulama. Oslobođeni elektron se kreće među molekulama i, u trenutku kada izgubi dio kinetičke energije, veže se za molekulu vode. Čini je nestabilnom zbog čega se molekula raspada. U toj reakciji nastaje OH-ion koji će se vezati u metaboličkim reakcijama. Osim njega, nastaje i slobodni vodikov atom kao radikal koji se odmah veže za okolne molekule te uzrokuje poremećaje raznih metaboličkih reakcija. Sva ta međudjelovanja događaju se unutar $10^{-6}s$. Daljnja shema prikazuje najčešći primjer događanja ozračene molekule vode:



Također, može doći i do mnogih drugih reakcija i nastanka različitih produkata:



Poremećaji prouzročeni radiolizom vode ovise o vrsti i količini slobodnih radikala, ali i o molekulama za koji se slobodni radikal veže. Istraživanja na virusima pokazuju da je za oštećenje jedne makromolekule tijela potrebno 1000 slobodnih radikala.

Indirektno djelovanje ionizirajućeg zračenja puno je češće u odnosu na direktno djelovanje ionizirajućeg zračenja, samim time što je ljudski organizam građen od 80 % vode.

3.3.2. DIREKTNO DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA ORGANIZAM

Suprotno indirektnim oštećenjima organizma putem molekula vode, oštećenja mogu nastati i direktnim djelovanjem zračenja na ostale stanice organizma, a pogotovo na DNK-molekule (slika 7). Najvažnije su organske makromolekule deoksiribonukleinske kiseline (DNK) i ribonukleinske kiseline (RNK). One su važne za obnavljanje svih vrsta stanica živog organizma i prenose informaciju za sintezu istovrsnih proteina u novim stanicama. Proteini predstavljaju regulatorne sisteme brojnih kemijskih reakcija bez kojih nije moguć normalan život i razvoj stanica. Nukleinske kiseline u kromosomima spolnih stanica odgovorne su za normalnu građu, ne samo pojedinih stanica, već i cijelog novog organizma. Oštećenja DNK-a i RNK-a mogu imati vrlo teške posljedice kao što su poremećaji funkcije stanice, ali i smrt same stanice, kao i cijelog organizma. Za razumijevanje oštećenja i neželjene učinke zračenja, potrebno je znati strukturu DNK i RNK molekule.

DNK se sastoji od dvaju spiralnih, dugačkih lanaca, izgrađenih od molekula deoksiriboze povezane fosfornim vezama i dušičnim bazama. Postoje dvije skupine takvih baza, purinske i pirimidinske. Purinsku bazu čine adenin i guanin, a pirimidinsku timin i citozin. U poprečnom povezivanju spaja se purinska baza jednog lanca s pirimidinskom bazom drugog lanca i to tako da se adenin spaja s timinom, a citozin s guaninom.

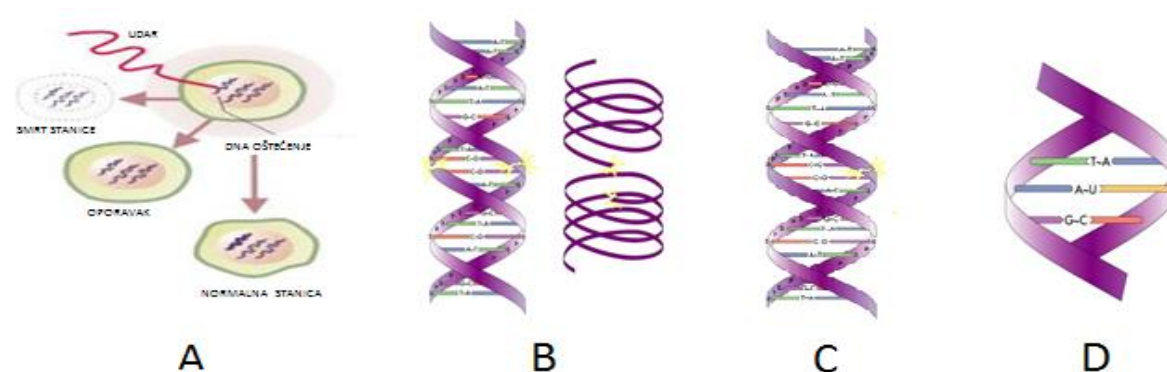
Svojstvo molekule DNK jest reduplikacija kojom se stvaraju novi jednaki lanci. Molekule DNK nalaze se u jezgri stanice i čine osnovni sastavni dio gena. One prenose šifru ili genetski kod preko posrednika RNK-a. RNK ima jedan spiralni lanac i postranične baze slično kao DNK, samo što umjesto timina ima bazu uracila. RNK je stvoren u jezgri iz koje odlazi u citoplazmu i u njoj regulira sintezu proteina.

Procesi sinteze DNK i RNK te stvaranje proteina mogu biti poremećeni zračenjem. Postoji više načina kojima zračenje oštećuje ove procese, a zajedničko im je to da narušavaju redoslijed purinskih i pirimidinskih baza u molekulama DNK i RNK ili prekidaju prenošenje informacija o redoslijedima baza što teško narušava normalnu sintezu proteina. Time je poremećena genetska šifra, što rezultira sintezom patoloških proteina ili gubitkom svojstava reduplikacije molekule DNK. Na taj način organizmu nedostaju neke molekule proteina što može voditi letalnom ishodu.

Načini oštećenja zračenjem DNK i RNK molekula su:

- Vezanje radikala na baze, oštećenja nisu značajna
- Nedostatak purinske baze izbačene zračenjem, reduplikacijom oštećene molekule mijenja se genetski kod
- Hidriranje baze, npr. timin se mijenja u citozin pa se mijenja genetski kod
- Prekid lanaca, jednostruki ili dvostruki prekid, jednostruki se oporavlja, a dvostruki dovodi do smrti stanice
- Dimerizacija odnosno međusobno spajanje baza istog lanca, poremećaj u reduplikaciji molekule DNK
- Povezivanje istovrsnih baza iste molekule što je u normalnim uvjetima nemoguće npr. adenin s adeninom. Ima za posljedicu nemogućnost normalne reduplikacije DNK-a ili poremećaj u prenošenju genetskog koda na RNK.

Zračenje može oštetiti i manje molekule, no takva oštećenja nisu toliko opasna. Može utjecati na proteine, otkidajući njihove postranične lance, osobitno one koji su vezani slabijim vodikovim vezama, ali osnovni proteinski lanac često ostaje nepromijenjen. Molekule ugljikohidrata također mogu biti oštećene zračenjem, ali takvi procesi nastaju isključivo kod velikih doza zračenja. Oštećenja lipida nastaju posrednim djelovanjem slobodnih radikala.



Slika 7. PREUZETO I PREUREĐENO: Biološki učinci i frakcioniranje radioterapije, prof. dr. sc. Marijo Boban – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje 2014.; A) Mogući ishodi ozračenja DNK-molekule B) Dvostruki lom DNK-lanca C) Jednostruki lom DNK-lanca D) Izmjena baza DNK-lanca

3.4. ČIMBENICI O KOJIMA NAJVIŠE OVISI BIOLOŠKI UČINAK IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

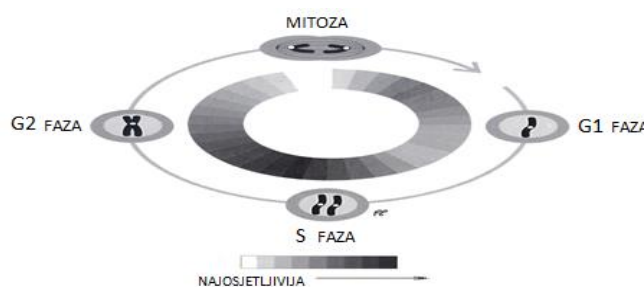
Biološki utjecaj ionizirajućeg zračenja ovisi o mnogobrojnim čimbenicima, a najviše o dijelu tijela koje je izloženo zračenju, vrsti izloženih stanica i njihovom staničnom ciklusu,

apsorbiranoj dozi, vrsti ionizirajućeg zračenja te brzini kojom je doza primljena. Treba imati na umu da svi ovi čimbenici koji utječu na biološki učinak zračenja variraju individualno, ovisno o osjetljivosti osobe na zračenje, a podaci rezultata istraživanja ukazuju na posljedice i učinke zračenja na većinu pacijenata.

3.4.1. IZLOŽENOST STANICA I STANIČNI CIKLUS

Posljedice za stanicu mogu biti letalne ili pak mogu oštetiti jednu ili više njezinih funkcija. Najraniji poremećaj diobe u izravnoj je vezi sa ciklusom sinteze nukleinskih kiselina (slika 8). Ti složeni procesi sinteze zbivaju se u interfazi, razdoblju stanične aktivnosti te između dviju dioba. Dioba stanice odvija se u četiri podfaze: profaza, metafaza, anafaza i telofaza.

Razdoblje interfaze dijelimo na tri dijela. Najdulje razdoblje staničnog ciklusa jest ono u kojem nema diobe DNK-a, a naziva se fazom G1. U toj fazi diobe stanica je najmanje osjetljiva na radijaciju. Zatim počinje intenzivna reduplikacija molekula DNK-a u tzv. S-periodu interfaze, nakon čega slijedi faza G2 u kojoj sinteza prestaje, ali je masa DNK-a dvostruko veća nego u fazi G1. Nakon interfaze, slijede složeni procesi diobe kromosoma i najveća osjetljivost na zračenje – mitozu. Manje doze zračenja mogu usporiti ili odgoditi proces diobe dok ga veće doze u potpunosti zaustavljaju. Oba slučaja dovode do oštećenja stanica.



Slika 8. PREUZETO I PREUREĐENO: Biološki učinci i frakcioniranje radioterapije, prof. dr. sc. Marijo Boban – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje 2014.; Stanični ciklus i osjetljivost na zračenje

Mikroskopskom analizom mogu se utvrditi patološke promjene prouzročene zračenjem na staničnoj membrani, citoplazmi i u staničnoj jezgri ozračenih stanica. Stanična se membrana pod djelovanjem radijacijskog zračenja rasteže te postaje propusnija za pojedine kemijske spojeve, a prilikom većih doza može doći do potpunog rastezanja i puknuća. U

citoplazmi, kao posljedica zračenja, nastaju raznolika oštećenja, od pojavljivanja novonastalih vakuola do oštećenja mitohondrija kao i različitih staničnih organela. Najteža posljedica tih citoplazmatskih promjena jest poremećaj sinteze staničnih proteina. U staničnoj jezgri nastaju najuočljivije promjene, promjene na DNK-molekulama.

Različite će stanice izdržati različite doze zračenja. Općenito vrijedi pravilo da su radiosenzibilnije one koje se intenzivno dijele ili imaju intenzivniji metabolizam na što direktno utječe količina DNK-molekula u stanici. Nediferencirane stanice su također osjetljivije. Ta dva svojstva stanica opisuje Bergonie-Tribondeauov zakon koji nam omogućuje bolje planiranje primjene radijacijskih terapija u onkoloških pacijenata.

3.4.1.1. BIOLOŠKI UČINCI PRILIKOM RADIOTERAPIJE

Planiranje dužine trajanja ozračivanja, brzine primanja, odnosno brojnosti frakcija izlaganja točno određenim količinama doza u radioterapiji ovisi o tzv. 4R radioterapije. Unutar toga spadaju četiri različita fenomena stanica.

Popravak ili „repair“ jest sposobnost stanice da se oporavi nakon oštećenja. Oporavak stanica nastupa kao posljedica subletalnih i potencijalno letalnih oštećenja DNK-molekule prilikom ionizirajućeg ozračivanja.

Repopulacija stanica je sposobnost stanica da se u posebnim uvjetima ubrzano razmnožavaju. Proces repopulacije odvija se između dviju frakcija zračenja. Kao posljedica uništavanja stanica organizma zračenjem dolazi do povećanog dotoka kisika i hranjivih tvari što omogućuje stanicama da se počmu ubrzano dijeliti.

Redistribucija stanica nastaje kao posljedica pomaka stanica unutar staničnog ciklusa na mjesto ciklusa gdje su stanice najosjetljivije na zračenje, kada ih najlakše uništavamo. Osoba koja planira radioterapiju (fizičar uz nadzor doktora) treba pratiti stadij staničnog ciklusa kako bi radioterapija bila što učinkovitija u odstranjivanju stanica tumora, odnosno manje štetna za zdrave stanice i tkivo.

Zadnji fenomen zbivanja unutar stanica naziva se reoksigenacija, a javlja se tijekom ponavljanih frakcija zračenja, što omogućava smanjenje ukupnog volumena tumora, smanjenje intersticijskog tlaka te bolju difuziju kisika.

Oštećenja pri radioterapiji malignoma najranije će se primijetiti na radiosenzibilnim tkivima. To se prvenstveno odnosi na tumorske stanice, ali također će se oštetiti i radiosenzibilne stanice okolnih zdravih tkiva. Stanice ljudskog tijela koje su najosjetljivije na zračenje jesu stanice koštane srži jer se one vrlo brzo i često dijele. Također, spolne stanice se brzo dijele, brzo rastu te su niskog stupnja diferencijacije. Već kod prvih primjena radijacije u terapijske svrhe na čovjeka, primijećeno je smanjenje fertilnosti ili čak potpuna sterilnost. Ipak, kod primjena malih doza spermatogeneza se prekida privremeno. Najosjetljivije spolne stanice su spermatogoniji, koji već pri izlaganju dozama od 0,5 Gy prekidaju daljnji razvoj u spermije. Nakon izlaganja dozama od 5 do 6 Gy, sterilnost većinom ostaje trajno. Zreli su spermiji znatno otporniji od spermatogonija, ali radijacijske promjene na njihovim kromosomima mogu prouzročiti genska oštećenja potomaka. Što se pak tiče ženskog spolnog sustava, jajna stanica različito je osjetljiva na zračenje, ovisno o fazi dozrijevanja. Nezreli folikul je manje osjetljiv od folikula u razvoju. Doze manje od 2 Gy izazivat će prolaznu sterilnost, a trajna će nastupiti pri dozama većima od 3 Gy. Kod velikih primljenih doza svi folikuli u jajniku budu trajno uništeni.

Prilikom radioterapije, mogu se zabilježiti akutna, subakutna i kronična oštećenja. Akutnima se smatraju nastala unutar 1. mjeseca od početka radioterapije, subakutnima nastala od 1. do 3. mjeseca, te kronična ili kasna oštećenja koja se manifestiraju nakon 6. mjeseca od početka radioterapije.

Središnji živčani sustav, iznimno leđna moždina, jako je osjetljiv na zračenje. Iradijacija tih područja mora biti iznimno dobro organizirana i napravljena u što više frakcija. Leđna moždina i mozak ne smiju primiti više od 50 Gy.

U usnoj šupljini prilikom ozračivanja mogu se javiti različiti oblici oštećenja tkiva i sluznica na zračenje (slika 9). *Xerostomija* je oštećenje žlijezda slinovnica kojima je funkcija proizvodnja sline koja vlaži usnu šupljinu, pridonosi očuvanju mineralne strukture zuba, sudjeluje u obrani sluznice od infekcija te je važna u osjetu okusa. Simptomi su otežano gutanje, osjećaj pečenja, infekcije sluznice usne šupljine, nastanak karijesa, poremećen osjet okusa i otežan govor. *Osteoradionekroza*, ishemična nekroza kosti prouzročena zračenjem, najozbiljnija je komplikacija radioterapije. Javlja se u 8,2 % pacijenata ozračenih u području glave i vrata. Djelovanjem zračenja nakupljaju se slobodni radikali i oštećuju endotelne stanice unutar ozračenog polja što postupno dovodi do zatvaranja malih krvnih žila. S vremenom dolazi do hipovaskularizacije i hipoksije tkiva, smanjuje se broj koštanih stanica i

nastaje progresivna fibroza kosti. Remodelacija kosti je izmijenjena jer su osteoblasti radiosenzitivniji od osteoklasta te dolazi do brže osteolize.



A

B

C

Slika 9. PREUZETO: Liječenje neželjenih posljedica specifične onkološke terapije, prof. dr. sc. Marijo Boban – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje 2014.; A) kserostomija B) osteoradionekroza C) mukozitis prouzročeni radioterapijom

Prilikom zračenja prsišta mogu nastati akutne komplikacije. To su većinom radijacijski pneumonitis koji se obično javlja unutar mjesec dana od završene radioterapije, kašalj, ružičasti ispljuvak, pleuritis, ezofagitis koji se očituje otežanim gutanjem najčešće 10-12 dana nakon početka radioterapije. Oštećenje srca obično se javlja od 6 mjeseci do godine dana od radioterapije. Kronične komplikacije zračenja prsišta su plućna fibroza, smanjenje vitalnog kapaciteta, intolerancija napora te oštećenja srca. Akutno oštećenje je perikardijalni izljev, a koronarna bolest srca javlja se kao kronična posljedica. Može doći i do kardiomiopatije. Prilikom oštećenja srca bolesnik može imati subjektivne smetnje u obliku angine pektoris, dispneje, edema potkoljenica, ali i objektivne smetnje poput kardiomegalije, srčane aritmije, kongestivnog srčanog zatajenja, ishemije i drugih.

Prilikom zračenja trbuha može nastati akutni radijacijski gastroenteritis i proktokolitis. Prezentiraju se bolovima u epigastriju, mučninom, proljevom, grčevima u trbuhu, rjeđe povraćanjem i krvarenjem. Simptomi najčešće nastaju 4. tjedna od početka radioterapije.

Na koži su moguća različita radijacijska oštećenja koja obično kroz daljnje izlaganje zračenju progradiraju (slika 10). Akutni dermatitis javlja se unutar prvog dana nakon početka radioterapije nakon primljene doze veće od 300 cGy. Očituje se u vidu pigmentacije kože jer radioterapija potiče produkciju melanina, suhe deskvamacije zbog smanjenja mitotske

aktivnosti germinativnog sloja kože⁵, vlažne deskvamacije jer dolazi do uništenja svih stanica germinativnog sloja, a nove se ne stvaraju zbog curenja seruma. Također nastupa epilacija koja se javlja oko 3. tjedna radioterapije. Može doći i do kasnih kožnih oštećenja krvožilnog i vezivnog tkiva dermisa – teleangiektazije (proširenje kapilara, venula ili arteriola) postiradijacijske fibroze (nastanka gustog vezivnog tkiva) te nekroze (smrti stanice).



Slika 10. PREUZETO: Liječenje neželjenih posljedica specifične onkološke terapije, prof. dr. sc. Marijo Boban – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje 2014.; Utjecaj zračenja na kožu

3.4.2. APSORBIRANA DOZA

Velikim dijelom biološki efekti zračenja ovise o primljenoj apsorbiranoj dozi tj. o količini energije zračenja koja je apsorbirana u jedinici mase tijela. Jedinica za apsorbiranu dozu jest grej (Gy). Doza zračenja iznosi 1 grej ako energija apsorbirana u 1 kg materije ili tkiva iznosi 1 joul.

Ozrači li se cijelo tijelo u kratkom vremenskom intervalu dozom od 0,25 Gy, može doći do kasnih posljedica zračenja, ali ne i akutnih. Jednokratna doza od 0,25 do 0,75 Gy na cijelo tijelo prouzročit će depresiju koštane srži u početku bez uočljivih simptoma radijacijskog oštećenja. Doza od 0,75 Gy naziva se kritičnom jer iznad nje nastaje bolest zračenja s očiglednim simptomima. Pri ozračenju dozom od 1 Gy na cijelo tijelo, bolest zračenja javlja se u svih izloženih bolesnika. Kod te doze pojavljuju se i prvi smrtni slučajevi, oko 1 %. Nakon doze od 2 Gy na cijelo tijelo, letalnost je oko 5 %, a kod primljenih doza od 4 Gy mortalitet je oko 50 % ozračenih bolesnika. Doza od 6 Gy rezultira sigurnom smrću, osim u slučajevima posebnog liječenja. Pri dozama od 8 Gy smatra se da je smrtnost 100 % i usprkos liječenju. Biološki efekti zračenja ovise i o trajanju i učestalosti ozračivanja, te o raspodjeli

⁵ Germinativni sloj kože je donji dio epidermisa, površinskog sloja kože. U njemu se nalaze žive stanice koje se stalno razmnožavaju i obnavljaju epidermis.

doze po tijelu. Simptomi bolesti zračenja nastaju kao posljedica oštećenja tkiva najosjetljivijih na zračenje. To su koštana srž, epitelne stanice probavnog trakta i respiratornog sustava, stanice endotela, žlijezde s unutarnjim lučenjem te stanice središnjeg živčanog sustava. Prvo razdoblje nakon ozračenja karakteriziraju nespecifični simptomi kao što su glavobolja, malaksalost, mučnina, povraćanje, povišena tjelesna temperatura i opća uznemirenost bolesnika. Nakon toga nastupa latencija simptoma i to vrijeme nazivamo drugom fazom. Ta faza može trajati različito dugo, što obično ovisi o količini primljene doze. Nakon vremena latencije, prvotni se simptomi pogoršavaju tijekom treće faze. Dolazi do pojave krvavih proljeva, petehijalnih krvarenja po koži (ispucane kapilare u vidu točkica po koži), krvarenja iz probavnog i respiratornog trakta. Sva su ta krvarenja posljedica oštećenja koštane srži uslijed koje dolazi do trombopenije. Također zbog manjka leukocita, pojavljuju se teške gnojne infekcije kao što su angina, pneumonije, apscesi i sepsa. Mogu se pojaviti i proljevi s dehidracijama zbog osjetljive sluznice probavnog trakta. Svi ovi simptomi mogu dovesti i do smrti ozračenoga.

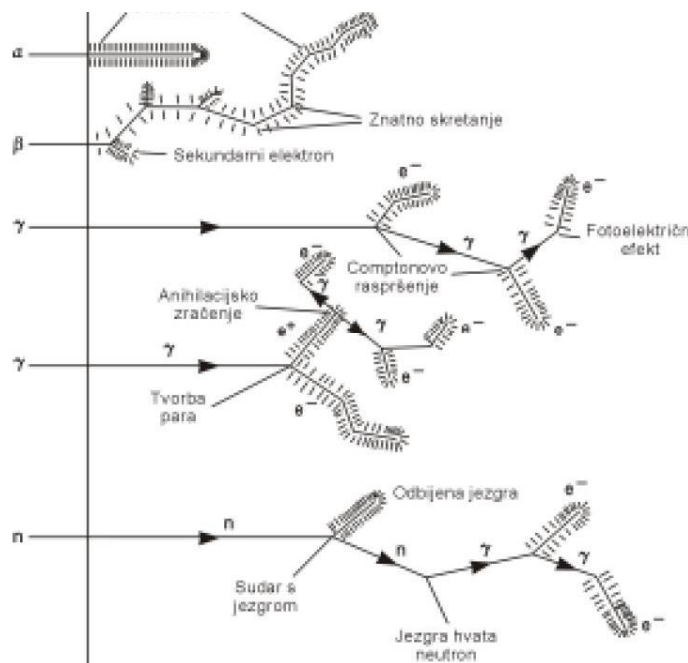
Određena istraživanja ukazuju na povezanost simptoma s količinama primljenih doza. Nakon primljenih nekoliko desetina do 1 Gy na cijelo tijelo, prva faza bolesti traje samo 1 do 2 dana, dok je razdoblje latencije nešto dulje. Treća faza je blaga i prolazi nakon nekoliko dana s proljevima i manjim krvarenjima. Nakon doze od nekoliko greja na cijelo tijelo, prva faza radijacijske bolesti počinje unutar nekoliko sati, latencija nastupa nakon 3 do 5 dana i traje 7 do 10 dana. Potom se prvotni simptomi pogoršavaju, dolazi do oštećenja probavnog trakta i koštane srži. U slučajevima primljenih doza iznad 10 Gy faze su bitno skraćene i smrtonosne.

3.4.3. KVALITETA I VRSTA SNOPA ZRAČENJA

Gotovo istih vrijednosti kao grej, imamo i ekvivalentnu odnosno efektivnu dozu izraženu u sievertima (Sv), koja uz apsorbirano zračenje uračunava i kvalitetu spektra ionizirajućeg zračenja, odnosno i vrstu ozračenog tkiva. U medicini su također zastupljeni opisi ionizirajućeg snopa pomoću LET-a i RBE-a (slika 11).

LET (eng. linear energy transfer) opisuje količinu energije predane molekulama po prijađenom putu materije. Što je LET veći, to će se snop zračenja brže atenuirati u tijelu, ali i napraviti više štete u ozračenju materiji po prijađenom putu.

RBE (eng. relative biological effectiveness) predstavlja usporedbu različitih vrsta zračenja iste doze u djelovanju na materiju. Ovisnost bioloških efekata zračenja o vrsti zračenja karakterizira se faktorom kvalitete zračenja Q . Uz apsorbiranu dozu i faktor kvalitete zračenja, u izračun još uračunava i mjesto izvora zračenja i vrstu materije koja je ozračena, stoga su donesene standardizirane vrijednosti za pojedino zračenje. Što se tiče medicinski korištenih zraka, vrijednost je ista za beta, gama i rendgenske zrake i iznosi 1, za protone 10, dok alfa-zračenje ima faktor kvalitete zračenja 20. Q je sastavni dio sieverta.



Slika 11. PREUZETO I PREUREĐENO: Fizika zračenja, prof. dr. Dario Radović – powerpoint prezentacija, Odjel zdravstvenih studija Split – predavanje 2014.; Prikaz ionizacije i međudjelovanja s materijom pojedine vrste zračenja

3.4.4. BRZINA PRIMLJENE DOZE

Vrijeme i brzina primitka doze bitno utječe na posljedice oštećenja stanica i cijelog organizma. Ovaj je čimbenik izrazito bitan kod onkoloških bolesnika, što je već opisano u prethodnom tekstu, i profesionalnog osoblja kako bi se izbjegla prekomjerna brza akumulacija i linearno nakupljanje koje bi dovelo do oštećenja stanica. Određena oštećenja i posljedice radijacije mogu biti prouzročeni nakupljenim dozama tijekom vremena, a velika je razlika je li se stanica uspjela oporaviti između dvaju izlaganja zračenju. Najteže posljedice na organizam uzrokuju velike doze primljene jednokratno, odnosno u malom broju frakcija.

Također, vrlo je bitna bolesnikova starosna dob, mlađi bolesnici su i do 3 puta osjetljiviji nego odrasli.

3.5. UČINCI ZRAČENJA NA PLOD

Plod je različito osjetljiv na učinke zračenja tokom trudnoće. U prva četiri tjedna trudnoće još nije započela organogeneza, a fetus je u toj dobi jednako osjetljiv na zračenje kao i neoplođena jajna stanica. Ozračenje ploda u tom razdoblju dovodi ili do spontanog prekida trudnoće ili se fetus u potpunosti oporavi od teratogenih posljedica zračenja. Najkritičnije razdoblje izlaganja fetusa zračenju je između 8. i 15. tjedna trudnoće. To je razdoblje intenzivne organogeneze u kojem može doći do mentalnih oštećenja zračenjem zbog razvoja čeonih režnjeva mozga. Doze ozračenja manje od 100 mGy, prema dosadašnjim spoznajama ne dovode do mjerljivog smanjenja kvocijenta inteligencije ozračene djece. Prekomjerne doze zračenja od 100 mGy dovode do smanjenja kvocijenta inteligencije za 30 jedinica. Rizik mentalnih oštećenja je 1 : 2 500 po mGy za doze zračenja iznad 250 mGy. Nakon 15. tjedna trudnoće najveći rizik oštećenja zračenjem je mentalna retardacija. Doza ozračenja od 1 Gy u ovoj dobi dovodi do smanjenja kvocijenta inteligencije za 30 jedinica, a rizik razvoja karcinoma je 1 : 5 000 po mGy. Nakon 32. tjedna trudnoće fetus je dobro zaštićen u maternici. U ovom razdoblju najveći rizik od zračenja je povećani rizik nastanka karcinoma u dječjoj ili ranoj odrasloj dobi. Po preporukama ICRP-a, kritična granica za povećanje rizika nastanka karcinoma u ozračene djece je doza od 0,25 mGy.

Svjetska iskustva ukazuju na dozu od 50 mGy kao dozu ozračenja fetusa kod koje se još ne savjetuje umjetni pobačaj. Veći broj relevantnih stručnjaka tu "graničnu" dozu pomiče na 100 mGy.

Zbog uloge žena u stvaranju potomstva veoma je važna njihova dobra prevencija i zaštita od zračenja, a poglavito žena u ranoj reproduktivnoj dobi. U radiološkoj praksi provodi se zaštita žena primjenom pravila: pravilo "deset dana" i pravilo "28 dana".

Pravilo "deset dana" ukazuje da je snimanje žena u generativnom razdoblju dopušteno samo unutar prvih deset dana računajući od prvog dana menstruacije, imajući u vidu da trudnoća u pravilu započinje između 12. i 14. dana računajući od prvog dana mjesečnice. Pravilo "deset dana" se sve više napušta zamjenjujući pravilom "28 dana". Pravilo "28 dana" ukazuje da nema dokaza povećane radiosenzibilnosti zametka u toj starosti u odnosu na običnu jajnu stanicu.

Osim zaštite žena, neke najnovije publikacije sugeriraju muškarcima izbjegavanje stvaranja potomstva tijekom tri mjeseca nakon što su bili izloženi većim dozama zračenja (CT abdomena, irigografije, IVU, CT zdjelice, angiografije trbušnih organa i krvnih žila, itd.). Zračenje oštećuje spermatozoide, što može nepovoljno utjecati na trudnoću njihovih partnerica. Ove preporuke ne počivaju na potvrđenim radiobiološkim spoznajama, te nisu obvezatne.

3.6. DOZE ZRAČENJA PRI PROFESIONALNOM RADU

Radiološki tehnolog i liječnik medicinske radiologije pri svom radu uvijek moraju s najvećom mjerom opreza i vještina rukovati radiološkim uređajima i izvorima zračenja. Pravila ponašanja i mjere opreza propisane su u ALARA-principima, o kojima je već bilo riječi, te državnim zakonodavstvom Hrvatske – Zakonom o zaštiti od zračenja i Pravilnikom o zaštiti od zračenja iz 2013. godine. Zakoni su potvrđeni i usklađeni s preporukama ICRP-a i Europske zajednice. Unatoč „prvenstvenoj“ brizi za bolesnika, radiološki djelatnici trebaju paziti na sebe. Petogodišnja dozvoljena profesionalna primljena doza iznosi 100 mSv s uvjetom da se ne smije u jednoj godini primiti više od 50 mSv. Radi mogućnosti praćenja izloženosti zračenju, osoblje uvijek mora imati propisno postavljen osobni dozimetar prilikom obavljanja različitih poslova unutar radiološke prakse. Također, kada god je moguće, osoblje treba paziti na pravila što kraćeg izlaganja i što udaljenijeg bivanja od mjesta izvora zračenja. Najveće zabilježene doze zračenja su na odjelima nuklearne medicine, gdje je direktan kontakt osoblja s radioaktivnim izotopima koje samo osoblje pripravlja u različite klinički iskoristive radiofarmake. Obavezna je upotreba svih zaštitnih sredstava u svim radiološkim dijagnostičkim i terapijskim odjelima, kako olovnih pregača, ovratnika, rukavica, naočala, tako i olovnih pregrada, kao i posebno prilagođenih prostorija, zidova, prozora i vrata koje moraju zadržavati zračenje unutar prostorije u kojoj se nalazi izvor zračenja.

4. RASPRAVA

Prolazak ionizirajućeg zračenja kroz živa bića izaziva promjene na živim stanicama, organima ili na cijelom tijelu. Te promjene koje zračenje izaziva na živim tkivima nazivamo biološkim efektima ionizirajućih zračenja. Prolaskom kroz tijelo, zračenje ionizira molekule, što može dovesti do promjena, oštećenja ili čak razaranja organskih makromolekula tijela. Ti fizikalno-kemijski procesi u tkivima mogu izazvati cijeli lanac bioloških promjena, čiji je rezultat biološka reakcija na zračenje. Pobudom ili ioniziranjem atoma u živoj stanici zračenje djeluje na životne funkcije stanice, a time i na živa tkiva, organe i organizme. Posljedice tog djelovanja su promjena funkcije stanice, poremećaj u diobi, promjene gena, kao i smrt stanice. Isto zračenje ne uzrokuje kod svih stanica jednako djelovanje. Zato se razlikuje osjetljivost pojedinih vrsta stanica na zračenje, ali i individualna osjetljivost iste vrste stanica koja najčešće ovisi o stadiju staničnog ciklusa. Zbog razlike u osjetljivosti stanica, velika je razlika u posljedicama ozračivanja različitih tkiva, organa i organizama. Općenito se može reći da su manje osjetljiva tkiva sastavljena od već diferenciranih stanica – starija tkiva i stariji organi, a mnogo su više osjetljive nediferencirane, mlađe stanice – tkiva i organi koji se obnavljaju, prije svega unutarnji organi, koštana srž, jajnici, sjemene stanice, očne leće, a posebno embrij. Biološki efekti zračenja mogu se pojaviti na ozračenom pojedincu (somatski efekti), kao i u potomstvu ozračenog pojedinca ako se ošteti nasljedni mehanizam (hereditarni/genski efekti). Somatska oštećenja mogu biti kancerogena, leukemogena, teratogena, akutna i kronična. Somatski efekti i genetski efekti neovisni su o primljenoj dozi zračenja i nazivamo ih i stohastičkim učincima.

Velikim dijelom biološki efekti zračenja ovise o primljenoj, apsorbiranoj dozi tj. količini energije zračenja koja je apsorbirana u jedinici mase tijela. Jedinica za apsorbiranu dozu je grej (Gy). Doza zračenja iznosi 1 Gy ako energija apsorbirana u 1 kg materijala ili tkiva iznosi 1 joul. Ovisnost bioloških efekata zračenja o vrsti zračenja karakterizira se faktorom kvalitete zračenja Q . Faktor kvalitete zračenja Q iznosi 1 za rendgensko zračenje, gama-zračenje i elektrone, 1 – 3 za termičke neutrone, 10 za protone, brze neutrone i jednostruko nabijene teže čestice, 20 za alfa-čestice i višestruko nabijene čestice. Mjera za biološke efekte koja uzima u obzir njihovu ovisnost o apsorbiranoj energiji i vrsti zračenja jest ekvivalentna doza. Ona je jednaka produktu apsorbirane doze i faktora kvalitete snopa zračenja. Jedinica za ekvivalentnu dozu je sievert (Sv). Ekvivalentna doza omogućuje usporedbu i zbrajanje učinka različitih vrsta zračenja ili zračenja iste vrste ali različitih energija, pri određivanju ukupnog

biološkog efekta. Doze veće od 0,25 Sv uzrokuju promjenu krvne slike. Doze od 2 – 3 Sv izazivaju probavne smetnje i radijacijsku bolest, a u slučaju neliječenja, moguća je i smrt. Doza od 4 Sv izaziva smrt u 50 % slučajeva, a doza od 6 Sv rezultira 100-postotnom smrtnošću, osim u slučajevima posebnog liječenja. Pri dozama od 8 Sv smatra se da je smrt sigurna usprkos liječenju. Biološki efekti zračenja ovise i o trajanju i o učestalosti ozračivanja, te o raspodjeli doze po tijelu. Utvrđeno je da je za srednje i velike doze odnos između primljene doze i bioloških efekata tog zračenja na ljudima linearan, što znači koliko je puta veća primljena doza, toliko je puta veći i biološki učinak. Za područje malih doza, odnos između primljene doze i njezinih bioloških efekata nije poznat. Od zračenja se nikako ne može sakriti, stoga svaki čovjek prima godišnju ekvivalentnu dozu. Prema zadnjim istraživanjima u SAD-u, prosječni pojedinac primi godišnju dozu zračenja od približno 6,5 mSv. To je prosječna dobivena godišnja doza, a sastoji se od udisanja radona, različitih radionuklida unesenih u tijelo, Zemljinog zračenja i kozmičkih izvora, ali i od sve većih izlaganja umjetnim izvorima ionizirajućih zračenja. Prema ispitivanjima u Hrvatskoj, prosječna godišnja doza iz prirodnih izvora zračenja koju primi stanovništvo u Osijeku je 1,30 mSv, u Zagrebu iznosi 1,14 mSv, Varaždinu 1,10 mSv, a u Rapcu 0,66 mSv. Zračenje djeluje direktno na molekule organizma, odnosno indirektno na te iste molekule, uništavajući molekule vode koje posljedično djeluju na ostale molekule. Indirektno je djelovanje češće zbog sastava tijela od 80 % vode. Oštećenja mogu nastati odmah ubrzo nakon izlaganja zračenju, unutar 1. mjeseca – akutne posljedice, između 1. i 3. mjeseca – subakutne posljedice, a mogu se pojaviti i kasnije – kronične posljedice.

Ionizirajućem zračenju, unatoč nevidljivosti i općim svojstvima neopipljivosti, nikada se ne smije pristupiti bez potpune ozbiljnosti, opreza i profesionalnosti. Većini bolesti nastalih kao posljedica izlaganja ionizirajućem zračenju, zbog dugog vremena latencije i sličnosti s drugim uzročnicima bolesti, teško se dokazuje porijeklo i uzrok. Tek nakon što su se rendgenske zrake otkrile, ljudi im nisu pristupali s oprezom, no vrlo brzo su se počeli pojavljivati prvi simptomi koji se nisu mogli povezati ni sa čime osim s novootkrivenim zračenjem. Tako već dvadesetih godina 20. stoljeća znanstvenici donose prve zakonske odredbe za rukovanje s ionizirajućim izvorima i zabrane neograničene upotrebe rendgenskih zraka. Danas su na snazi puno stroži zakoni, vodi se mjesečna kontrola izloženosti profesionalnog osoblja.

Dozvoljena primljena doza za profesionalno osoblje iznosi 100 mSv tijekom 5 godina, s uvjetom da godišnja doza ne smije biti viša od 50 mSv.

Također, bilježi se i kontrolira količina doze predane bolesniku prilikom svakog radiološkog pregleda i terapije. Nadalje, vode se stroge kontrole izgradnje prostora, pazi se na lokaliziranje i minimiziranje utjecaja raspršnog zračenja. Sve te odredbe propisane su u sklopu ALARA-principa (skraćenice engleskog izraza "As Low As Reasonably Achievable" – što se niže razumno može postići) kojega se profesionalno osoblje mora pridržavati.

Uvijek valja uzimati u obzir radiosenzibilnost ciljne materije, vrijeme oporavka stanica, mogućnost trudnoće i drugih posebnih stanja, kao i korist samog zračenja u odnosu na njegovu štetnost i opasnost. Treba uvijek poštovati algoritme pretraga, crpiti sve neionizirajuće pretrage kad god je moguće. Nikada se ne smije zračenju izlagati više nego li je potrebno ni zadržavati na mjestima izvora zračenja. Treba se uvijek dodatno educirati i pokušavati svoje znanje prenositi na osoblje i bolesnike koji dolaze u doticaj s radiološkim djelatnostima.

5. ZAKLJUČAK

Ionizirajuće je zračenje neizostavni dio medicinske dijagnostike i terapije, kao i mnogih drugih djelatnosti. Unatoč svojim korisnim osobinama, također je i štetno. Ionizirajuće zračenje je uzročnik mnogih bolesti. Unatoč tim činjenicama, sve ga se više upotrebljava u medicinske svrhe. Ne možemo mu pobjeći, ali ga možemo reducirati savjesnim ponašanjem i što boljom edukacijom o načinu njegova djelovanja, njegovim izvorima i o samoj zaštiti.

Ionizirajuće zračenje postoji oduvijek u obliku radioaktivnih izotopa. Nekima se smanjio početni broj radioaktivnih jezgri, a neki su se pretvorili u druge atome izmjenom nuklearnog i masenog broja.

Godine 1895. znanstvenici su, na čelu s W. Roentgenom, uspjeli definirati i iskoristiti umjetno stvoreno radijacijsko zračenje. Tim otkrićem nastupila su masovna daljna istraživanja koja su postavila temelje današnjoj radiologiji i modernim uređajima pomoću kojih se provode dijagnostičke i terapijske usluge. Također, tih su godina znanstvenici otkrili prirodne radijacijske izvore i njihove učinke na tijelo.

Postoje mnogobrojni izvori i vrste ionizirajućeg zračenja. Glavna razlika između njih je u tome jesu li u obliku čestičnog zračenja ili fotona energije. U medicini se najviše upotrebljavaju čestična zračenja u obliku alfa i beta čestica te protonsko zračenje, a u obliku fotona energije rendgensko i gama-zračenje. Čestična zračenja i gama-zrake su najzastupljenije u radioterapiji tumora, dok se rendgenske zrake pretežno koriste u dijagnostičke svrhe.

Neovisno o izvoru, sva ta zračenja izazivaju ionizaciju neutralnih atoma. Interakcijom zraka s materijom mogu nastati različita međudjelovanja na mikroskopskoj i na makroskopskoj razini. Čestice zraka odnosno fotoni energije mogu zaobići elektrone atoma i njihovu jezgru, mogu se sudariti s njima gubeći dio energije, ali nastavljajući svoj daljnji put ili se mogu sudariti s elektronima i jezgrom potpuno im predavajući svu svoju energiju, potičući daljnje reakcije i emisije energije atoma. Oštećujući atome, mogu nastati i oštećenja stanica, tkiva, organa, a i cijelog organizma. U većini slučajeva, na tijelo bolesnika ionizirajuće zračenje djeluje posredno na glavne molekule organizma putem oštećenja molekula vode, rastavljajući ih na slobodne, štetne i vrlo reaktivne radikale. U konačnici, najteža su oštećenja DNK-molekula. Krajni biološki učinak ovisi o različitim faktorima, a najviše o vrsti izloženih stanica, njihovom staničnom ciklusu, dobi pacijenta, brzini primitka

doze kao i o samoj količini ionizirajućeg zračenja. Već su krajem 19. stoljeća znanstvenici Bergonie i Tribondeau opisali dva glavna faktora ovisnosti biološkog učinka zakonom kojim je utvrđeno da su stanice osjetljive na zračenje proporcionalno brzini njihove diobe, a obrnuto proporcionalno stupnju njihove diferencijacije. To znači da su na zračenje najosjetljivije stanice koje se intenzivno dijele i koje imaju intenzivnije metaboličke procese, a manje su osjetljive visoko diferencirane stanice i stanice sa sporijim metaboličkim procesima. Sukladno tome, treba iznimno paziti na djecu i trudnice. Stanice se također i prirodnim procesima mogu i oporaviti nakon oštećenja, no i to ovisi o mnogobrojnim faktorima o čemu se mora voditi računa, a najviše u planiranjima radioterapije i organizaciji rada profesionalnog osoblja.

Oštećenja mogu prouzročiti akutne i kronične posljedice, kancerogena, leukogena i teratogena oštećenja. Mogu se manifestirati na ozračenog pojedinca ili se prenijeti na potomstvo.

Fizička svojstva neopipljivosti i bezbojnosti ionizirajućeg zračenja čine ga još opasnijim. Danas se i dalje unapređuju zakoni i načini ophođenja s izvorima ionizacijskih zračenja zbog teških oblika oštećenja koja mogu dovesti čak i do smrti ozračenog pojedinca. Mora se imati na umu da je 50 % letalna doza relativno brzo „dohvatljiva“ činjenicom da se zračenje akumulira i da je upotreba radioloških ionizacijskih pretraga sve češća, a pogotovo i činjenicom za profesionalno osoblje koje je uvijek u neposrednom kontaktu s izvorima radijacije.

Tužne su činjenice da su vlade različitih zemalja, predvođene SAD-om, ukinule provjere radijacijskih zračenja u ribama, morskim plodovima, riži i drugim prehrambenim proizvodima uvezenima iz Japana koji i dalje trpi posljedice nuklearne bombe, a sve zbog politike i novca, pri tome ne mareći za zdravlje ljudi. Određena istraživanja pokazuju da konstantno izlaganje niskim dozama ionizirajućeg zračenja može dovesti i do gorih posljedica od jednokratnih većih doza, jer se na ovaj način oštećene stanice ne uspijevaju oporaviti, već su stalno izložene negativnim utjecajima i laganim oštećenjima. Nadalje, smatram da sveukupna populacija nije dovoljno upoznata s opasnostima i količinama primljenih doza zračenja u odnosu s mogućim nastancima oštećenja i bolesti iz umjetnih izvora. Provedeno istraživanje u KBC-u Split jasno pokazuje da su radiološke metode jako štetne, imajući na umu spoznaju da se biološki učinci zračenja akumuliraju dovodeći do većih oštećenja.

6. SAŽETAK

Prilikom prolaska zračenja kroz materiju dolazi do njihova međudjelovanja i kao posljedica mijenjaju se svojstva zračenja i materije. Ionizacija atoma najznačajniji je učinak zračenja te ga stoga nazivamo ionizirajuće zračenje. Izravna ionizacija nastaje kada električki nabijene čestice ili fotoni iz neutralnog atoma izbace elektron. Rezultat tog izbacivanja su slobodni negativni elektron i pozitivno nabijeni atom. Posredna ionizacija nastaje kada neutralne čestice ili fotoni iz atoma izbace elektron, a taj elektron ima dovoljno energije da dalje ionizira atome. Pokazatelj stupnja ionizacije je broj ioniziranih parova stvorenih po duljini puta čestice ili fotona koji prolazi kroz određenu materiju. Prolaskom elektromagnetskog zračenja kroz materiju najčešće dolazi do fotoelektričnog efekta, Comptonovog efekta i tvorbe parova elektron-pozitron. Fotoelektrični efekt je pojava u kojoj foton, čija je energija veća od energije vezivanja elektrona u atomu, preda svu energiju elektronu, čime elektron napušta atom, a foton prestaje postojati. Comptonov efekt je pojava pri kojoj foton predaje samo dio svoje energije elektronu i nastavlja daljnji put manje energetske vrijednosti. Tvorba para elektron-pozitron jest pojava koja nastaje samo ako je energija fotona veća od 1,02 MeV. Prodre li takav foton do jezgre atoma, u njezinoj blizini pretvori se u dvije čestice – u elektron i u pozitron. Nakon vrlo kratkog vremena, nastali se pozitron spaja s nekim od elektrona iz okoline i pritom nestaju obje čestice, a nastaju dva fotona suprotnih smjerova gibanja. Vjerojatnost pojavljivanja jedne od navedenih pojava ovisi o energiji upadnog fotona i čestice. Pri niskim energijama događa se uglavnom fotoelektrični efekt, pri višim energijama fotona prevladava Comptonov efekt, a pri energijama većima od oko 5 MeV prevladava tvorba parova.

Učinci ionizirajućeg zračenja na organizam mogu nastati direktnim djelovanjem na molekule organizma ili indirektnim putem djelujući na molekule vode (radioliza) čiji slobodni radikali štetno djeluju na druge molekule tijela. Oštećenja i simptomi iradijacije mogu se manifestirati ubrzo nakon izlaganja zračenju ili nakon određenog perioda. Zračenje može izazvati kancerogenezu, leukemogena oštećenja, teratogena i genska oštećenja. Određene bolesti mogu nastati akumuliranjem zračenja kroz mnogobrojna snimanja, a pri tom se ozračene stanice nisu uspjele oporaviti, ili oštećenja mogu nastati pri neznatnim dozama, ali dovoljno velikima da utječu na normalan rast i razmnožavanje stanice. Najosjetljivije su stanice koje se brzo dijele i koje nisu dobro diferencirane.

Ionizirajuće zračenje treba koristiti oprezno, profesionalno i savjesno, imajući u vidu što bolju zaštitu svih izloženih. Postoje mnogobrojne organizacije, zakoni i principi koji ukazuju na potrebe pažljivog rukovanja radiološkim uređajima. Profesionalno osoblje treba educirati bolesnike o mogućim rizicima izlaganja ionizacijskim zračenjima i izvorima zračenja. Posebna kategorija zaštite su trudnice i mala djeca kod kojih najmanje doze zračenja mogu biti jako opasne. Stanovništvo je stalno izloženo zračenju jer je ono prisutno u mnogobrojnim prirodnim izvorima, ali možemo smanjiti sveukupnu primljenu dozu smanjivanjem neopravdanih izlaganja radiološkim dijagnostičkim i terapijskim pretragama, uzimajući u obzir opravdanost i objektivnu potrebu za pretragom u odnosu na štetnost i opasnost od zračenja.

7. SUMMARY

During the passage of radiation through matter comes to their interactions, which resulted in changing the properties of matter and radiation. Ionization of atoms is the most important effect which is caused by the radiation, so it is called ionizing radiation. Direct ionization occurs when electrically charged particles or photons from neutral atoms remove an electron. The result of this expulsion are free negative electrons and positively charged atoms. Indirect ionization occurs when neutral particles or photons from atoms remove an electron and the electron has enough energy to further ionize atoms. Indicator of the degree of ionization is the number of ionized pairs created by the particles or photons passing through a particular matter. During passage of electromagnetic radiation through the matter usually causes photoelectric effect, Compton effect and the formation of electron-positron pairs. Photoelectric effect is phenomenon which can appear when energy of radiation photon is greater than the binding energy of electrons in atom. Photon emits all the energy to the electron, thus the electron leaves the atom and the photon stop to exist. Compton effect is a phenomenon in which a photon transmit only part of its energy to an electron, and continues to go further with another direction and with less energy values. The formation of an electron-positron pair is a phenomenon that occurs only if the photon energy is greater than 1.2 MeV. In case where photon penetrates to the nucleus, in its vicinity turns into two particles - electrons and positrons. After a very short time, the positron combines with some of the electrons from the environment and thereby both particles disappear. As a result of their disappearance two photons with opposite directions of motion are formed. The probability of occurrence of one of these phenomena depend on the energy of the incident photons and particles. At low energies occurs mainly photoelectric effect, Compton effect dominated at higher photon energies, and at photon energies greater than about 5 MeV predominant is formation of pairs. Effects of ionizing radiation on the human body can occur by direct action on the macromolecules of the body or by indirectly acting on the molecules of water (radiolysis) whose free harmful radicals damage other molecules of the body. Irradiation damage and symptoms can manifest soon after radiation exposure or after a longer period. Radiation can cause carcinogenesis, leukemias damage, teratogenic and genetic damage. Some diseases can be caused by the accumulating of radiation through numerous exposures, in which irradiated cells failed to recover. Also, damage may appear as a result of minor doses, but those doses are large enough to affect the normal growth of cells and their multiplications. Most sensitive cells are not well differentiated and those which reproduce rapidly.

Ionizing radiation should be used carefully, professionally and conscientiously, bearing in mind protection for all who are exposed. There are many organizations, laws and principles that indicate the importance of careful handling with radiological devices. Professional staff should educate patients about the potential risks caused by ionizing radiation and radioactive sources. Special categories of protection are pregnant women and young children for whom the smallest doses of radiation can be very dangerous. The population is constantly exposed to radiation because it is present in many natural resources, but we can reduce the overall received doses by reducing unjustified exposure to radiological diagnostic and therapeutic procedures, taking into account the objective justification and need for examination in relation to the harm and danger of radiation.

8. LITERATURA

1. Janković S, Eterović D. Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike. Zagreb, Medicinska naklada, 2002.
2. Janković S, Mihanović F. Uvod u radiologiju. Split, Sveučilište u Splitu, 2013.
3. Hebrang A, Klarić-Čustović R. Radiologija. Treće, obnovljeno i dopunjeno izdanje. Zagreb, Medicinska naklada, 2007.
4. Hall EJ. Radiobiology for the radiologist. Philadelphia, Lippincot Williams and Wilkins, 2000.
5. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York, 2011.
6. Dželalija M. Ionizirajuće zračenje u biosferi (interna skripta), Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet 2006. Dostupno na: <http://personal.unizd.hr> (pristupljeno 4. 6. 2014.)
7. Šarić N, Juretić A, Pleština S. Radioterapija melanoma. Klinika za onkologiju, KBC "Zagreb". Dostupno na: <http://bib.irb.hr> (pristupljeno 4. 6. 2014.)
8. Janković S. Biološki učinci ionizirajućeg zračenja. Medicinski fakultet u Splitu. Power point prezentacija dostupna na: genom.mefst.hr (pristupljeno 22. 6. 2014.)
9. Janković S. Fizika medicinske radiologije. Medicinski fakultet u Splitu. Power point prezentacija dostupna na: genom.mefst.hr (pristupljeno 6. 6. 2014.)
10. Boban M. Biološki učinci i frakcioniranje radioterapije. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
11. Boban M. Liječenje neželjenih posljedica specifične onkološke terapije. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
12. Radović D. Fizika zračenja. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
13. Perić M, Perković I. Zračenje glave i vrata i komplikacije u usnoj šupljini. Zavod za oralnu medicinu, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2013. Dostupno na: <http://sonda.sfzg.hr> (pristupljeno 5. 6. 2014.)
14. Borovina A. Rezultati istraživanja o dozama zračenja prilikom radioloških pretraga. KBC Split, Zavod za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju, 2014.
15. <http://www.fer.unizg.hr> (pristupljeno 3. 6. 2014.)
16. <http://fzs.sve-mo.ba> (pristupljeno 4. 6. 2014.)

17. <http://www.nemis.hr> (pristupljeno 3. 6. 2014.)
18. <http://web.zpr.fer.hr> (pristupljeno 5. 6. 2014.)
19. www.icrp.org (pristupljeno 4. 6. 2014.)
20. <http://www.proton-therapy.org> (pristupljeno 5. 6. 2014.)
21. <http://perpetuum-lab.com.hr> (pristupljeno 4. 6. 2014.)
22. <http://www.physics.mefos.hr> (pristupljeno 6. 6. 2014.)

IZVORI SLIKA:

1. Boban M. Biološki učinci i frakcioniranje radioterapije. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
2. Boban M. Liječenje neželjenih posljedica specifične onkološke terapije. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
3. Radović D. Fizika zračenja. Odjel zdravstvenih studija Split – powerpoint prezentacija, predavanje 2014.
4. www.galenotech.org (pristupljeno 2. 6. 2014.)
5. fr.wikipedia.org (pristupljeno 2. 6. 2014.)
6. www.floridaproton.org (pristupljeno 3. 6. 2014.)
7. en.wikibooks.org (pristupljeno 24. 6. 2014.)

9. ŽIVOTOPIS

Zovem se Lovre Perić. Rođen sam 2. studenoga 1989. u Splitu, gdje i danas živim s majkom; otac i stariji brat ne žive s nama. Završio sam srednju ekonomsku školu, no taj prvi odabir nije mi baš blizak i odlučio sam ga zamijeniti zdravstvenim usmjerenjem. Oduvijek sam bio sklon zdravstvu, a u radiološkoj tehnologiji osjećam se „doma“, kao da je dio mene jer je već odredila moj život. Zacrtao sam, kroz rad i predanost, dokazati sebe i pridonijeti napretku i same struke i uslužne djelatnosti namijenjene bolesnicima.

Kroz dosadašnje školovanje više puta sam sudjelovao na natjecanjima iz matematike i eko-kviza. Imam vozačku dozvolu B-kategorije. Engleski jezik govorim vrlo dobro.