

UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA Ljudsko TIJELO

Kranjčec, Monika

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:641300>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu
Odjel Sigurnosti i zaštite
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Monika Kranjčec

UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA LJUDSKO TIJELO

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2019.

Karlovac University of Applied Sciences
Safety and Protection Department
Professional graduate study of Safety and Protection

Monika Kranjčec

THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION ON THE HUMAN BODY

FINAL PAPER

Karlovac, 2019.

Veleučilište u Karlovcu
Odjel Sigurnosti i zaštite
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Monika Kranjčec

UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA LJUDSKO TIJELO

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Slaven Lulić

Karlovac, 2019.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički studij: Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2019.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Monika Kranjčec

Matični broj: 0422417025

Naslov: Učinci ionizirajućeg zračenja na ljudsko tijelo

Opis zadatka:

Tema završnog rada su učinci ionizirajućeg zračenja na ljudsko tijelo. U prvom dijelu rada opisuje se ionizirajuće zračenje, kako ono nastaje, koje su vrste i izvori, te međudjelovanje ionizirajućeg zračenja s materijom, vrste ozračenja, fizikalne veličine koje opisuju zračenje i načini zaštite od ionizirajućeg zračenja. Zatim su objašnjeni čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma, učinci na stanicu na razini molekula i razini staničnih organela te osjetljivost pojedinih vrsta stanica na ionizirajuće zračenje. Nakon toga je objašnjena karcinogeneza i radiobiološki učinci ionizirajućeg zračenja. U posljednjem dijelu opisane su i navedene posljedice izlaganja čovjeka ionizirajućem zračenju te su objašnjena kožna oštećenja i radijacijska bolest.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

02/2019

06/2019

07/2019.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Dr. sc. Slaven Lulić

Ivan Štedul, v. pred.

PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i znanja stečena tijekom svog studija.

Posebno se zahvaljujem svom mentoru, dr. sc. Slavenu Luliću, na ukazanom povjerenju, pruženoj pomoći, savjetovanju i usmjeravanju tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i prijateljima na podršci, razumjevanju i pomoći tijekom studiranja.

SAŽETAK

Tema završnog rada su učinci ionizirajućeg zračenja na ljudsko tijelo. U prvom dijelu rada opisuje se ionizirajuće zračenje, kako ono nastaje, koje su vrste i izvori, te međudjelovanje ionizirajućeg zračenja s materijom, vrste ozračenja, fizikalne veličine koje opisuju zračenje i načini zaštite od ionizirajućeg zračenja. Zatim su objašnjeni čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma, učinci na stanicu na razini molekula i razini staničnih organela te osjetljivost pojedinih vrsta stanica na ionizirajuće zračenje. Nakon toga je objašnjena karcinogeneza i radiobiološki učinci ionizirajućeg zračenja. U posljednjem dijelu opisane su i navedene posljedice izlaganja čovjeka ionizirajućem zračenju te su objašnjena kožna oštećenja i radijacijska bolest.

SUMMARY

The subject of the final work is the effects of ionizing radiation on the human body. The first part of the paper describes the ionizing radiation, how it is produced, which types and sources, and the interaction of the ionizing radiation with the material, the type of irradiation, the physical size that describe the radiation and the ways of protection against ionizing radiation. Then, the factors that affect the degree of body damage, effects on the cell at the molecule level and the level of cell organelles, and the sensitivity of certain cell types to ionizing radiation are explained. Subsequently, carcinogenesis and radiobiological effects of ionizing radiation were explained. In the last part of that described and the consequences of human exposure to ionizing radiation and forth skin damage and radiation sickness.

SADRŽAJ

STRANICA

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| ZAVRŠNI ZADATAK | I |
| PREDGOVOR | II |
| SAŽETAK..... | III |
| SADRŽAJ | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE..... | 2 |
| 2.1. Načini nastanka ionizirajućeg zračenja | 3 |
| 2.2. Vrste ionizirajućeg zračenja | 4 |
| 2.2.1. Alfa čestice | 5 |
| 2.2.2. Beta čestice..... | 6 |
| 2.2.3. Gama zrake..... | 7 |
| 2.2.4. X – zrake | 8 |
| 2.3. Međudjelovanje ionizirajućeg zračenja s materijom..... | 9 |
| 2.4. Vrste izvora | 11 |
| 2.5. Vrste ozračenja, fizikalne veličine i mjerne jedinice | 12 |
| 2.5.1. Karakteristične doze zračenja..... | 15 |
| 2.5.1.1. Prirodne doze..... | 16 |
| 2.5.1.2. Dopuštene doze | 17 |
| 2.5.1.3. Granične doze..... | 17 |
| 2.5.1.4. Kritične doze | 18 |
| 2.5.1.5. Natkritične doze | 19 |
| 2.6. Načini zaštite | 19 |
| 2.6.1. Zakonodavna zaštita | 20 |
| 2.6.2. Fizikalno – tehnička zaštita | 21 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.3. Kemijska zaštita | 21 |
| 2.6.4. Biološka zaštita | 21 |
| 3. RADIOBIOLOGIJA | 22 |
| 3.1. Čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma | 22 |
| 3.2. Učinci ionizirajućeg zračenja na stanicu | 23 |
| 3.2.1. Učinci na razini molekula u stanicama..... | 26 |
| 3.2.1.1. Mehanizam oštećenja i popravka DNA molekule..... | 28 |
| 3.2.2. Učinci na razini staničnih organela | 32 |
| 3.2.3. Osjetljivost pojedinih stanica na ionizirajuće zračenje | 35 |
| 3.3. Karcinogeneza..... | 36 |
| 3.4. Radiobiološki učinci..... | 38 |
| 3.4.1. Deterministički učinci | 39 |
| 3.4.2. Stohastički učinci | 39 |
| 4. POSLJEDICE IZLAGANJA ČOVJEKA IONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU | 40 |
| 4.1. Patogeneza radijacijskih oštećenja | 41 |
| 4.2. Radijacijska bolest..... | 42 |
| 4.2.1. Faze radijacijske bolesti i klinička slika..... | 44 |
| 4.3. Oštećenja kože ionizirajućim zračenjem..... | 48 |
| 4.3.1. Radiodermatitis acuta | 48 |
| 4.3.2. Radiodermatitis chronica..... | 50 |
| 4.4. Kasna i ostala oštećenja..... | 51 |
| 5. ZAKLJUČAK | 53 |
| 6. LITERATURA | 54 |
| 7. POPIS SLIKA | 55 |
| 8. POPIS TABLICA..... | 56 |

1. UVOD

U prirodi nalazimo više od 90 prirodnih kemijskih elemenata, a ti elementi, u elementarnim stanjima, kemijskim spojevima ili smjesama, sačinjavaju sve žive i nežive tvari na Zemlji. Osnovna građevna jedinica svake tvari je atom.

Atom se sastoji od elektronskog omotača i atomske jezgre. U ljuskama elektronskog omotača nalaze se negativno nabijeni elektroni, a u atomskoj jezgri pozitivno nabijeni protoni i nenabijeni neutroni. Svaki atom u prirodi nalazi se u ravnotežnom odnosu elektrona i protona te kao cjelina atom nema naboj.

Zbog vanjskih djelovanja na atom, elektron iz elektronskog omotača može biti izbačen pri čemu se narušava ravnoteža naboja u atomu, pa je atom ukupno pozitivno nabijen. Atom kojem je narušena ravnoteža naboja nazivamo ion, a proces nastanka iona ionizacija. Zračenje koje može uzrokovati ionizaciju nazivamo ionizirajuće zračenje.

Ionizirajuće zračenje je prirodna i česta pojava u okolišu i u ljudskim djelatnostima. Upotreba ionizirajućeg zračenja je sve veća i raširenija, a u medicinskoj dijagnostici, terapiji, sterilizaciji opreme i pribora nema adekvatne zamjene ionizirajućem zračenju. Uz korisnu stranu upotrebe, ionizirajuće zračenje donosi opasnost za zdravlje i život ljudi, te štetu za okoliš.

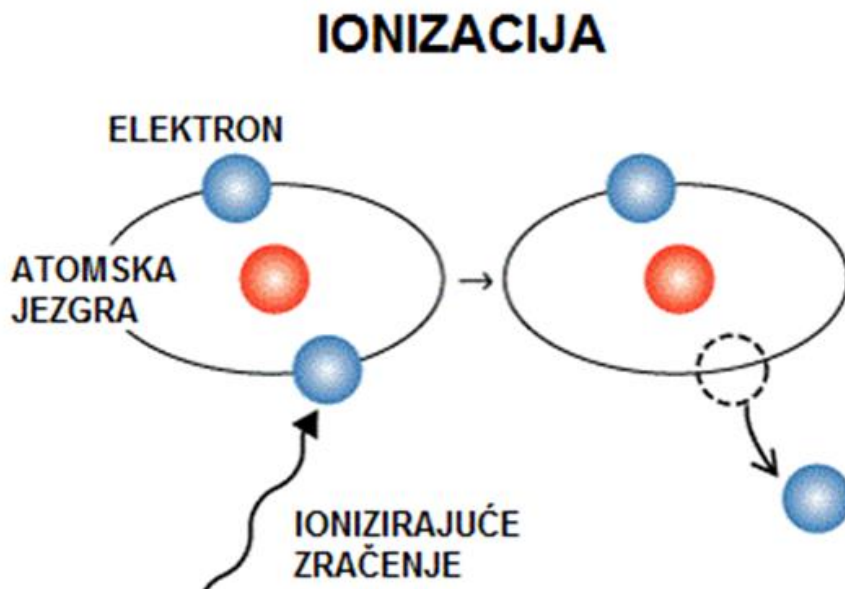
Društveno prihvaćanje rizika u vezi s upotrebom ionizirajućeg zračenja uvjetovano je efektivnom koristi koju takva upotreba donosi. Opasnosti koje prate izlaganje ionizirajućem zračenju ne mogu se potpuno ukloniti, ali se rizici mogu ograničavati i smanjivati raznim tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama. Zbog toga, svaka država ima obvezu izgradnje uređenog, sustavnog i kvalitetnog sustava zaštite od ionizirajućeg zračenja na svim društvenim razinama.

2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Ionizirajuće zračenje je vrsta zračenja odnosno pojava prijenosa energije u obliku fotona ili masenih čestica, koje imaju dovoljno energije da međudjeluju s kemijskom tvari tako da tu kemijsku tvar ioniziraju. U tom međudjelovanju dolazi do izmjene energija i izmjene strukture ozračene tvari, što može imati korisne, ali i vrlo štetne posljedice.

Ionizacija je proces u kojem se neutralnom atomu, djelovanjem izvana, može izbaciti elektron iz elektronskog omotača pri čemu atom postaje ion. Ionizacija je proces stvaranja nabijenih čestica iz neutralnih čestica. Zbog toga zračenje koje uzrokuje ionizaciju nazivamo ionizirajućim zračenjem.

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.



Sl. 1. Proces ionizacije atoma ionizirajućim zračenjem

Izvor: www.quora.com

2.1. Načini nastanka ionizirajućeg zračenja

Najsitniji dio svake kemijske tvari ili kemijskog elementa koji još ima ista kemijska svojstva nazivamo atom. Svaki atom sastoji se od atomske jezgre i elektronskog omotača. Atom se također sastoji od još sitnijih dijelova, a to su: proton, neutron i elektron. Protoni i neutroni nalaze se u jezgri atoma, a elektroni se nalaze u elektronskom omotaču koji obavija jezgru.

Protoni su čestice pozitivno nabijene, a elektroni su čestice koje imaju naboj istog iznosa kao i protoni, ali suprotnog predznaka (negativno nabijeni). Neutroni nemaju naboj. Protoni i neutroni imaju gotovo jednaku masu, dok elektroni imaju 1800 puta manju masu.

U prirodi atomi su kao cjelina električki neutralni, odnosno sadrže jednaki broj protona i elektrona. Taj broj nazivamo atomskim brojem Z , broj neutrona označavamo s N , a zbroj Z i N daje maseni broj A . Maseni broj je zapravo broj protona i neutrona. Zbog toga oznaka svakog kemijskog elementa izgleda ovako: A_ZX .

Atomi jednog kemijskog elementa mogu imati različit broj neutrona i tada takve atome nazivamo izotopima. Svi kemijski elementi su razvrstani u posebnu tablicu koju nazivamo Periodni sustav elemenata. Elementi su razvrstani u osam karakterističnih skupina sa sličnim kemijskim svojstvima i poredani su po rastućem atomskom broju Z .

PERIODNI SUSTAV ELEMENATA

PERIODNI SUSTAV ELEMENATA (Periodic Table of Elements) showing elements grouped by periods (1-7) and groups (IA-VIIA). Includes legend for element types (Metals, Nonmetals, etc.) and atomic weights.

| PERIODA | 1 IA | 2 IIA | 3 IIIA | 4 IVA | 5 VA | 6 VIA | 7 VIIA | 8 | 9 | 10 | 11 IB | 12 IIB | 13 IIIA | 14 IVA | 15 VA | 16 VIA | 17 VIIA | 18 VIIIA |
|---------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | H (1.008) | He (4.0026) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Li (6.94) | Be (9.0122) | B (10.81) | C (12.011) | N (14.007) | O (15.999) | F (18.998) | Ne (20.180) | | | | | | | | | | |
| 3 | Na (22.990) | Mg (24.305) | Al (26.982) | Si (28.085) | P (30.974) | S (32.06) | Cl (35.45) | Ar (39.948) | | | | | | | | | | |
| 4 | K (39.098) | Ca (40.078) | Sc (44.956) | Ti (47.867) | V (50.942) | Cr (51.996) | Mn (54.938) | Fe (55.845) | Co (58.933) | Ni (58.693) | Cu (63.546) | Zn (65.38) | Ga (69.723) | Ge (72.64) | As (74.922) | Se (78.971) | Br (79.904) | Kr (83.798) |
| 5 | Rb (85.468) | Sr (87.62) | Y (88.906) | Zr (91.224) | Nb (92.906) | Mo (95.95) | Tc (98) | Ru (101.07) | Rh (102.91) | Pd (106.42) | Ag (107.87) | Cd (112.41) | In (114.82) | Sn (118.71) | Sb (121.76) | Te (127.60) | I (126.90) | Xe (131.29) |
| 6 | Cs (132.91) | Ba (137.33) | La-Lu (Lantanoidi) | Hf (178.49) | Ta (180.95) | W (183.84) | Re (186.21) | Os (190.23) | Ir (192.22) | Pt (195.08) | Au (196.97) | Hg (200.59) | Tl (204.38) | Pb (207.2) | Bi (208.98) | Po (209) | At (210) | Rn (222) |
| 7 | Fr (223) | Ra (226) | Ac-Lr (Aktinoidi) | Rf (261) | Hf (261) | W (261) | Os (261) | Ir (261) | Pt (261) | Au (261) | Hg (261) | Tl (261) | Pb (261) | Bi (261) | Po (261) | At (261) | Rn (261) | |

LANTANOIDE

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|----------|--------|----------|---------|---------|-----------|--------|-----------|--------|-------|--------|---------|---------|
| 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| LANTAN | CERIJ | PRAMIDIJ | NEODIJ | PRIMIDIJ | SAMARIJ | EUROPIJ | GADOLINIJ | TERBIJ | DISPROSIJ | HOLMIJ | ERBIJ | TERMIJ | YTERBIJ | LUTECIJ |

AKTINOIDE

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------|-------------|--------|----------|----------|----------|-------|----------|------------|----------|--------|------------|---------|----------|
| 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |
| AKTINIJ | TORIJ | PROTAKTINIJ | URANIJ | NEPTUNIJ | PLUTONIJ | AMERIČKI | KURIJ | BERKELIJ | KALIFORNIJ | ENSGETIJ | FERMIJ | MENDELEVIJ | NOBELIJ | LAVENČIJ |

Sl. 2. Periodni sustav elemenata

Izvor: www.glossary.periodni.com

Radioaktivne tvari jesu tvari koje, osim ostalih, sadrže atome s nestabilnim jezgrama. Ti atomi s nestabilnim jezgrama svojim raspadom proizvode ionizirajuće zračenje, tj spontanom raspadom će emitirati energiju u obliku fotona ili u obliku emisije čestica koje odnose i energiju.

Radioaktivnost jest svojstvo atoma kojima se jezgre spontano mijenjaju i pri tome emitiraju elektromagnetsko zračenje ili čestice, a proces spontanog mijenjanja jezgre atoma pri čemu se emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice naziva se radioaktivni raspad. Svi kemijski elementi iznad atomskog broja 82 su radioaktivni.

Za pojedine jezgre ne može se reći kada će se raspasti, ali može se izračunati, odnosno odrediti koliko će se jezgara te tvari raspasti nakon određenog vremena, t .

Zakon radioaktivnog glasi: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$, pri čemu je $N(t)$ – broj raspadnutih jezgara, N_0 – početni broj jezgara, λ – konstanta radioaktivnog raspada. Nakon nekog vremena t ostalo je: $\Delta N = N_0 - N(t)$, pri čemu je ΔN broj neraspadnutih jezgara.

$T_{1/2}$ je vrijeme potrebno da se raspadne polovica nestabilnih jezgri koje nazivamo vremenom poluraspada. Vrijeme poluraspada je karakteristično za svaki izotop, a veza između konstante radioaktivnog raspada λ i vremena poluraspada dano je matematičkim izrazom: $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$.

Za potrebe zaštite od ionizirajućeg zračenja određen je izraz kojim se određuje broj raspada u jedinici vremena. Taj izraz se izražava kao fizikalna veličina. Broj raspada u jedinici vremena za neku nestabilnu jezgru nazivamo aktivnost. Jedinica kojom se izražava aktivnost neke nestabilne jezgre je 1 becquerel, oznake 1 Bq.

2.2. 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,
- gama zrake.

Također, još jedna važna vrsta ionizirajućeg zračenja, X-zrake, rezultat je procesa izvan jezgre, tj. emitiraju ih elektroni iz ljuske atoma.

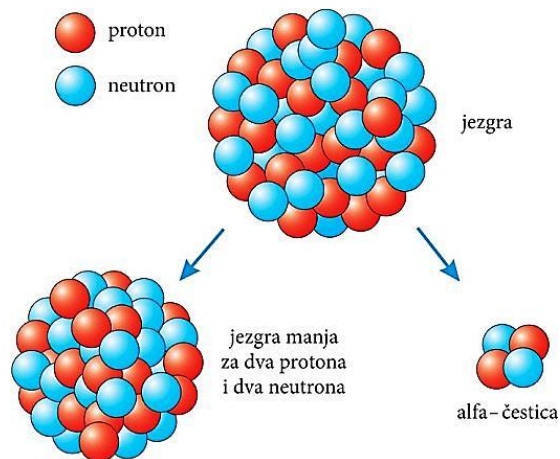
Čestice nastale na takav način, koje imaju masu, nazivamo čestičnim zračenjem. Alfa i beta čestice su atomi ili subatomske čestice koje imaju energiju i naboj te mogu direktno reagirati s elektronima putem Coulombove sile pa se nazivaju direktno ionizirajućim zračenjem.

Fotoni nemaju masu, već predstavljaju male „pakete energije“ koji se u prostoru šire brzinom svjetlosti. Fotoni koji nastaju radioaktivnim raspadom jezgre nazivaju se gama fotoni, tj. gama zrake. Gama zrake i X-zrake su elektromagnetske zrake, električki neutralne pa ne mogu reagirati s elektronima i stoga se nazivaju indirektno ionizirajućim zračenjem.

2.2.1. 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 s pozitivnim nabojem +2 zbog svoja dva protona. Brzina alfa čestice u zraku je otprilike 1/20 brzine svjetlosti. Kad je omjer neutrona i protona u jezgri određenih atoma prenizak, oni emitiraju alfa česticu kako bi uspostavili ravnotežu. Taj proces naziva se α – raspad. Alfa raspad je pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz zračenje alfa-čestica. Jezgra se transformira (ili "raspada") na manju jezgru masenog broja manjeg za 4 i atomskog broja manjeg za 2 i na alfa-česticu.

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. Struja alfa-čestica (alfa-zračenje) vrlo brzo gubi kinetičku energiju zbog jakog ionizirajućeg djelovanja i ne prodire duboko u tvar (zaustavlja ju običan list papira).



Sl. 3. Alfa raspad

Izvor: www.radioaktivniotpad.org

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.

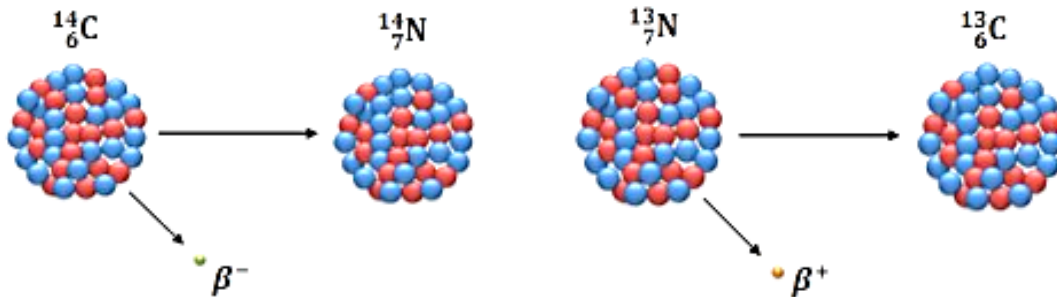
2.2.2. Beta čestice

Beta čestica je elektron ili pozitron koji nastaje pretvorbom neutrona u proton u atomskim jezgrama radioaktivnih elemenata zbog djelovanja slabe nuklearne sile, jedne od 4 fundamentalne sile u prirodi.

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. Neutron se 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. 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, za liječenje očiju i raka kostiju, 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.



Sl. 4. Beta minus (β^-) i beta plus (β^+) raspad

Izvor: www.fzsri.uniri.hr

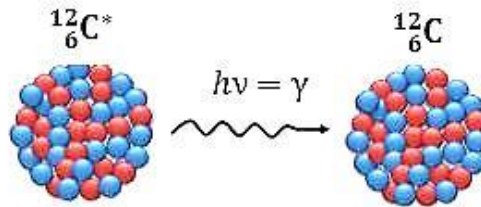
2.2.3. Gama zrake

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 10 000 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.

Do emisije gama zrake dolazi kada jezgra radioaktivnog atoma ima previše energije, a obično slijedi emisiju beta čestice. Neutron iz jezgre se transformira u proton i beta česticu. 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, a one ne čine te materijale radioaktivnim.

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 tehnećij-99

(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.

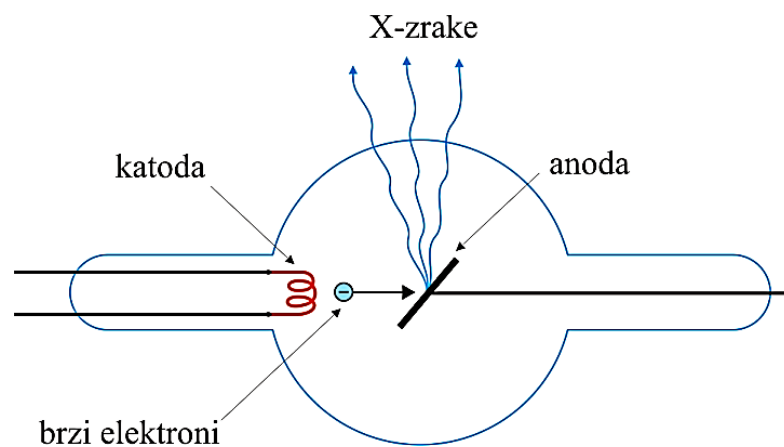


Sl. 5. Gama zračenje - vraćanje atoma ugljika u osnovno stanje iz pobuđenog stanja

Izvor: www.fzsri.uniri.hr

2.2.4. 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.



Sl. 6. Nastajanje X – zraka u rendgenskoj cijevi

Izvor: www.e-kemija.blogspot.com

Rendgensko zračenje čine elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina, od 10^{-10} do 10^{-13} m, a često se naziva i X-zračenjem. Posebna vrsta rendgenskog zračenja je tzv. zakočno zračenje koje nastaje kad elektroni značajno mijenjaju svoju brzinu u blizini atomske jezgre, bilo iznos, bilo smjer gibanja.

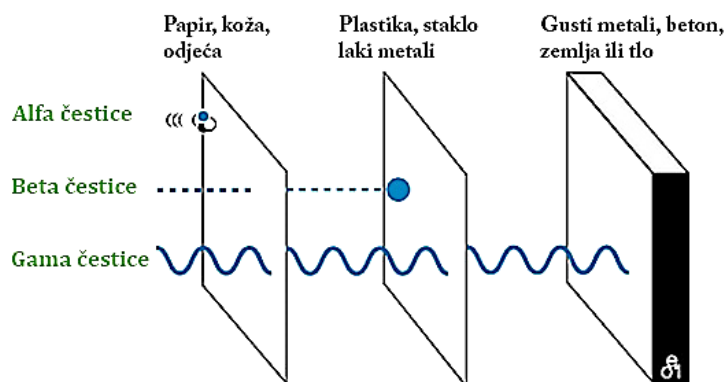
Moć prodiranja X-zrake čini idealnim za korištenje u medicinskoj dijagnostici, ali i u razne industrijske svrhe. Međutim, visoka energija X-zraka može uzrokovati ionizaciju i čini X-zrake biološki opasnim ako apsorbirana doza nije ispod preporučenog minimuma.

2.3. Međudjelovanje ionizirajućeg zračenja s materijom

Ionizirajuće zračenje djeluje na materiju i prolazom kroz nju dolazi do ionizacije. Pri tome se energija ionizirajućeg zračenja prenosi na elektrone u atomima materije kroz koju prolazi i zračenje se guši, ono slabi, sve dok ne prestane ili mu moć prodiranja potpuno oslabi da nije više štetno.

Kod čestičnog zračenja (α -čestice, β -čestice koje imaju masu) prolazom između atoma materije „sudaraju“ se s atomima i pritom predaju im dio svoje kinetičke energije. Energija čestica se smanjuje, a broj ioniziranih atoma se povećava. Kada čestice predaju svu svoju energiju one se „utopu“ u materiji. Što je čestica veća, veću energiju predaje materiji, manji je njezin put prolaza kroz materiju.

Alfa česticu zbog njezine veličine zaustavlja već lista papira, koža ili sloj zraka. Beta čestica ima manju masu, rjeđe se „sudara“ s elektronima materije, ima duži put prodiranja prije nego preda svu svoju energiju pa i time duži put zaustavljanja u materiji.



Sl. 7. Moć prodiranja ionizirajućeg zračenja

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>

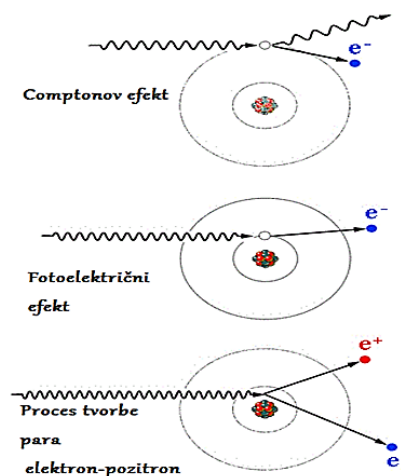
Kada se radi o ionizirajućem zračenju sastavljenom od fotona, fotoni nemaju masu već ih gledamo kao „pakete energije“ i oni se s materijom ne „sudaraju“ kao što to rade čestice s masom. Tada fotoni međudjeluju s materijom na određene mehanizme, neki od njih su:

- fotoelektrični efekt,
- Comptonov efekt,
- tvorba para elektron-pozitron.

Kod fotoelektričnog efekta, foton se sudara s elektronom u elektronskom omotaču atoma materije, predaje mu svu svoju energiju, te ako je ta energija veća od energije vezanja elektrona za atom, taj se elektron oslobađa iz atoma i ostavlja atom s viškom pozitivnog naboja. Znači dolazi do ionizacije, a foton nestaje. Taj proces se događa samo ako je energija fotona ispod određene granice, a ako je energija viša od granice tada se događa Comptonov efekt.

Kod Comptonovog procesa foton se sudara s elektronom u elektronskom omotaču atoma materije, predaje mu dio svoje energije, izbacuje ga iz omotača i tako ionizira atom, a foton odlazi raspršivši se pod određenim kutom i sa smanjenom energijom. Takvo raspršeno zračenje je velik problem u zaštiti od ionizirajućeg zračenja.

A proces tvorbe para elektron-pozitrona javlja se kada je energija fotona veća od određenog praga, a prolazom takvog fotona u blizini jezgre atoma materije foton jednostavno nestane i pojavi se par elektron-pozitron koji putuje u suprotnom smjeru odnoseći preostalu energiju u obliku kinetičke energije.



Sl. 8. Mehanizmi međudjelovanja fotona sa materijom

Izvor: www.nagysandor.eu

2.4. Vrste izvora

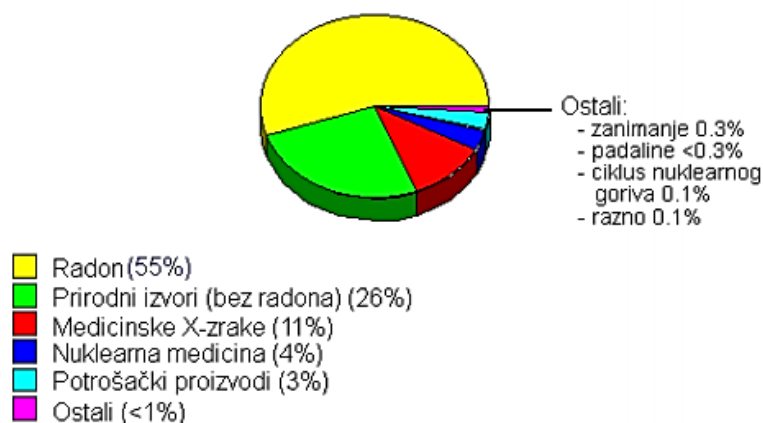
Pod pojmom izvor ionizirajućeg zračenja podrazumijeva se svaki uređaj, postrojenje ili tvar koja odašilje ili proizvodi ionizirajuće zračenje, uključujući nuklearni materijal.

Prema podrijetlu, izvori mogu biti prirodni i umjetno stvoreni.

U prirodne izvore ionizirajućeg zračenja pripadaju svemirska zračenja i prirodna zračenja radioaktivnih tvari. Svemirsko zračenje koje čini oko 13 % ukupnog prirodnog zračenja dijeli se na primarno svemirsko zračenje (sa Sunca i izvan Sunčevog sustava – čine ga čestice vrlo velikih energija) i sekundarno svemirsko zračenje (produkti reakcije Zemljine atmosfere s primarnim svemirskim zračenjem). U prirodna zračenja radioaktivnih tvari smatraju se sve one radioaktivne tvari koje nalazimo svuda u prirodi, tlu, vodi, stijenama, zraku i vegetaciji.

Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja su svi oni izvori koje je stvorio čovjek. 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, farmaceutske ustanove, ustanove za istraživanje, nuklearni reaktori i njihove pomoćne ustanove. Mnoge od ovih ustanova stvaraju radioaktivni otpad, a neke otpuštaju kontrolirane količine zračenja u prirodu. Radioaktivni materijali također se koriste i u raznim potrošačkim proizvodima kao što su digitalni satovi, umjetni zubi i detektori dima.

Izvori ionizirajućeg zračenja



Sl. 9. Izvori ionizirajućeg zračenja

Izvor: www.gromobrani.co.rs

Prema načinu nastanka izvore ionizirajućeg zračenja dijelimo na radioaktivne izvore i električne uređaje koji proizvode ionizirajuće zračenje (rendgenski uređaji, akceleratori i slično).

Radioaktivni izvor može biti zatvoreni i otvoreni radioaktivni izvor. Pod nazivom zatvoreni radioaktivni izvor smatramo radioaktivni izvor zatvoren u nepropusnoj ovojnici od neradioaktivne tvari tako da ne može doći u doticaj s okolišem. A pod nazivom otvoreni radioaktivni izvor smatramo radioaktivni izvor koji nije zatvoren ovojnicom, a može biti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju.

Radioaktivnim izvorom ne smatra se ona radioaktivna tvar koja sadrži radionuklide aktivnosti ili koncentracije aktivnosti manje od graničnih vrijednosti koje su utvrđene Pravilnikom o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima (NN 41/13). Također, zakonska regulativa kojom se regulira zaštita od ionizirajućeg zračenja ne odnosi se na prirodnu razinu ionizirajućeg zračenja podrijetlom iz svemira, Zemljine kore ili ljudi ako nije promijenjena ljudskom djelatnošću, osim u slučaju radnih aktivnosti.

2.5. Vrste ozračenja, fizikalne veličine i mjerne jedinice

S obzirom na to da li se izvor ionizirajućeg zračenja nalazi izvan tijela ili je na neki način uneseno u tijelo (gutanjem, udisanjem, intravenozno), ozračenje može biti vanjsko ili unutarnje.

Vanjsko ozračenje je u slučaju rada rendgenske cijevi ili akceleratora, a unutarnje ozračenje je u slučaju unošenja radioaktivnih tvari u organizam pojedinca kao dio dijagnostičkih postupaka na odjelima nuklearne medicine.

Bitno je naglasiti to da je tijelo pojedinca u koje je unesen radionuklid za svoju okolinu predstavlja vanjski izvor ionizirajućeg zračenja.

Također, vrlo važno kod ozračenja, jest znati kolika je energija koja se prolazom ionizirajućeg zračenja kroz materiju predaje toj materiji. Mjerna jedinica za energiju je Joul (J). Koriste se mnogo manje jedinice, kao što je Elektron volt (eV). Elektron volt predstavlja energiju koju dobiva jedan elektron ubrzanjem u električnom polju kad prijeđe razliku potencijala od 1 V ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$).

Svaka materija ima svoju masu, a prolaskom ionizirajućeg zračenja kroz tu materiju, po svakom kilogramu mase, zračenje preda energiju. Omjer predane energije i mase naziva se apsorbirana doza, D: $D = \frac{E_{predano}}{m}$, gdje je E predana energija, a m je masa.

Mjerna jedinica za apsorbiranu dozu jest J/kg, odnosno 1 Gray, oznake 1 Gy. Podijelimo li apsorbiranu dozu s vremenom u kojem je ta materija primila, dobiva se veličina koja se naziva brzina apsorbirane doze, a mjeri se u Gy/sat.

Također, nisu sva tkiva jednako osjetljiva na zračenje, neka su tkiva osjetljivija, a neka manje i to se mora uzeti u obzir kod ocjene štetnosti određene vrste ionizirajućeg zračenja. Naime, nije svejedno radi li se o alfa, beta ili gama zračenju. Kad je izvor alfa zračenja blizu ljudske kože, neće se osjetiti nikakve posljedice, jer se ionizacija dogodila u zraku između izvora i kože te nema apsorpcije energije u tijelu, već izvan tijela. Kod gama zračenja koje je blizu tijela, ionizirajuće zračenje (sastavljeno od fotona) se slabo apsorbira u zraku koji ima manju gustoću od tijela, te se većinom apsorbira u tkivo i organe. Ionizirajuće zračenje (sastavljeno od fotona) oslabljeno za apsorbiranu dozu izlazi čak iz tijela i prolazi dalje. Tako da je sasvim druga situacija ako progutamo ili udahnemo alfa ili beta, dakle čestični izvor, u odnosu ako progutamo ili udahnemo čisti gama izvor. Tad imamo unutarnje ozračenje. Energija koju odašilje alfa izvor u potpunosti se apsorbira u blizini samog izvora, tada imamo intenzivnu ionizaciju na malom volumenu i na tom istom volumenu oslobođenu svu energiju ionizirajućeg zračenja. Velika energija, mali volumen i velika apsorbirana doza uzrokuje veliku štetnost tog zračenja. Ako se pak proguta gama zračenje, on emitira fotone koji izlaze iz tijela te se samo mali dio energije zadržava u tijelu pa je i doza ozračenja manja; manje energije na veću masu, omjer je manji. Iz tog razloga se kod vanjskog ozračenja uvode koeficijenti modifikacije koji ovise o vrsti zračenja i nazivamo ih težinski koeficijenti zračenja, oznaka W_R . Težinski koeficijenti zračenja za određene vrste i energije zračenja navedeni su u Tab.1.

Tab. 1. Težinski koeficijenti zračenja [8]

| VRSTA I ENERGIJE ZRAČENJA | TEŽINSKI KOEFICIJENT ZRAČENJA, W_R |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Fotoni, svih energija | 1 |
| Elektroni i muoni, svih energija | 1 |
| Neutroni, energije <10 keV | 5 |
| Neutroni, energije 10 keV do 100 keV | 10 |
| Neutroni, energije >100 keV do 2 MeV | 20 |
| Neutroni, energije >2 MeV do 20 MeV | 10 |
| Neutroni, energije >20 MeV | 5 |
| Protoni, osim raspršenih, energije >2 MeV | 5 |
| Alfa čestice, fisijski fragmenti, teške jezgre | 20 |

Kada pomnožimo apsorbiranu dozu D s težinskim koeficijentom zračenja W_R dobivamo ekvivalentnu dozu H za pojedino tkivo: $H_T = W_R * D$.

Mjerna jedinica je 1 Sievert, oznake 1 Sv. Ekvivalentna doza odnosi se na pojedino tkivo ili organ. Svako tkivo različite je osjetljivosti na ionizirajuće zračenje, a izražava se preko težinskog koeficijenta tkiva, W_T .

Tab. 2. Težinski koeficijenti tkiva [8]

| TKIVO ILI ORGAN | TEŽINSKI KOEFICIJENT TKIVA, W_T |
|------------------------|-----------------------------------------------------|
| Gonade | 0,20 |
| Koštana srž | 0,12 |
| Debelo crijevo | 0,12 |
| Pluća | 0,12 |
| Želudac | 0,12 |
| Mjehur | 0,05 |
| Grudi | 0,05 |
| Jetra | 0,05 |
| Jednjak | 0,05 |
| Štitna žlijezda | 0,05 |
| Koža | 0,01 |
| Površina kosti | 0,01 |
| ostalo | 0,05 |

Zbroj umnožaka težinskog koeficijenta tkiva i ekvivalentne doze naziva se efektivna doza, E_T :

$$E_T = \sum_T H * W_T.$$

Mjerna jedinica je 1 Sv, efektivna doza dana je za cijelo tijelo.

Efektivna i ekvivalentna doza se izračunavaju, dok se apsorbirana doza mjeri.

2.5.1. Karakteristične doze zračenja

Postoji veliki broj različitih doza ionizirajućeg zračenja u radiologiji i radiološkoj fizici. U osnovi se razlikuju dvije vrste doza:

- fizikalna doza,
- biološka doza.

Fizikalna doza označava količinu zračenja koja je apsorbirana u određenom vremenu, a biološka doza podrazumijeva fizikalnu dozu, ali i različitu radiosenzitivnost (radioosjetljivost) ozračenog tkiva (težinski koeficijent tkiva, W_T), vremensku raspodjelu doze, vrstu zračenja i druge manje poznate čimbenike.

U radiologiji doze zračenja mogu biti:

- ekspozicijska doza,
- apsorbirana doza,
- ekvivalentna doza,
- efektivna doza,
- doze zračenja radioaktivnih izotopa.

Ekspozicijska doza jest količina zračenja kojoj je čovjek izložen. Definiira se kao broj iona oslobođenih pri zračenju neke mase tkiva. Stara mjerna jedinica je 1 Rentgen, oznake 1 R, a sada se upotrebljava mjerna jedinica 1 Coulomb po kilogramu, oznake 1 C/kg. 1 C/kg je količina zračenja koja u masi tkiva od 1 kilograma oslobodi količinu iona od 1 Coulomb. Ekspozicijske doze mjere se izravno dozimetrima.

Apsorbirana doza D , jest količina primljene (apsorbirane) energije na određenu masu tkiva. Mjerna jedinica koja se koristi za apsorbiranu dozu je 1 Gray, oznake 1 Gy, a označuje dozu zračenja od koje se apsorbira količina energije od 1 Joule-a u masi tkiva od 1 kilogram.

Ekvivalentnom dozom H , nazivamo umnožak apsorbirane doze i težinskog koeficijenta zračenja W_R . Mjerna jedinica je 1 Sivert, oznake 1 Sv. Ekvivalentna doza se odnosi na pojedino tkivo ili organ.

Efektivna doza E_T , je zbroj umnožaka težinskog koeficijenta tkiva i ekvivalentne doze. Mjerna jedinica je 1 Sv, a efektivna doza se odnosi na cijelo tijelo. Efektivna doza i ekvivalentna doza se izračunavaju, a apsorbirana doza se mjeri.

Doza zračenja radioaktivnog izotopa označava broj raspada atoma izotopa u jedinici vremena. Stara mjerna jedinica je bila 1 Curie, a sada se koristi mjerna jedinica 1 Becquerel, oznake 1 Bq. 1 Bq označuje jedan raspad u sekundi (s^{-1}).

Doze izloženosti u radiologiji ovise o:

- vrsti radiološke pretrage,
- širini potrebnog snopa zračenja,
- volumenu ozračenog dijela tijela,
- intenzitetu i prodornosti zračenja,
- vremenskom trajanju snimanja ili prosvjetljivanja,
- vrsti uređaja kojim se provodi radiološka pretraga,
- načinu rada.

Doze zračenja koje prima čovjek, ili bi mogao primiti u nekim predviđenim ili nepredviđenim situacijama, razvrstavaju se još i kao:

- prirodne doze,
- dopuštene doze,
- granične doze,
- kritične,
- natkritične doze.

2.5.1.1. Prirodne doze

Čovjek je prilagođen prirodnom zračenju, koje se na površini Zemlje mijenja u dosta širokom području vrijednosti. Prirodna doza potječe od kozmičkog zračenja (od 20 do 30 %) i zračenja okoline (od 79 do 80 %). Prirodna ekvivalentna doza procjenjuje se na oko 1 do 3

mSv godišnje. Čovjek je priviknut na takvu dozu i vjeruje se da ne uzrokuje znatnije biološke učinke.

2.5.1.2. Dopuštene doze

Doze koje čovjek prima zbog ljudskog djelovanja i za koje se vjeruje da ne uzrokuju znatnije biološke učinke. Uvijek su manje od graničnih doza, propisanih za pojedine skupine ljudi, pojedince ili za pojedine situacije.

Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICPR) preporučila je princip ALARA (eng. As low as it is reasonably achievable), što znači da sve doze moraju biti toliko male koliko je to razumno s obzirom na ekonomske i društvene činitelje.

2.5.1.3. Granične doze

Doze su zakonskim aktima propisane vrijednosti dozimetrijskih veličina i koje se ne smiju prekoračiti ljudskim djelovanjem. Ne odnose se na prirodno ozračivanje ili ozračivanje u medicinske svrhe. Od nekoliko granica kojim se ograničavaju doze u pojedinim situacijama, za širu primjenu su važne primarne granice doza koje se odnose na pojedinca, i autorizirane granice doza, u pravilu niže od primarnih koje propisuju državne ustanove, nadležne za rad s izvorima ionizirajućih zračenja.

Tab. 3. Granične doze za osoblje profesionalno izloženo ionizirajućem zračenju [7]

| VRSTA DOZE | NAČIN OZRAČIVANJA | VRIJEDNOST |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------|
| ZA STOHAŠTIČKE UČINKE | | |
| Individualna godišnja granica efektivne ekvivalentne doze | Ujednačeno, cijelo tijelo | 50 mSv |
| Efektivna ekvivalentna doza | neujednačeno | ≤ 50 mSv |
| Godišnja granica za pojedini organ ili tkivo | | |
| - očne leće i krvotvorni organi | Neujednačeno | 150 mSv |
| - ostali organi i tkiva | neujednačeno | 500 mSv |
| ZA NESTOHAŠTIČKE UČINKE | | |
| Individualna godišnja efektivna ekvivalentna doza | | |
| - očne leće i krvotvorni organi | | 150 mSv |
| - ostali organi i tkiva | | 500 mSv |

Tab. 4. Granične doze zračenja za stanovništvo [7]

| VRSTA DOZE | NAČIN OZRAČIVANJA | VRJEDNOST |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|
| Individualna godišnja granica efektivne ekvivalentne doze za stanovnike zbog zračenja iz svih tehničkih izvora | | 0,2 mSv |
| Individualna godišnja granica ekvivalentne doze za stohastičke učinke, za skupinu pojedinaca iz stanovništva | Ujednačeno, cijelo tijelo | 5 mSv |
| Individualna srednja godišnja efektivna ekvivalentna doza za tu skupinu | Ujednačeno, cijelo tijelo | $\leq 0,5$ mSv |
| Efektivna ekvivalentna doza | Neujednačeno | ≤ 5 mSv |
| Godišnja granica ekvivalentne doze za pojedini organ ili tkivo | Neujednačeno | 5 mSv |
| Srednja godišnja efektivna ekvivalentna doza u toku života za pojedinog stanovnika, dugogodišnje izlaganog blizu granica godišnje efektivne ekvivalentne doze | | ≤ 1 mSv |

2.5.1.4. Kritične doze

Doze koje uzrokuju već teška oštećenja zdravlja i prve smrtne slučajeve. Danas se smatra da su za čovjeka kritične doze one koje su veće od 250 mSv. Propisano je da se nakon jednokratno primljene tolike doze mora obaviti specijalistički liječnički pregled.

2.5.1.5. Natkritične doze

Sve doze više od kritične smatraju se vrlo opasnim, naročito ako su primljene jednokratnim ozračivanjem, u kratkom vremenu. Do takvih ozračivanja dolazi pri teškim nesrećama u radu s izvorima zračenja i u slučaju upotrebe nuklearnog oružja. Procjenjuje se da nakon doza viših od 3 Sv svi ozračeni teško obolijevaju, a nakon doza viših od 6 Sv svi koji su ozračeni umiru u toku nekoliko dana. Zato se ta doza smatra pragom smrtnosti. Smrtnost je mnogo manja ako nije ozračeno cijelo tijelo, posebno ako nisu ozračeni trup i glava. Pri ozračivanju udova pri radu s izvorima zračenja, javljaju se teška oštećenja kože koja mogu prerasti u maligne tumore, ali se mogu i izliječiti. Iznad 1 Sv, zračenje uzrokuje promjenu slike krvi, a ispod 1 Sv nisu vidljive značajnije promjene slike krvi, ali je veliki rizik oboljenja od karcinoma.

2.6. Načini zaštite

Zaštita od ionizirajućih zračenja je skup svih mjera i postupaka kojima se može smanjiti izlaganje zračenju u tijeku njegove poželjne ili potrebne primjene. Problematiku zaštite od zračenja prati cijeli niz stručnih međunarodnih organizacija, koje redovito ili periodički izdaju svoje preporuke. U skladu s tim preporukama donesen je i naš Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja s odgovarajućim popratnim Pravilnicima za provođenje zaštite od zračenja.

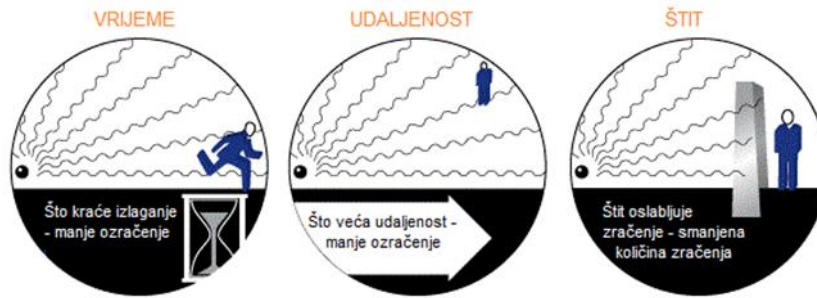
Postoje tri osnovna načina zaštite od ionizirajućeg zračenja, a to su:

- dovoljna udaljenost od izvora,
- što kraće vrijeme izlaganja,
- korištenje štita.

Osobina ionizirajućeg zračenja na kojoj se temelji važan dio zaštite od ionizirajućeg zračenja je ta da intenzitet ionizirajućeg zračenja opada s kvadratom udaljenosti. Odnosi intenziteta zračenja oznake I i udaljenosti od izvora ionizirajućeg zračenja oznake d dani su sljedećim formulama: $d = \frac{l}{1^2}$; $2d = \frac{l}{2^2}$; ...

Poveća li se udaljenost od izvora ionizirajućeg zračenja dva puta, intenzitet će se smanjiti četiri puta. Ozračenje pojedinca ovisi i o vremenu izlaganja ionizirajućem zračenju. Ozračenje je proporcionalno vremenu izlaganja, odnosno što je neki pojedinac duže izložen ionizirajućem zračenju, toliko puta će biti veće njegovo ozračenje, i obrnuto.

Ionizirajuće zračenje prolazeći kroz materiju slabi, te se iz tog razloga može bitno smanjiti količina zračenja kojem je pojedinac izložen, umetanjem štita između izvora i pojedinca. Važan je i materijal od kojeg je štit napravljen, njegova debljina, a i vrsta ionizirajućeg zračenja te način korištenja samog štita. Štit može biti betonski zid, sloj olova, zaštitni paravani ili pregače, naočale.



Sl. 10. Načini zaštite od ionizirajućeg zračenja

Izvor: www.nde-ed.org

2.6.1. Zakonodavna zaštita

Zakonodavna zaštita od ionizirajućeg zračenja je veoma važna jer strogim zakonskim propisima i podzakonskim aktima uređuje cjelokupnu problematiku zaštite od ionizirajućih zračenja.

Temeljni akti zakonodavne zaštite od ionizirajućih zračenja u Republici Hrvatskoj su:

- Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i sigurnosti izvora ionizirajućeg zračenja (NN 64/2006)
- Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućih zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 58/2018)
- Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti (NN 66/2018)
- Pravilnik o ustroju i provedbi mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja (NN 28/2015)
- Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u medicini i dentalnoj medicini (NN 89/2013)
- Državni plan i program mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja te intervencija u slučaju izvanrednog događaja (NN 49/2008)

Sve navedeno je usklađeno s preporukama ICRP te zahtjevima Europske zajednice.

2.6.2. Fizikalno – tehnička zaštita

Zakonom je definirana i fizikalno-tehnička zaštita koja uključuje:

- nadzor nad izvršavanjem zakonskih propisa u svezi s projektiranjem i izgradnjom radioloških ustanova, odjela i prostorija u kojima će se raditi s izvorima ionizirajućih zračenja,
- projektiranje i izgradnju dijagnostičkih prostorija,
- zaštitu zidova, prozora i vrata radioloških prostorija,
- zaštitu podova.

2.6.3. Kemijska zaštita

Kemijski radioprotektori su kemijske tvari koje smanjuju štetne biološke učinke zračenja. U radioterapiji tumora koriste se cistein, cistamin, amifostin. Mehanizam djelovanja se temelji na tzv. „čišćenju“ slobodnih radikala i na popravljanju oštećenja nastalih djelovanjem slobodnih radikala.

Kemijski radioprotektori uzimaju se prije izlaganja ionizirajućeg zračenja, a najnovije generacije kemijskih radioprotektora i nakon izlaganja zračenju.

2.6.4. Biološka zaštita

Podizanje biološke otpornosti organizma na zračenje postiže se vitaminima, šećerima, čajevima s taninom, umjetnim snižavanjem temperature dijelova tijela izloženih većim dozama zračenja, umjetnom “anemizacijom” (smanjivanjem prokrvljenosti, umjetnom anoksijom) organa ili dijelova tijela izloženih većim dozama zračenja, te mirovanjem, dobrom ishranom i duševnim mirom i kraće radno vrijeme i duži godišnji odmori korišteni u dva navrata (ljetni i zimski) za profesionalno osoblje u radiologiji, radioterapiji i nuklearnoj medicini.

Znanstveno – istraživačkim radovima na tematiku teorijskih i praktičnih problema ionizirajućeg zračenja na ljudski organizam mogu se izbjeći samo one opasnosti koje dobro poznajemo. Radiobiološka znanstvena istraživanja dovode do stalnog smanjivanja dopuštenih doza zračenja za profesionalno osoblje i stanovništvo kojima mogu biti izloženi mjesečno, tromjesečno, godišnje, itd.

3. RADIOBIOLOGIJA

Radiobiologija je znanstvena disciplina koja se bavi proučavanjem utjecaja zračenja na živa bića, također još se naziva radijacijska biologija, a spada u granu biofizike koja proučava djelovanje i učinke različitih vrsta zračenja na žive sustave, od stanične razine do cijelog organizma ili populacije. Radiobiologija je interdisciplinarna grana radiologije, uključuje razne znanstvenike i stručnjake iz područja fizike, biologije, radiološke fizike, radiološke kemije, genetike, fiziologije, patologije i slično. Zajednička istraživanja i dostignuća ove discipline omogućila su razvijanje i organiziranje zaštite od zračenja te razvoj medicinske primjene zračenja.

Još uvijek postoje brojne nepoznanice u vezi različitih bioloških učinaka zračenja, a zbog svakodnevne primjene zračenja u medicinske svrhe veliki broj stanovništva je izložen različitim dozama i vrstama zračenja. Za svođenje nepoželjnih efekata i učinaka na najmanju moguću mjeru važno je poznavati prirodu ionizirajućeg zračenja, fizikalna svojstva, biološke značajke, siguran način upotrebe te načine pravovremene prevencije i zaštite od ionizirajućeg zračenja.

Biološki nadzor (biomonitoring) važan je dio zdravstvenog nadzora osoba koje su profesionalno izložene različitim fizikalnim i kemijskim mutagenima ili kancerogenima. Provodi se tako da se mjere različiti biološki pokazatelji koji upućuju na najranije, još uvijek popravljive, biološke učinke koji prethode pojavi zloćudnih i drugih bolesti.

3.1. Čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma

Na stupanj oštećenja organizma zbog ionizirajućeg zračenja ovisi o nekoliko čimbenika. U velikoj mjeri ionizirajuće zračenje, u biološkim sustavima, ovisi o količini apsorbirane energije i o njejoj prostornoj raspodjeli.

Osjetljivost pojedine vrste tkiva ovisi o diobi stanica u tom tkivu. Mišićne, živčane i koštane stanice, koje tvore mišićno, živčano i koštano tkivo, vrlo se rijetko dijele, gotovo nikada, te su stoga slabo osjetljive na izloženost ionizirajućem zračenju. Suprotno njima, nediferencirane stanice odnosno matične stanice koje susrećemo u krvotvornom tkivu i spolnim žlijezdama, te stanice kože i sluznica koje se neprestano dijele, mnogo su osjetljivije na izloženost ionizirajućem zračenju. Rizik od izloženosti ionizirajućem zračenju zbog toga nije isti za sve

dijelove ljudskog tijela i varira od organa do organa. To je izraženo kroz fizikalnu veličinu koju nazivamo težinski koeficijent za pojedino tkivo ili organ (W_T), a veličina koja uvažava sve čimbenike jest efektivna doza (E_T).

Brzina primanja doze također je jedan od važnih čimbenika koji utječu na stupanj oštećenja organizma od izloženosti ionizirajućem zračenju. Ako je brzina doze dovoljno mala ili je primljena u dijelovima između kojih su razmaci dovoljno dugi, tkivo će biti u mogućnosti normalnom diobom (mitozom) nadomjestiti izgubljene stanice.

Oštećenje ovisi i o veličini tijela koji je bio ozračen, te će učinak zračenja na tijelo biti manji što je ozračeniji manji dio. Na stupanj oštećenja organizma utječe i linearni prijenos energije (LET). Visoko LET zračenje za istu ukupnu dozu je letalnije od niskog LET zračenja, jer visoko LET zračenje deponira veće količine energije po jedinici tvari kroz koju prolazi.

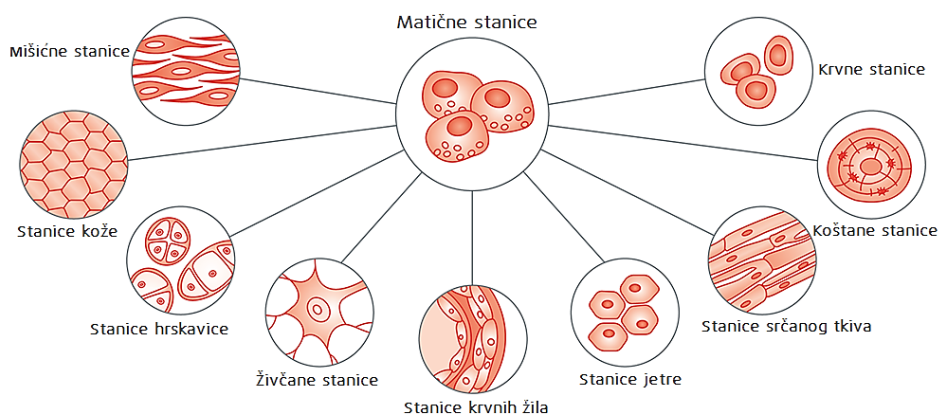
Naravno, vrlo važan čimbenik koji utječe na stupanj oštećenja organizma od izlaganja ionizirajućem zračenju je životna dob i spol osobe. Mlađe osobe su u pravilu osjetljivije na izlaganje zračenju od starijih osoba, pri čemu je fetus najosjetljiviji, a žene su nešto manje osjetljive na zračenje od muškaraca.

3.2. Učinci ionizirajućeg zračenja na stanicu

Stanica ljudskog organizma ima promjer od oko 5-6 mikrometara, a u usporedbi s veličinom atoma, stanice su 100 000 puta veće od atoma. Znanstvenici pretpostavljaju da ljudsko tijelo u prosjeku ima oko 100 bilijuna stanica. Sve stanice u tijelu nisu jednake, one se međusobno razlikuju po svom:

- sastavu,
- obliku,
- ulozi koju obavljaju.

Smatra se da ljudsko tijelo sadrži oko 200 tipova specijaliziranih, to jest, različitih stanica. Djelovanjem ionizirajućeg zračenja na stanicu, u njima nastupaju promjene i/ili oštećenja.



Sl. 11. Tipovi matičnih stanica čovjeka iz kojih se specijaliziraju sve vrste stanica.

Izvor: www.biosave.hr

Izlaganje stanica ionizirajućem zračenju dovodi do unosa energije u stanice, što uzrokuje niz promjena ovisno o količini i vrsti energije zračenja. Ionizirajuće zračenje, bilo ono unutarnje ili vanjsko, mora biti apsorbirano da bi imalo biološki učinak. Primarno nastaju fizikalni učinci. Temeljni nespecifični izravni fizikalni učinci ionizirajućeg zračenja na stanicu su ionizacija (u interakciji zračenja i atoma i molekula koje su strukturni dijelovi stanica) i ekscitacija i kao posljedica toga dolazi do sekundarnih kemijskih reakcija.

Promjene u stanici mogu biti fizikalne i kemijske. Fizikalne promjene u stanici nastaju pod utjecajem apsorbirane energije zračenja. Zbog količine energije koju zračenje (čestice, fotoni) predaje stanicama, nastaju određeni fizikalni procesi:

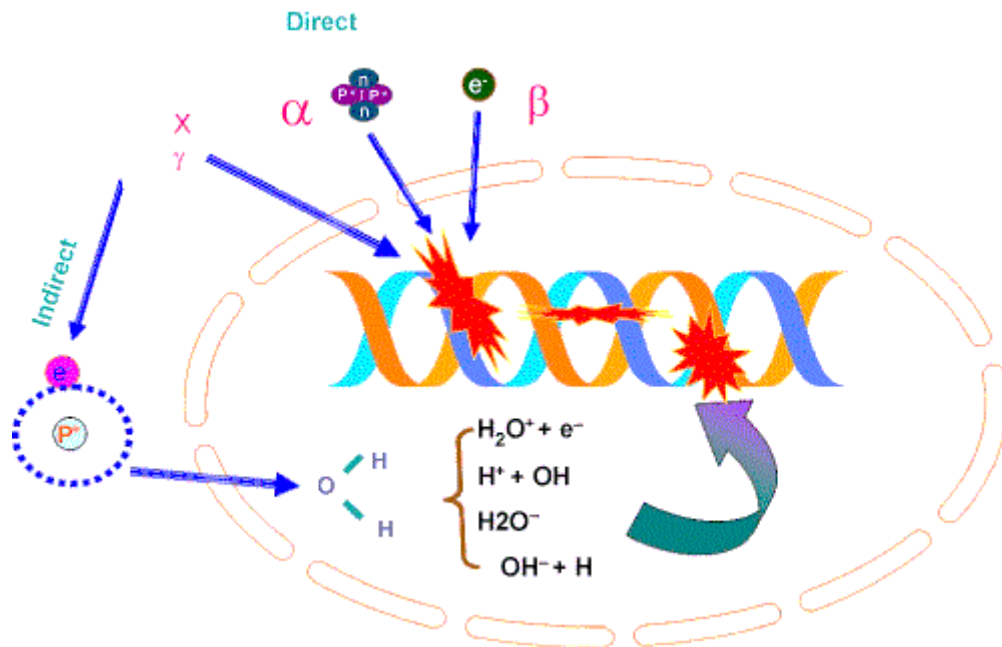
- ionizacija,
- anihilacija pozitrona,
- nastanak karakterističnog zračenja,
- neznatno povećanje temperature tkiva.

Sve te promjene odvijaju se u vrlo kratkom vremenu, oko 10^{-13} ms.

Kemijske promjene u stanicu nadovezuju se na fizikalne promjene. Ionizirani atomi mijenjaju kemijska svojstva, a ako je atom sastavni dio velike molekule, ionizacija može dovesti do prekida molekule ili delokacije atoma u molekuli, a time se mijenjaju svojstva molekule. Molekula može biti oštećena tako da joj se promjeni funkcija ili da izgubi funkciju u životu stanice, što može rezultirati ozbiljnim oštećenjem ili smrću stanice.

Postoje dvije vrste mogućnosti oštećenja stanica od ionizirajućeg zračenja:

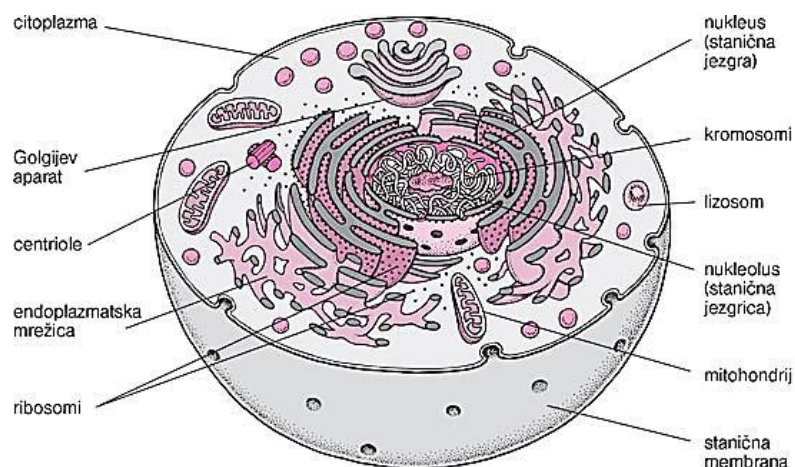
- izravna oštećenja - izravno djelovanje,
- neizravna oštećenja - neizravno djelovanje.



Sl. 12. Direktna i indirektna djelovanja

Izvor: www.omicsonline.org

Izravna oštećenja stanica jesu zapravo oštećenja vitalnih struktura stanica (karioreksa – nekroza jezgre, karioliza – propadanje stanične jezgre, pucanje stanične membrane i slično), a neizravna oštećenja stanica nastaju zbog djelovanja zračenja na molekule vode u stanicama (čovjekovo tijelo sastoji se od oko 75-85 % vode).



Sl. 13. Stanica i stanični organeli

Izvor: www.msd-prirucnici.placebo.hr

Djelovanje zračenja na molekule vode glavni je način oštećenja živih stanica u dijagnostičkoj i intervencijskoj radiologiji, a naziva se neizravnim djelovanjem zračenja. Preko 95 % oštećenja u dijagnostičkoj primjeni zračenja nastaje na ovaj način.

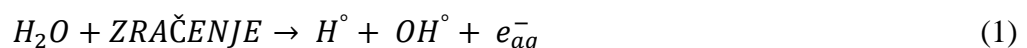
Djelovanje zračenja na organske makromolekule i vitalne strukturne dijelove stanice je manje značajan način oštećenja stanica i naziva se izravnim djelovanjem zračenja na stanicu. Oštećenja su proporcionalna količini (dozi) zračenja. Veće doze zračenja oštećuju i mehanizme za popravak, pa su nastala oštećenja ireverzibilna (smrt molekula i stanica). Ova se činjenica koristi u radioterapiji tumora.

3.2.1. Učinci na razini molekula u stanicama

Stanice su osnovni građevni element tkiva i upravo u stanicama dolazi do različitih bioloških i kemijskih promjena nakon izlaganja ionizirajućem zračenju. Stanice su građene od molekula, pretežito od:

- 80 % vode,
- 15 % proteina,
- 2 % lipida,
- 1 % ugljikohidrata,
- 1 % nukleinskih kiselina,
- 1 % ostale molekule.

Najjednostavnije i najzastupljenije su molekule vode, a proteini, lipidi i ugljikohidrati su organske molekule, koje se zbog svoje velike veličine nazivaju makromolekule. U makromolekule spadaju i nukleinske kiseline koje su sastavljene od stotina i tisuća atoma. Zbog najveće zastupljenosti u tijelu i stanicama, najveća je mogućnost za interakciju ionizirajućeg zračenja s molekulama vode, te se najveći dio zračenja apsorbira u molekulama vode jer su najbrojnije. Također, sve bitne funkcije u ljudskom tijelu odvijaju se pomoću molekula vode, pa svako unošenje energije od strane tih molekula dovodi do poremećaja koji rezultiraju raznim oštećenjima.



Djelovanjem zračenja na molekulu vode nastaju slobodni radikali H° i OH° koji su vrlo nestabilni i u nekoliko mikrosekundi ulaze u različite kemijske reakcije s okolnim molekulama. Vežanje takvih radikala na molekule koje su od vitalnog i bitnog značaja za

funkcioniranje stanice (metabolički procesi) dolazi do poremećaja funkcija. Djelovanjem zračenja na molekule vode nastaje radioliza, a stvoreni slobodni radikali raskidaju dijelove makromolekula (npr. enzima) i time molekule gube biokemijsku aktivnost i funkciju što rezultira biološkim oštećenjem stanice (gubitak funkcije ili smrt stanice).

Proteini su makromolekule građene od dugih lanaca aminokiselina koje su povezane peptidnim vezama. U građama proteina postoji ukupno 22 aminokiseline, čijom kombinacijom nastaju različite vrste proteina. Uloga proteina je:

- građevni element i potpora organizmu (mišići),
- funkciju kontrole biokemijskih procesa u organizmu,
- hormoni - koji kontroliraju rast i razvoj organizma,
- antitijela - koja imaju primarnu ulogu obrane organizma od infekcija i bolesti.

Lipidi su organske makromolekule građene od jedne molekule glicerola i tri molekule masne kiseline. Nalaze se u svim tjelesnim tkivima i glavni su strukturni element staničnih membrana. Njihova uloga u organizmu je depo energije i toplinska izolacija. Oštećenja lipida nastaju djelovanjem slobodnih radikala tek pri većim dozama ionizirajućeg zračenja.

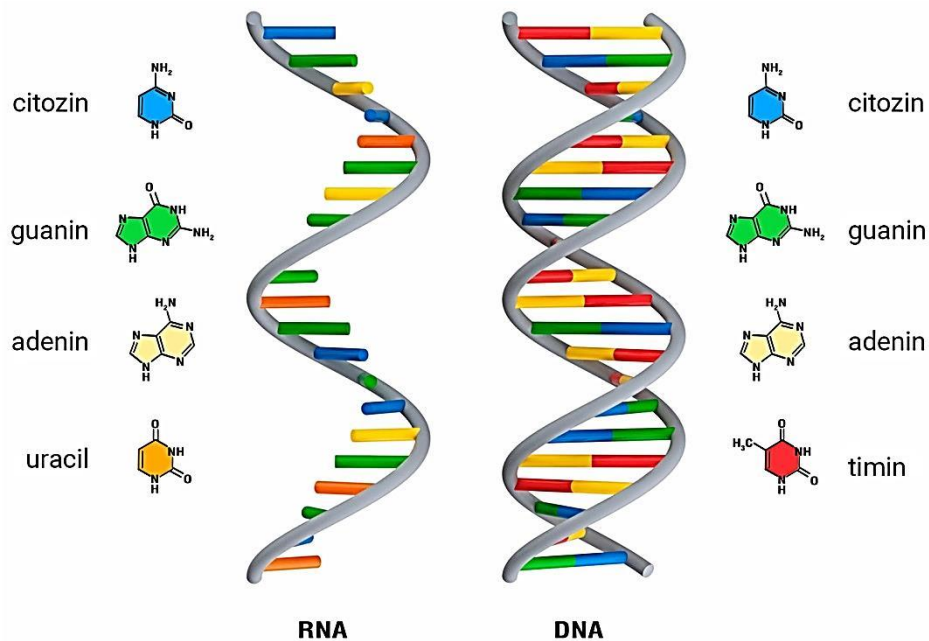
Ugljikohidrati su makromolekule građene od jednostavnih šećera ili monosaharida. Nazivaju se još i saharidima, a dijele se u disaharide, oligosaharide i polisaharide. Njihova uloga u organizmu jest da omogućuju stanični metabolizam, odnosno, predstavljaju energetska goriva za stanice. Oštećenje ugljikohidrata zbog djelovanja ionizirajućeg zračenja predstavlja direktni gubitak „goriva“ za normalno odvijanje staničnog metabolizma, a samim time i smrt stanice.

Nukleinske kiseline su makromolekule koje sudjeluju u pohrani, prijenosu i ekspresiji genetske informacije. To su linearni polimeri koji se sastoje od različitih nukleotida poredanih u genetski predodređenom slijedu koji je nositelj njihove uloge informacijskih makromolekula. Nukleotidi su međusobno povezani preko fosfatne skupine.

Dva osnovna tipa nukleinskih kiselina su:

- DNK (deoksiribonukleinska kiselina) – sadrži deoksiribožu, spremište je genetske informacije, uglavnom je sadržana u jezgri,
- RNK (ribonukleinska kiselina) – sadrži ribožu, sudjeluje u ekspresiji informacija tijekom sinteze proteina, stvara se u jezgri, nalazi se u citoplazmi, javlja se u tri oblika: mRNA, tRNA i rRNA.

Diobom odnosno replikacijom DNA molekule uvijek nastaju dvije jednake molekule s istim redoslijedom nukleotida. Molekula RNA je molekula koja prenosi kod s DNA za sintezu novih molekula proteina u stanici. Poremećaj redoslijeda aminokiselina pod utjecajem ionizirajućeg zračenja navode se ribosomi na stvaranje drugačijih odnosno „pogrešnih“ proteina, koji su za stanicu nepotrebni ili štetni.



Sl. 14. Molekule DNA i RNA

Izvor: www.edutorij.e-skole.hr

3.2.1.1. Mehanizam oštećenja i popravka DNA molekule

Molekula DNA ili deoksiribonukleinska kiselina je nukleinska kiselina u obliku dvostruke spiralne zavojnice. Ova molekula sadržava genetski kod ili upute za razvoj staničnih oblika života. DNA je dugačak polimer nukleotida i kodira redoslijed aminokiselina u građi proteina. Sastavljena je od nukleotida koji su građeni od pentoze – deoksiriboze, fosfatne skupine i dušične baze. Dušične baze kod DNA mogu biti: adenin, citozin, gvanin i

timin. U eukariotskim organizmima kao što su protisti, gljive, biljke i životinje, većina DNA je smještena u staničnoj jezgri stanice.

U molekuli DNA, zbog izlaganja kemikalijama i zračenju, događaju se različite kemijske promjene, bilo spontane ili kao posljedice tog izlaganja. DNA je jedinstvena, trajna kopija staničnog genoma. Promjene na strukturi DNA imaju znatno veće posljedice nego promjene na nekim drugim komponentama stanica (proteini, lizosomi). Zato su precizna replikacija DNA i popravak oštećenja DNA nužni za održavanje genetičke informacije, te osiguranje točnog prijenosa genetičke informacije s roditelja na potomstvo.

Ionizirajuće zračenje molekulu DNA može oštetiti neizravno, putem slobodnih radikala ili izravnom interakcijom. Izlaganje stanice ionizirajućem zračenju, dolazi do unosa energije u stanicu, što uzrokuje niz kemijskih i bioloških promjena strukturnih elemenata stanice. Te promjene ovise o količini i vrsti prenesene energije ionizirajućim zračenjem.

Svi današnji živi organizmi su rezultat dugotrajne evolucije, a tijekom evolucije organizmi su bili izloženi brojnim kemijskim i fizičkim čimbenicima među koje se ubraja i ionizirajuće zračenje. Takva izloženost uzrokuje svakodnevna oštećenja genoma. Zbog toga, da bi stanice održale svoj integritet, morale su razviti mehanizme za popravak oštećenja DNA. Mehanizme za popravak oštećenja molekula DNA možemo podijeliti na:

- izravni obrat kemijske reakcije odgovorne za oštećenje DNA,
- uklanjanje oštećenog dijela genoma, nakon čega slijedi njegova zamjena novosintetiziranom DNA.

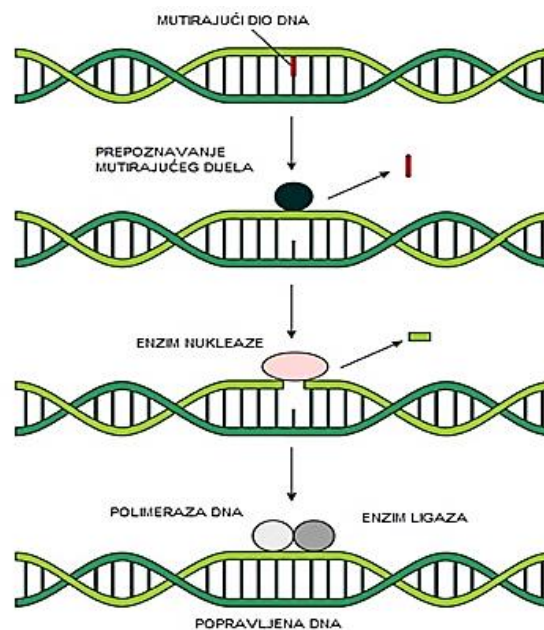
Također, u slučaju da oba mehanizma, iznad navedena, zataje, evolucija je razvila dodatne mehanizme koji stanici pomažu da se nosi s oštećenjima. Većina oštećenja DNA popravljaju se tako da se ukloni oštećena baza te se ponovno sintetizira uklonjeno područje (izravni obrat oštećenja DNA). Ova metoda popravka učinkovita je za određeni tip oštećenja, jer popravak izrezivanjem oštećenog dijela je općenitiji način popravka široke skupine kemijskih promjena molekule DNA.

Mehanizmi popravka DNA molekule sastoje se od tri koraka:

- izrezivanje – oštećeni dio bude prepoznat i uklonjen pomoću specijaliziranih enzima nukleaze, ostavljajući pukotinu od 2-4 nukleotida, koja se popunjava sintezom novog lanca ili nukleotida korištenjem neoštećenoga komplementarnog lanca kao kalupa;
- sinteza – polimeraza nadomješta izrezani dio s novim dijelom načinjenim na osnovi informacije uzete s neoštećenog lanca DNA,
- spajanje – djelovanjem enzima ligaze nosintetizirani lanac se spaja s ostatkom DNA.

Mehanizmi popravka DNA izrezivanjem mogu se podijeliti u tri tipa, a omogućuju stanicama da se bore sa širokim spektrom različitih oštećenja DNA:

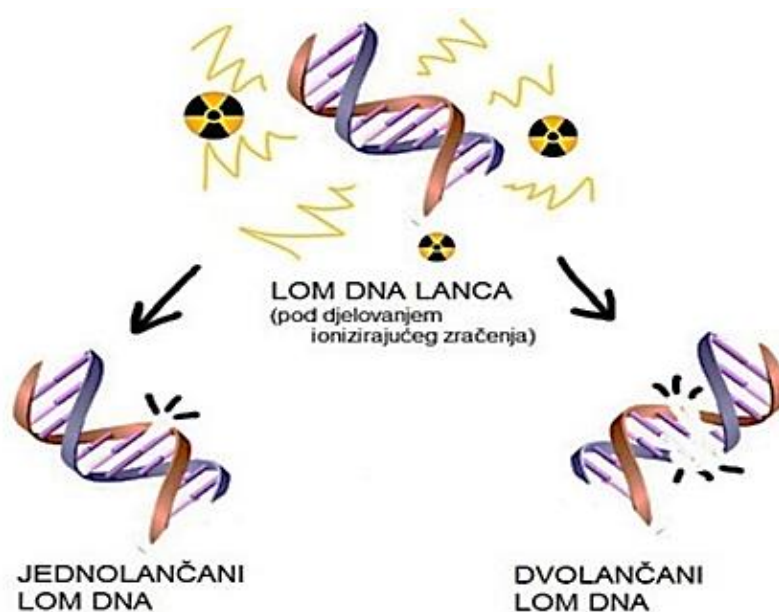
- izrezivanje baze,
- izrezivanje nukleotida,
- popravak pogrešno sparenih baza.



Sl. 15. Mehanizam popravka oštećenog dijela DNA

Izvor: www.e-biotechnologia.pl

Razlikujemo jednolančani lom DNA i dvolančani lom DNA. Prolaskom ionizirajućeg zračenja kroz materiju, zračenje gubi odnosno predaje energiju materiji, pa gubitak energije u blizini DNA najčešće uzrokuje oštećenje samo jednog lanca i to se naziva jednolančani lom DNA. Postoji vjerojatnost da događaj gubitka energije zračenja ili više takvih događaja u blizini DNA uzrokuje oštećenje oba lanca i to se naziva dvolančani lom DNA.

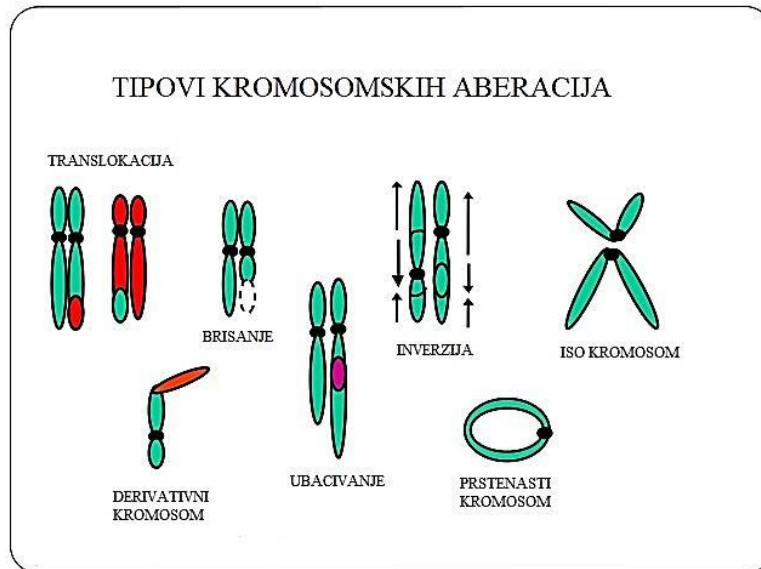


Sl. 16. Oštećenje DNA ionizirajućem zračenjem

Izvor: www.biogeekery.wordpress.com

Oštećenje samo jednog lanca može se popraviti brzo i efikasno bez grešaka, ukoliko ne utječu drugi čimbenici na popravak. To je moguće jer enzimatski sustavi, tijekom procesa popravka, koriste dijelove na neoštećenom lancu kao kalupe za izradu novog dijela za zamjenu oštećenog. Ako su prekinuta oba lanca, za vrijeme potrebno stanici da popravi jednolančani lom, a nastali lomovi su na udaljenosti manjoj od tri para baza, tada su zapravo nastali dvolančani lomovi. Dio tih lomova će se popraviti, ali popravci neće biti bez grešaka.

Lomovi lanaca nastaju na spojevima šećera i fosfornih veza ili između šećera i purinskih ili pirimidinskih baza. Posljedice toga su oštećenja enzima koji kontroliraju i upravljaju procesima sinteze i reduplikacije. Pogreška u popravku dvolančanog loma dovodi do nastanka različitih tipova kromosomskih aberacija kao što su: terminalnih delecija, translokacija, prstenastih kromosoma te acentričnih i dicentričnih kromosoma. Prstenasti, acentrični i dicentrični kromosomi su ujedno najspecifičnije kromosomske aberacije uzrokovane ionizirajućim zračenjem.



Sl. 17. Kromosomske aberacije

Izvor: www.slideshare.net

Oštećenja stanica su proporcionalna dozi zračenja. Veće doze zračenja oštećuju i mehanizme za popravak pa time nastaju ireverzibilna oštećenja koja posljedično uzrokuju smrt stanice.

3.2.2. Učinci na razini staničnih organela

Stanična membrana je polupropusni lipidni dvosloj izgrađen od bjelančevina i lipida koji odvaja unutarstanični dio od izvanstaničnog okruženja. Tvari se u stanicu i iz stanice propuštaju prema principima osmoze, difuzije i aktivnog prijenosa. Oštećenja stanične membrane zbog djelovanja ionizirajućeg zračenja očituje se pucanjem stanične membrane koja postaje abnormalno propusna.

Ribosomi su organeli koji se nalaze u osnovnoj tvari stanice. Sastoji se od bjelančevina i RNK, a služi za prevođenju genetske upute za sintezu proteina. Djelovanjem ionizirajućeg zračenja na stanične ribosome, oni se međusobno sljepljuju i time sprječavaju rast stanice zbog manjka sinteze potrebnih proteina.

Mitohondrij je stanični organel eukariotskih stanica koji služi kao izvor stanične energije. Cilindrične su strukture i sastoji se od dvije membrane unutar kojih su mitohondrijske membrane na kojima se obavlja Krebsov ciklus. Djelovanjem ionizirajućeg zračenja na mitohondrije u stanici, oni bujaju, smanjuju se mitohondrijske membrane i time se oštećuju oksidacijski procesi stanične energije.

Endoplazmatski retikulum proizvodi i transportira tvari. Dijeli se na hrapavi i glatki endoplazmatski retikulum. Hrapavi endoplazmatski retikulum služi za sintezu proteina, dok glatki endoplazmatski retikulum sudjeluje u sintezi lipida, razgradnji otrova i stvaranju vitamina D. Djelovanjem ionizirajućeg zračenja na endoplazmatski retikulum u stanici, on se deformira i proširuje što dovodi do oštećenja sinteze proteina u stanici i posljedično, kao kod oštećenja ribosoma, narušena je ravnoteža sinteze potrebnih proteina i time se sprječava rast stanice.

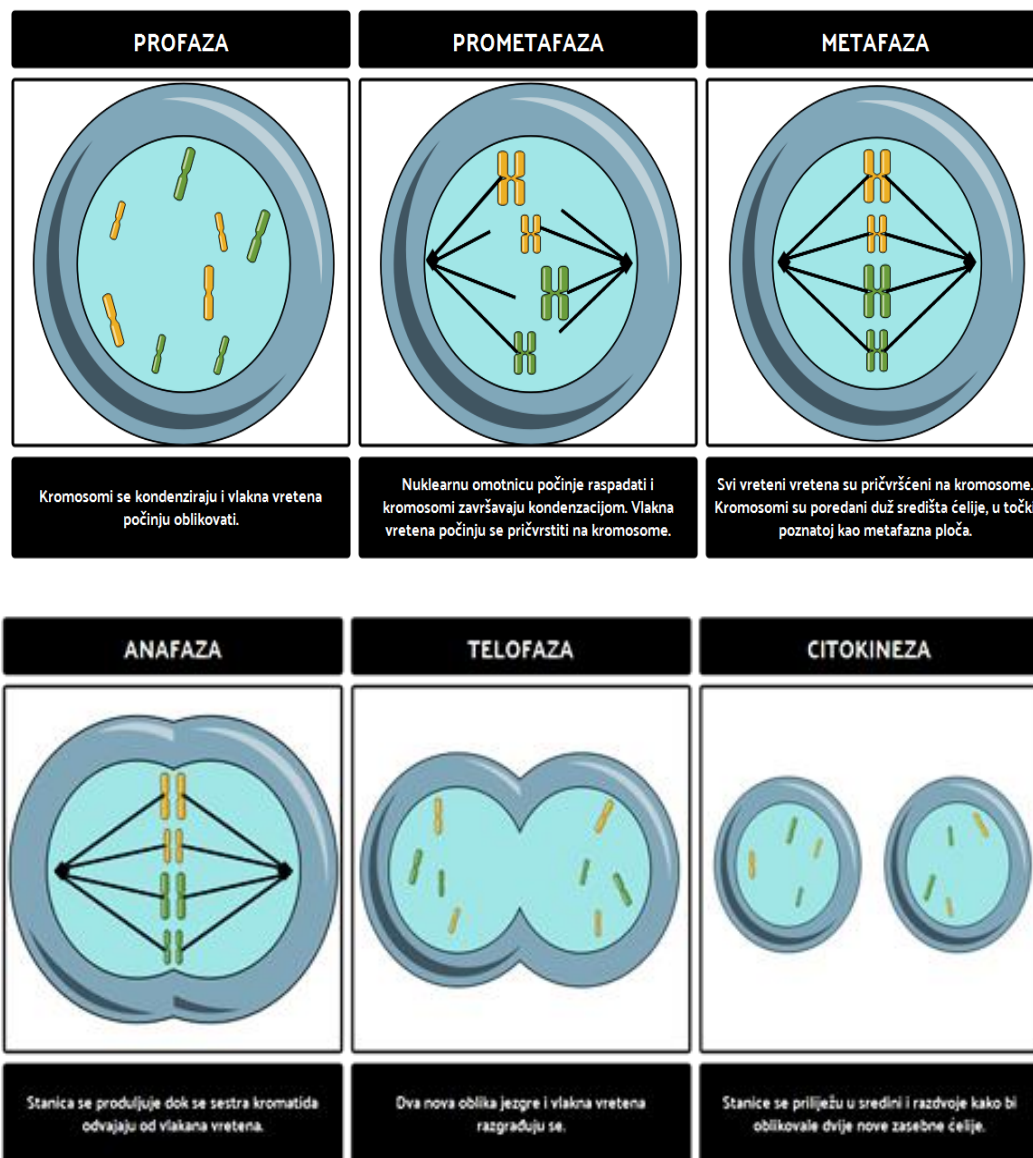
Citoskelet (citoplazma) čini mreža tankih bjelančevinastih niti i cjevčica koje se protežu kroz cijelu stanicu. On daje oblik stanicama, omogućuje gibanje stanica i citokinezu, gibanje staničnih dijelova, staničnu diobu, endocitozu, usidrenost staničnih organela i citoplazmatskih enzima na određenom mjestu čime se održava optimalan prostorni raspored u samoj stanici te rast same stanice. Zbog djelovanja ionizirajućeg zračenja na stanicu u citoplazmi se mogu pojaviti vakuole vidljive optičkim mikroskopom čime preopterećuju stanični raspored i time mogu prouzročiti pucanje stanice.

Stanična jezgra nosi staničnu genetsku uputu koja određuje razvoj organizma. Okružena je s dvije membrane, sastavljena od bjelančevina i dva sloja lipida. Sadrži brojne rupice (jezgrine pore), koje propuštaju određene tvari iz jezgre i u jezgru. Jezgra sadrži jezgricu u kojoj se formiraju dijelovi ribosoma koji odvojeno izlaze u citoplazmu gdje se spajaju u ribosom. Nakon izlaganja stanice zračenju najuočljivije promjene događaju se u strukturi kromosoma. Te promjene nazivamo aberacijama. One nastaju djelovanjem zračenja u osjetljivoj fazi diobe (mitoza) stanica.

Dioba stanica se odvija u četiri faze:

- profaza,
- metafaza,
- anafaza,
- telofaza.

Razdoblje između dvije mitoze naziva se interfaza. Pod utjecajem ionizirajućeg zračenja vrlo složeni procesi poremećaja javljaju se u vremenu stanične aktivnosti, odnosno između dvije mitoze u interfazi.



Sl. 18. Faze stanične diobe

Izvor: www.storyboardthat.com

Posebним metodama istraživanja (istraživanja dr. Warren K. Sinclair-a) učinaka ionizirajućih zračenja „in vitro“ na kulturama asikronih stanica (kulture stanica u kojima su stanice u različitim fazama mitoze) i sikronih stanica sisavaca (kulture stanica u kojima se sve stanice nalaze u istoj fazi mitoze).

Tako se učinci ionizirajućeg zračenja na stanične jezgre u stanicama mogu podijeliti na:

- učinci na DNA – izravni i neizravni,
- usporavanje dijeljenja – usporavanje sinteze DNA čime se posljedično produljuje period mitoze što dovodi do kašnjenja sljedeće mitoze,
- kromosomske aberacije – translokacija kromosoma, prstenasti, acentrični i dicentrični kromosomi,
- smrt stanica – posljedica irepabilnih (nepopravljivih) oštećenja,
- maligne transformacije,
- mutacije gena.

3.2.3. Osjetljivost pojedinih stanica na ionizirajuće zračenje

„Osjetljivost na ionizirajuće zračenje ili radiosenzibilnost raznih stanica veoma je različita. Za radiosenzibilnost vrijedi Bergonie-Tribondeau-ov zakon: Stanice su osjetljive na zračenje proporcionalno brzini njihove diobe, a obrnuto proporcionalne stupnju njihove diferencijacije.“ [5] Što znači da su na ionizirajuće zračenje najosjetljivije stanice koje se intenzivno dijele i koje imaju intenzivne metaboličke procese, a da su manje osjetljive visoko diferencirane stanice i stanice sa sporijim metaboličkim procesima.

Redoslijed osjetljivosti nekih stanica na ionizirajuće zračenje:

- slaba osjetljivost – mišićne, živčane i stanice koštanog tkiva,
- umjerena osjetljivost – endotelne (stanice tkiva koji oblaže krvne žile i srce), spermatide (stanice u fazi spermatogeneze), fibroblasti (stanice vezivnog tkiva) i osteoblasti (stanice za rast kostiju),
- visoka osjetljivost – limfociti, spermatogonije (stanice iz kojih spermatogenezom nastaju spermiji), eritroblasti (nezrele crvene krvne stanice), stanice crijevnog epitela.

Kod spolnih stanica, najosjetljivije su spermatogonije, dok su zreli spermiji manje osjetljivi na zračenje, ali se zbog izlaganja ionizirajućem zračenju javljaju genetska oštećenja potomstva. Doza od 0,5 Gy izaziva prolazni sterilitet; doza od 0,1 Gy kroz jednu godinu ili doza od 2,5 Gy kroz posljednje tri godine izazivaju privremeni sterilitet; a doza od 5-6 Gy trajni sterilitet kod žena, a kod muškaraca i manje doze uzrokuju trajni sterilitet. Jajne stanice su osjetljive na zračenje ovisno o tome u kojem stadiju sazrijevanja se nalaze. Oštećenje oplodene jajne stanice ima za posljedicu teratogena i/ili genetska oštećenja. Fetus je najosjetljiviji na

zračenje, njegovo ozračenje u najranijoj fazi izaziva smrt, a u kasnijim fazama javljaju se oštećenja rasta i razvoja te mentalna oštećenja.

Stanice koštane srži i limfnih tkiva vrlo brzo se obnavljaju, pa su zbog toga i veoma osjetljive na ionizirajuće zračenje. Po redoslijedu osjetljivosti odmah su iza spolnih stanica i tu spadaju:

- limfociti,
- granulociti,
- trombociti,
- eritrociti.

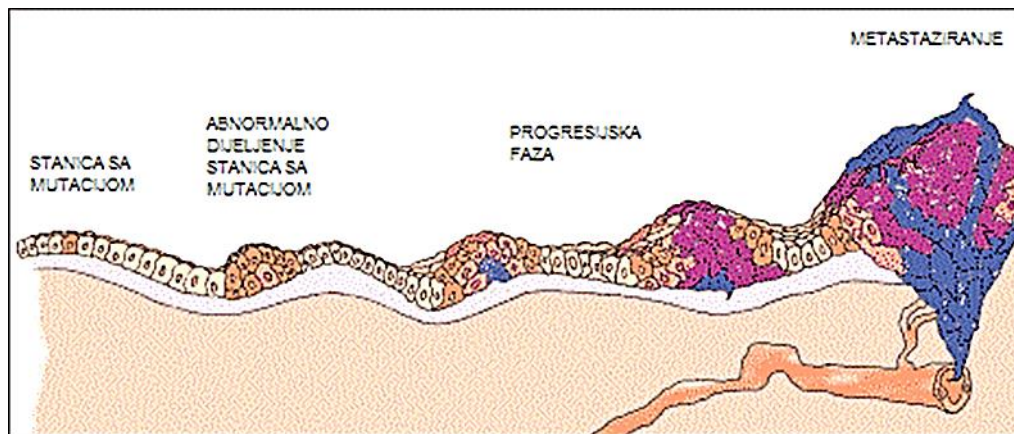
Prema spoznaji o različitoj osjetljivosti stanica određivale su se radiobiološke smjernice za zaštitu od zračenja, ali su također omogućile primjenu ionizirajućeg zračenja u terapijske svrhe (radioterapija zloćudnih tumora).

3.3. Karcinogeneza

Mutagenost i genotoksičnost nazivamo djelovanje vanjskih faktora koji uzrokuju promjene u genomu organizma. Mutagenost je sposobnost neke tvari, da u stanicama živog organizma, izazove stalne promjene u strukturi genetičkog materijala (mutacija), dok se genotoksičnost odnosi na sve promjene genoma in vitro uzrokovano vanjskim faktorima. Mutagen je tvar koja može uzrokovati mutaciju, a mutageneza je proces nastanka mutacije djelovanjem mutagene tvari.

Mutacije su promjene u molekuli DNA koje nastaju unutar stanice djelovanjem određenih kemijskih, fizikalnih i bioloških čimbenika. Nastale genetičke promjene, ako ih stanica ne može popraviti, su trajne ili ireverzibilne. Nastajanje tumora je proces koji se sastoji od nekoliko koraka tijekom kojih stanica zbog progresivnih promjena postaje postupno zloćudna. Taj proces ima 3 koraka (stadija):

- inicijacija tumora – genetičke promjene u stanici uzrokuju njenu abnormalnu proliferaciju (abnormalno dijeljenje stanica) i nastaje početna populacija tumorskih stanica,
- progresija tumora – nakupljanje dodatnih mutacija u tumorskim stanicama te selekcija onih stanica koje sve brže rastu i stanice postaju sve zloćudnije,
- metastaziranje tumora – širenje tumorskih stanica s mjesta nastanka u susjedna tkiva, te putem krvi i limfe po cijelom organizmu.



Sl. 19. Faze nastanka tumora

Izvor: www.webdicine.com

Tvar koja uzrokuje ili se smatra da uzrokuje tumor (rak/karcinom) kod čovjeka ili životinja nazivamo karcinogenom, a proces u kojem dolazi do nastanka tumora nazivamo karcinogeneza. Karcinogenost je svojstvo neke tvari da uzrokuje nekontroliranu proliferaciju i metastaziranje. Karcinogene tvari s obzirom na njihovu ulogu u karcinogenezi možemo podijeliti na:

- genotoksične karcinogene – uzrokuju oštećenje DNA na razini gena ili kromosoma,
- negenotoksične karcinogene – ne djeluju direktno na DNA, povećavaju mogućnost maligne transformacije kroz druge mehanizme djelovanja,
- kompletne karcinogene – mogu izazvati sva tri stadija (koraka) karcinogeneze.

Mnogi kemijski, fizički i biološki čimbenici koji se nalaze u životnom i radnom okolišu imaju karcinogene i mutagene učinke, dok genetske predispozicije, životne navike i prisutnost takvih tvari može uzrokovati pokretanje štetnih procesa u ljudskom organizmu s mogućnošću ozbiljnih posljedica na ljudsko zdravlje i život.

Ionizirajuće zračenje i mnogo kemijskih karcinogena djeluje na način da oštećuje molekulu DNA i time inducira mutacije. Međutim, drugi karcinogeni ne uzrokuju mutacije, već pridonose nastanku raka stimulirajući diobu stanica koje sadrže mutacije. Takve karcinogene nazivamo promotorima tumora. Na taj način oni ubrzavaju rast, progresiju i metastaziranje karcinoma.

Kako bi spriječili štetne i neželjene učinke karcinogenih i mutagenih tvari na ljudski organizam, potrebno je provesti utvrđivanje njihove prisutnosti u životnom i radnom okolišu i poduzeti odgovarajuće mjere zaštite.

Testiranja i testovi procjene karcinogenog i mutagenog potencijala određene tvari temelji se na spoznaji da je molekula DNA ciljana molekula za sve mutagene, a i vjerojatno za većinu karcinogenih tvari. DNA je nasljedni materijal za sve stanične (jedno- i višestanične) organizme te svaka tvar koja mijenja molekulu DNA predstavlja potencijalnu opasnost za čovjeka. Procjena karcinogenog i mutagenog potencijala određene tvari temelji se na četiri razine složenosti:

- *In vitro* testovi – neophodni za procjenu mehanizama djelovanja i nastajanja mutacija i genotoksičnosti,
- duga istraživanja na životinjama – neophodna za procjenu potencijala povećavanja rizika od nastanka zloćudnih tumora kod netaknutih složenih organizama i procjene odnosa doza-odgovor,
- epidemiološke studije na ljudima – procjena potencijala povećavanja rizika od nastanka zloćudnih tumora kod ljudi,
- analiza strukturalne sličnosti tvari s već poznatim karcinogenom.

3.4. Radiobiološki učinci

Radiobiološke učinke ionizirajućeg zračenja možemo podijeliti na determinističke (nestohastički) i na stohaističke.

Tab. 5. Radiobiološki učinci ionizirajućeg zračenja [8]

| DETERMINISTIČKI UČINCI | STOHAISTIČKI UČINCI |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Sigurno će se dogoditi nakon određenog praga doze kod svih ozračenih. | Vjerojatno će se dogoditi s učestalošću proporcionalnom dozi kod nekih ozračenih. |
| Prag doze za svaki učinak. | Nema praga doze. |
| Težina oštećenja proporcionalna visini doze. | Težina oštećenja jednaka je kod svih doza. |
| Temelje se uglavnom na ubijanju stanica tkiva. | Temelje se na promjenama na kromosomima. |
| Pojavljaju se u kratkom vremenu nakon ekspozicije. | Pojavljaju se dugo nakon ekspozicije. |
| Bolesti: katarakta, sterilitet, eritem, ... | Bolesti: maligni tumori, hereditarne bolesti, ... |

3.4.1. Deterministički učinci

Deterministički učinci su posljedica gubitka velikog broja stanica zbog primjene velikih doza zračenja čija jačina ovisi o efektivnoj dozi. Takvi učinci su vidljivi brzo nakon ozračivanja i potreban je određeni „prag“ (količina) zračenja da bi učinak bio vidljiv. Međutim, iako gubitak stanica ne predstavlja veliki problem za ljudski organizam kojem dnevno umire više od milijun stanica, smrću stanica onemogućuje se prijenos genetičke informacije na stanice kćeri. Ako je postotak uništenih stanica u nekom tkivu ili organu velik, tada funkcija tog tkiva ili organa može biti oslabljena, a u pojedinim slučajevima može dovesti i do smrti organizma.

3.4.2. Stohastički učinci

Stohastički učinci, kao što su nasljedne promjene, mutacije ili tumori, vidljivi su tek nakon nekog određenog vremena. Za ovu skupinu bioloških učinaka ne postoji „prag“ to jest može ih izazvati vrlo mala doza ionizirajućeg zračenja. Zbog toga se ne mogu predvidjeti, već ih se može samo statistički predvidjeti. Mogu nastati u somatskim, ali i u spolnim stanicama pa se te promjene mogu prenijeti i na potomstvo. Većina stanica s takvim promjenama ne napreduje do karcinoma jer gotovo ni jedna stanica ne ostaje sposobna za život nakon nekoliko dijeljenja.

Promjene u organizmu čiji nastanak povezujemo s promjenama u genetskom materijalu pojedinih stanica mogu se, ali i ne moraju dogoditi pa se može govoriti samo o vjerojatnosti njihova nastanka i zato ih nazivamo stohastičkim.

Vjerojatnost takvih promjena u organizmu ovisna je o efektivnoj dozi. Što je efektivna doza manja to je i vjerojatnost nastanka takvih promjena manja, ali ne postoji tako mala doza za koju bi vjerojatnost nastanka promjena bila jednaka nuli.

Cilj zaštite od ionizirajućeg zračenja jest spriječiti nastanak determinističkih učinaka izlaganja zračenju i ograničiti pojavu stohastičkih učinaka na najmanju moguću mjeru.

4. POSLJEDICE IZLAGANJA ČOVJEKA IONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU

Jačina bioloških oštećenja izazvanih ionizirajućim zračenjem ovise o:

- vrsti zračenja – svaka vrsta zračenja ima svoju karakterističnu radiobiološku efikasnost i težinski faktor radijacije,
- vremenskoj raspodjeli doze – biološka oštećenja su obrnuto proporcionalna vremenu trajanja izlaganja zračenju,
- topografskoj raspodjeli doze – biološka su oštećenja proporcionalna volumenu ozračenog tijela,
- apsorbiranoj dozi zračenja – biološka oštećenja su posljedica djelovanja sve ukupnog zračenja kojem je tijelo bilo izloženo, bez obzira na doze, vrijeme izlaganja i volumen tkiva (efektivna životna doza zračenja),
- individualnoj osjetljivosti na zračenje – svaki organizam različito je osjetljiv na zračenje (najčešće iz nepoznatih razloga),
- životnoj dobi – mlađe osobe u pravilu su osjetljivije na zračenje od starijih, a djeca su tri puta osjetljivija od odraslih dok je fetus najosjetljiviji na zračenje.

Oštećenja izazvana ionizirajućim zračenjem možemo podijeliti na:

- somatska oštećenja – akutna, kronična, profesionalna, kancerogena, leukemogena, teratogena,
- genetska oštećenja.

Genetska oštećenja su oštećenja koja nastaju na potomstvu osoba čije su gonade (spolne žlijezde ili reprodukcijске žlijezde) bile izložene zračenju u generativnom (reproduktivnom) razdoblju. Nepoželjnim genetskim oštećenjima smatraju se sve promjene nasljednih osobina (tjelesnih i intelektualnih), koje dovode do smanjenja tjelesne i umne sposobnosti potomaka. Učestalost genetskih oštećenja linearno je povezana s dozom zračenja jajnih stanica i spermija.

Mutacije izazvane zračenjem su recesivno nasljedne. To znači da se neko nasljedno oboljenje izazvano ovim mutacijama može javiti na potomstvu ozračenih osoba ako su otac i majka bili ozračeni približno istom dozom zračenja, na istom mjestu kromosoma i gena. To se u pravilu

ne može javiti u prvoj generaciji potomstva, već tek od treće generacije nadalje. Vjerojatnost ispoljavanja nasljednih bolesti je to veća što je veći broj ljudi, muškaraca i žena u generativnoj dobi bio izložen zračenju. Prema posljednjim podacima u RH se godišnje učini oko 4.500.000 različitih rentgenskih pretraga.

4.1. Patogeneza radijacijskih oštećenja

Patogeneza je mehanizam nastanka patološkoga procesa, a sačinjava ju povezani niz događaja koji nastaju kao odgovor stanica, tkiva ili cijeloga organizma na čimbenike što uzrokuju funkcijske i strukturne poremećaje te pojavu simptoma bolesti.

Stupanj oštećenja ovisi o prethodno navedenim uvjetima, a učinak zračenja na stanice ovisi i o vrsti i mjestu oštećenja, vrsti i funkciji oštećenje stanice te broju oštećenih stanica. Kada je brzina primanja doze mala ili je doza primljena tako da su razmaci između primjenih pojedinih doza dovoljnog dugi, tkivo organizma normalnom mitozom nadomješta izgubljene stanice. Zbog tog istog razloga, ista primljena doza kada se primi odjednom, a ne parcijalno u dovoljno dugim vremenskim razdobljima, može imati letalni učinak.

Relativno velike doze primljene kroz duži vremenski period mogu ostaviti male ili nikakve vidljive posljedice. Učinak zračenja na tijelo biti će manji što je ozračeniji dio tijela manji bez obzira na veličinu primljene doze.

Izloženost ionizirajućem zračenju može biti akutna i kronična. Kod akutne izloženosti radi se o kratkotrajnoj izloženosti određenoj količini zračenja. Glavni simptomi su povraćanje i mučnina. Brzina pojavljivanja simptoma linearno raste s povećanjem doze ozračenja. Kronična izloženost definiramo kao kontinuirano izlaganje niskim dozama zračenja kroz dugi vremenski period. Posljedice se mogu vidjeti nakon niza godina. Posljedice uključuju genetske promjene, razvoj malignih (zloćudni) i benignih (dobročudni) tumora, oštećenja kože i slično. Izlaganje ionizirajućem zračenju se u nekim slučajevima koristi kao sredstvo liječenja kod malignih oboljenja radioterapijom.

4.2. Radijacijska bolest

Ovu bolest nazivamo još radijacijski sindrom, akutna bolest radijacije, akutni sindrom zračenja ili trovanje zračenjem. To je bolest oštećenja tkiva ili organa prekomjernom dozom ionizirajućeg zračenja u vrlo kratkom vremenskom periodu (minute ili sekunde). Uzrokovana je ozračivanjem cijelog tijela ili većeg dijela tijela. Javlja se obično kod izloženosti kada je apsorbirana doza oko 1 Gy. Ovisno o razini ozračenja, tijek bolesti je uglavnom predvidiv, a traje od nekoliko sati do nekoliko tjedana. Nema specifičnog liječenja, već se poduzimaju mjere za popravak oštećenja pojedinih sustava organizma, nadomjestak tekućine i krvnih preparata te zaštita od infekcija bakterijama, gljivama i virusima (antibiotici, antifungici i antiviroci). Ova je bolest u pravilu izazvana zračenjem vanjskih izvora, a iznimno kao posljedica ozračenja radionuklidima inkorporiranim u tijelu. Vrlo je rijetka bolest koja u profesionalnom radu nastaje nakon nuklearnih nesreća na radu (Černobil 1986. godine i Fukushima 2011. godine).



Sl. 20. Černobilska nuklearna nesreća

Izvor: www.news.bbc.co.uk

Klinička slika i simptomi ovise o apsorbiranoj dozi, površini izlaganja, načinu kontaminacije te osjetljivosti tkiva koja su pogođena zračenjem. Simptomi kod jednokratnih pojedinih efektivnih doza na cijelo tijelo su različiti.

Apsorbirana doza od 0,05 do 0,2 Gy ne izaziva nikakve akutne simptome, a nakon 40 dana može se javiti prolazna oligospermija (smanjenje broja spermatozoida u muškaraca) i postoji mogućnost nastanka tumora godinama kasnije. Pri apsorbiranoj dozi višoj od 0,2 Gy, oko 0,4 Gy izaziva se oštećenje, ali nema uobičajenih znakova bolesti, ponekad se primjećuju promjene na koži. Kod apsorpcijske doze od 0,5 Gy, ozračenjem cijelog tijela, javlja se oštećenje koštane srži i to se očituje prolaznom limfopenijom (bolest nenormalno niskih limfocita). Prvi pravi znakovi i simptomi radijacijske bolesti javljaju se kada se cijelo tijelo izlaže apsorbiranoj dozi ionizirajućeg zračenja od najmanje 1 Gy. Ozračenje cijelog tijela dozama višim od 6 Gy smatrane su u roku od dva dana do dva tjedna smrtonosnim. Međutim postoje slučajevi u kojima pojedinci preživljavaju ozračivanje većeg dijela tijela dozama višim od 8 Gy.

Klinička slika (skup tipičnih i karakterističnih simptoma i znakova kojima se odlikuje neka bolest) radijacijske bolesti dijelimo u tri sindroma ili oblika:

1. HEMATOPOETSKI SINDROM

Hematopoetski sindrom se javlja kod apsorbiranih doza od 0,7 do 7,0 Gy i dolazi prvenstveno do oštećenja hematopoetskog sustava (krvotvorni sustav). Prevladavaju simptomi vezani za oštećenje krvnih stanica. Najveću radiosenzitivnost pokazuju limfociti (vrsta leukocita), zatim eritroblasti (predstadijske stanice eritrocita) pa mijeloblasti (predstadijske stanice leukocita). Ovaj sindrom karakteriziraju poremećaji i bolesti kao: granulocitopenija (smanjenje broja granulocita – vrsta leukocita), trombocitopenija (smanjenje broja trombocita), supresija imunološkog sustava (zatajivanje imunološkog sustava), povišena tjelesna temperatura, bakterijemija, tresavica (...što je to?...), opća slabost i slično.

2. GASTROINTESTINALNI SINDROM

Gastrointestinalni sindrom javlja se kod ozračivanja cijelog tijela apsorpcijskim dozama oko 7 Gy. Javlja se uz hematopoetski sindrom. Nakon stanica hematopoetskog sustava osjetljivost na ionizirajuće zračenje pokazuju stanice sluznica tankog i debelog crijeva. Uzrok ovog sindroma je zaustavljanje mitoze stanica sluznica tankog i debelog crijeva, a posljedično je gubitak tekućine i elektrolita. U normalnim uvjetima, epitel sluznica tankog crijeva, se zamijeni u tri do četiri dana, ali se kod zračenjem oštećene sluznice to ne događa.

3. CIRKULACIJSKO-NEUTROVEGETATIVNI SINDROM

CNS sindrom javlja se kod ozračivanja cijelog tijela apsorpcijskim dozama većim od 20 Gy ili dozama od 40 Gy u području glave. Kod ovog simptoma dolazi do poremećaja u cirkulaciji neurovegetativnog sustava. Uzrokuje probleme s optokom krvi u organe, funkcije disanja, probave i slično.

4.2.1. Faze radijacijske bolesti i klinička slika

Svi navedeni sindromi imaju nekoliko stadija (faza). Pri neposrednom ozračenju javlja se prodromalna faza u kojoj se javljaju simptomi i promjene unutar prvih nekoliko sati do tri dana, a nakon toga se simptomi povlače. Simptomi ovise o apsorbiranoj dozi, brzini doze i ozračenoj površini. Nakon prodromalne faze slijedi latentna faza. Ova faza nema simptoma, ali se očituje u oštećenju hematopoetskog sustava i sluznice crijeva. Ta oštećenja se očituju kliničkom slikom u trećoj fazi koju nazivamo manifestna faza. I ta oštećenja odgovaraju razini ozračenja. Ako je ozračen pojedinac preživio prethodne faze, nakon manifestne faze slijedi kasna faza ili faza oporavka i/ili smrti. U ovoj posljednjoj fazi ozračen pojedinac ili umre ili se oporavi. Kod pojedinaca koji se oporave, oporavak traje od nekoliko tjedana do dvije godine. Prestanak simptoma je postepen. Može doći do preklapanja simptoma oštećenja više organskih sustava, a ovisi o apsorbiranoj dozi, brzini doze, ozračenoj površini, dobi ozračenog pojedinca te prisustvu ili odsustvu kroničnih bolesti.

Dijagnoza radijacijske bolesti postavlja se na temelju:

- anamneze,
- kliničke slike,
- laboratorijskih nalaza.

Anamneza je skup podataka o bolesniku koji sadrži sve okolnosti što su prethodile sadašnjem stanju. Tu su najvažniji podaci o načinu ozračivanja i podaci fizikalne dozimetrije, podaci o vremenu pojave prodromalnih simptoma, kretanje ozračenog i način ozračenja.

Klinička slika je skup tipičnih i karakterističnih simptoma bolesti i objektivnih znakova bolesti kojima se prepoznaje neka bolest. Važne su kliničke slike prodromalnih simptoma i razvoj kliničke slike, jer je presudne u ocjeni daljnjeg tijeka liječenja i samog ishoda liječenja. Pri pregledu je također potreban osvrt na neurološki status, stanje svijesti, status kože i sluznica.

Potrebno je što ranije napraviti kompletnu krvnu sliku s pažnjom na broj limfocita i učestalost kromosomskih aberacija. Ako je broj limfocita po μl nakon 48 sati od ozračenja viši od 2000 to je normalan nalaz i ne očekuju se nikakve posljedice. Ako je broj limfocita po μl nakon 48 sati od ozračenja vrijednosti između 1000 i 1500 kod apsorbirane doze 2-4 Gy, dobra je prognoza za preživljavanje. Kod apsorbirane doze 4-6 Gy ako je broj limfocita između 500 i 1000, dobra je prognoza uz liječenje. Ako je broj limfocita manji od 100 tada se radi o značajnom oštećenju i uz sve metode liječenja smrt je stopostotna.

Javljaju se i neutrofilija kroz nekoliko sati od ozračenja zbog otpuštanja zrelih neutrofila. Značajan porast javlja se između 10.-tog i 14.-tog dana od ozračivanja i to je dobar znak. Nakon toga slijedi neutropenija nakon trećeg i četvrtog tjedna po ozračenju i oporavak u petom i šestom tjednu.

Broj trombocita smanjuje se postepeno, najviše između 10.-tog i 30.-tog dana od ozračenja, a oporavak se očekuje u petom i šestom tjednu nakon ozračenja. Anemija nastupa sporo zbog dužeg vijeka eritrocita u cirkulaciji.

Potrebno je učiniti analizu kromosoma iz kulture limfocita. Aberacije koje uzrokuje zračenje su specifične. Određuju se promjene na kromosomima perifernih limfocita (limfocita iz periferne krvi). Limfociti moraju proći više od 200 dioba, nakon čega se vrši analiza. Ako postoje aberacije se uočavaju na kromosomima kao što su prstenovi ili su bicentrični kromosomi. Broj aberacija je proporcionalan dozi zračenja.

Liječenje radijacijske bolesti ovisi o tijeku bolesti i kliničkoj slici. Nema specifičnog liječenja, već se terapija usmjerava na oporavak koštane srži i oporavak oštećenja crijevnog epitela. Izolacijom, antibioticima, antiviroticima i antifungicima se sprječavaju infekcije kod oboljelih. Transplantacijom koštane srži daje potpora organizmu ako je koštana srž indicirana i provodi se u prvom tjednu nakon ozračenja. Također se oboljelima intravenski daje nadomjestak tekućine i elektrolita. Osoba koja je ozračena vanjskim izvorom ionizirajućeg zračenja ne predstavlja opasnost za bolničko osoblje koje ga liječi. Kontaminirane osobe prihvaćaju se i smještaju u pripremljenim prostorijama. Na sljedećim tablicama (1. – 5.) prikazan je tijek radijacijske bolesti po fazama za različite razine apsorbiranih doza.

Tab. 6. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 1-2 Gy [8]

| | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prodromalna faza | <p>Oblik bolesti je blag. Mučnina se pojavljuje 1-2 sata nakon izloženosti; povraćanje se javlja s odgodom od 2-6 sati nakon ozračenja.</p> <p>Mučnina i povraćanje prestaju nakon 24 sata. Leukocitoza (povišeni leukociti) u početku nastaje zbog ubrzanog otpuštanja leukocita iz koštane srži.</p> <p>CNS simptomi: blaga glavobolja 2 sata nakon izlaganja ili kasnije; javlja se u 10-50 % ozračenih.</p> |
| Latentna faza | <p>Od prestanka prodromalnog perioda najčešće 10-14 dana od dana ozračenja, moguće 21-35 dana nakon prodromalne faze.</p> <p>Granulocitopenija nastaje kasnije kada se rezerve leukocita potroše s obzirom da su matične stanice nesposobne za daljnje razmnožavanje i samoobnavljanje.</p> <p>Imunološki sustav je oslabljen, sa produženim oporavkom u kojem postoji povećani rizik od infekcije. Medicinsko praćenje – kontrola leukocita.</p> |
| Manifestna faza | <p>Nastupa 30-35 dana nakon prestanka povraćanja. Trajanje ovisi o primjenjenoj dozi. Mogući simptomi su opća slabost i umor. Letalitet (smrtnost) nije zabilježeno a da mu je uzrok samo zračenje. Anemija se javlja kasnije, a za depresiju eritrocitopoeze dovoljna je doza 1-1,5 Gy.</p> <p>Javlja se privremeni sterilitet kod muškaraca.</p> |
| Faza oporavak i/ili smrt | <p>Liječenje je simptomatsko, u većini slučajeva počinje se oporavkom koštane srži.</p> <p>Potpuni oporavak nastupa kod većine u roku od nekoliko tjedana do dvije godine. 10 % ozračenih umire nakon 30 dana.</p> |

Tab. 7. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 2-4 Gy [8]

| | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prodromalna faza | <p>Srednje teška bolest. Povraćanje se javlja kod doza od 2 Gy 3 sata nakon, a kod doza od 4 Gy 1-2 sata nakon ozračivanja. Mučnina se javlja 1-6 sati nakon ozračenja u trajanju od 1-2 dana. CNS simptomi: glavobolja 2 sata nakon ozračivanja ili kasnije; u 10-50 % ozračenih.</p> <p>Ambulantno praćenje.</p> |
| Latentna faza | <p>Počinje prestankom prodromalne faze, traje od 7-14 dana, ponekad od 18-28 dana. Veliki gubitak leukocita, povećan rizik od infekcije. Matične stanice u koštanoj srži umiru iako se oboljeli može osjećati dobro. Traje od 1 do 6 tjedana. Potrebno je medicinsko praćenje.</p> |
| Manifestna faza | <p>Nastupa 30-35 dana nakon prestanka povraćanja. Trajanje ovisi o primljenoj dozi. Mogući simptomi su opća slabost i umor. Mogućnost trajnog steriliteta kod žena.</p> <p>Preživljavanje moguće bez liječenja.</p> |
| Faza oporavak i/ili smrt | <p>Liječenje se vrši simptomatsko i hospitalizacijom. Oporavak traje od 1 do nekoliko mjeseci. 35 % ozračenih umire u roku od 30 dana.</p> |

Tab. 8. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 4-6 Gy [8]

| | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prodromalna faza | Težak oblik bolesti. Povraćanje počinje za manje od 1 sat nakon izlaganja (kod 100 % ozračenih). Dijareja kojoj jakost ovisi o primljenoj dozi i počinje 3-8 sati nakon izlaganja. Umjereni glavobolja 4-24 sata u 50 % izloženih. Povišena tjelesna temperatura i groznica 1-2 sata nakon izlaganja u 80-100 % ozračenih. Liječenje u specijaliziranim bolnicama. |
| Latentna faza | Počinje prestankom prodromalne faze i traje 8-18 dana. Nastaje umjereni gubitak kose u tom periodu. Nužna je hospitalizacija. |
| Manifestna faza | Počinje nakon 18 dana nakon ozračenja i traje od nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci. Simptomi: mučnina, povraćanje, dijareja. Klinički učinci: anoreksija, groznica, slabost, krvarenja, infekcije. Potpuni gubitak kose u periodu od 11-21 dana. Smrtnost 20-70 % sa početkom u razdoblju od 4-8 tjedana. |
| Faza oporavak i/ili smrt | Preživljavanje samo uz intenzivno liječenje. Oporavak zahtjeva agresivnu suportivnu skrb. Cijeloživotna kontrola. Trajanje oporavka od nekoliko mjeseci do nekoliko godina. Primarni uzrok smrti je krvarenje. Što veća doza to manja mogućnost preživljavanja. Najveći broj smrti ozračenih se javlja u roku od nekoliko tjedana. |

Tab. 9. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 6-8 Gy [8]

| | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prodromalna faza | Osobito težak oblik bolesti. Povraćanje počinje za manje od 30 minuta od izlaganje (100 % izloženih). Teška dijareja 1-3 sata nakon izlaganja (100 % izloženih). Jaka glavobolja 3-4 sata nakon izlaganja (80 % izloženih). Smanjena razina svijesti. Visoka tjelesna temperatura 1-2 sata nakon izlaganja (100 % izloženih). Hitno liječenje u specijaliziranoj bolnici. |
| Latentna faza | Počinje odmah ili nakon tjedan dana od kraja prodromalne faze. Potpuni gubitak kose. Nužna je hospitalizacija. |
| Manifestna faza | U roku manjem od 7 dana nakon zračenja. Traje mjesecima. Potpuni gubitak kose u razdoblju od 11 dana. Simptomi: mučnina, povraćanje, dijareja uz veliki gubitak elektrolita. Klinički učinci: anoreksija, groznica, slabost, malaksavost, krvarenja, infekcije, sepsa. Potrebna agresivna i suportivna skrb. Smrtnost 20-70 % sa početkom u razdoblju od 4-8 tjedana. |
| Faza oporavak i/ili smrt | Mala vjerojatnost preživljavanja i uz liječenje. Oporavak zahtjeva agresivnu suportivnu skrb. Presađivanje koštane srži. Cijeloživotna kontrola. Oporavak može trajati godinama. 50 % ozračenih umire u razdoblju od 1-2 tjedana od ozračenja. |

Tab. 10. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom >8 Gy [8]

| | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prodromalna faza | Oblik bolesti u pravilu letalan. Povraćanje počinje za manje od 10 minuta od izlaganja (100 % izloženih). Teška dijareja u roku nekoliko minuta od izlaganja (100 % izloženih). Jaka do neizdrživa glavobolja 1-2 sata nakon izlaganja (80-90 % izloženih). Gubitak svijesti od nekoliko sekundi ili minuta odmah nakon nekoliko sekundi ili minuta nakon izlaganja (kod 50 Gy u 100 % izloženih). Kod izlaganja cijelog tijela dozi od 40 Gy javljaju se grčevi, konfuzije, drhtanje, izraziti nemir i slično. Visoka tjelesna temperatura za manje od 1 sat nakon izlaganja (100 % izloženih). Obavezno liječenje u specijaliziranim bolnicama, najčešće palijativno. |
| Latentna faza | Trajanje je bez latencije, ponekad nekoliko sati. Potpuni gubitak kose. Obavezna hospitalizacija. |
| Manifestna faza | Počinje odmah i traje mjesecima ili godinama ako se izloženi uspiju oporaviti. Potpuni gubitak kose 10.-ti dan. Gubitak svijesti. Simptomi: mučnina, povraćanje, dijareja. Klinički učinci: anoreksija, malaksavost, slabost, krvarenja, infekcije, rane na koži (15 Gy), ulceracije (20 Gy), gangrena (> 30 Gy). Obavezna agresivna i suportivna skrb. Smrtnost je velika bez terapije. |
| Faza oporavak i/ili smrt | Preživljavanje izuzetno rijetko, smrt se javlja u razdoblju od nekoliko dana od početka izloženosti. |

4.3. Oštećenja kože ionizirajućim zračenjem

Ova vrsta oštećenja od ionizirajućeg zračenja uzrokuju rendgenske zrake koje potječu iz aparata namijenjenih za terapiju ili dijagnostiku u medicini, u tehnici, industriji i slično.

4.3.1. Radiodermatitis acuta

Akutni radiodermatitis može nastati nakon primjene jednokratne doze ionizirajućeg zračenja više od 7 Gy ili nakon višekratne primjene manjih radijacijskih doza. Na ozračenoj koži nastaju ozljede vrlo slične opeklinama i često se opisuju kao radijacijske opekline. Dijelimo ih u tri stupnja.



Sl. 21. Radiodermatitis acuta

Izvor: www.zdravlje.eu

Radiodermatitis prvog stupnja očituje se u obliku tamnocrvenog eritema koji prelazi u hiperpigmentaciju, ovisno o dozi zračenja. Doza od oko 3,8 Gy uzrokuje prolazno smanjenje sekrecije lojnica i prolaznu alopeciju (gubitak kose). Alopecija traje 3 tjedna nakon ozračenja, a dlaka ponovno naraste nakon 4-12 tjedana.

Radiodermatitis drugog stupnja pojavljuje se nakon primjene većih doza zračenja (8-10 Gy). Boja kože je grimizno crvena s ljubičastim tonom, a pojavljuju se i erozije kože. Ovaj stupanj radiodermatitisa obično se pojavljuje nakon rentgenske terapije karcinoma kože s višekratno frakcioniranim dozama zračenja. Zacjeljivanje započinje obično nakon 4-5 tjedana. Ovisno o dozi, ozračeno područje može biti atrofično (smanjenje volumena), s hiperpigmentacijama i teleangiektazijama (proširenje krvnih žila). Gubitak dlake je trajan, kao i gubitak lojnica i većine znojnica.

Kod radiodermatitis trećeg stupnja nastaju duboke nekroze (odumiranje stanica) što rezultiraju pojavom vrlo bolnih ulceracija (zagnojavanje) kože koje vrlo sporo zacjeljuju.

Liječenje akutnog radiodermatitisa koriste se kortikosteroidne masti, koje djeluju protuupalno, te sredstva koja pospješuju stvaranje granulacija i epitelizaciju, odnosno zacjeljivanje.

4.3.2. Radiodermatitis chronica

Kronični radiodermatitis nastaje kao produžetak akutnog radiodermatitisa trećeg stupnja. Ukupna primljena doza iznosi oko 12-15 Gy, a može nastati i pri djelovanju manjih doza u pacijenata zbog čestih terapijskih ili dijagnostičkih ekspozicija ili kao profesionalno oštećenje radnika koji rade u ioniziranoj sredini.



Sl. 22. Radiodermatitis chronica

Izvor: www.zdravlje.eu

Kronične radijacijske promjene sastoje se od rigidne atrofije, teleangiektazije, skleroze (zadebljanje tkiva), poremećaja pigmentacije, hiperkeratoze i nastanka kožnih adneksa (pridruženi organi). Opažaju se i promjene vezivnog tkiva, što može uzrokovati nekrozu i ulkus. Kronični rengenški ulkus oštro je rezanih rubova s karakterističnim „slaninastim“ dnom, bez granulacije. U 20% ovakvih ulkusa razvije se karcinom.

Također na sluznicama usana i usta javlja se pojačana salivacija (slinjenje), a kasnije suhoća i eritem. To su najblaži oblici rentgenskog heilitisa i stomatitisa (upala sluznice usne šupljine). U blažem obliku može se pojaviti čak nakon prečestog i u kratkom vremenu ponovljenog rentgenskog slikanja zuba. Veće doze mogu uzrokovati torpidni (obamrli) erozivni i ulcerozni stomatitis sa pseudomembranama (opne izgrađene od fibrina, nekrotičnih epitelnih i upalnih stanica te od limfocita koji nastaju kao proizvod upalne reakcije na sluznici ždrijela, grkljana, dišnoga trakta i crijeva) i jakim bolovima.

Kasna rengenška oštećenja u ustima očituju se propadanjem sluznice, suhoćom zbog gubitka žlijezda, ulceracijama, keratozama, koje su nalik na leukoplakiju (zadebljane, bijele i crvene ranice u ustima).

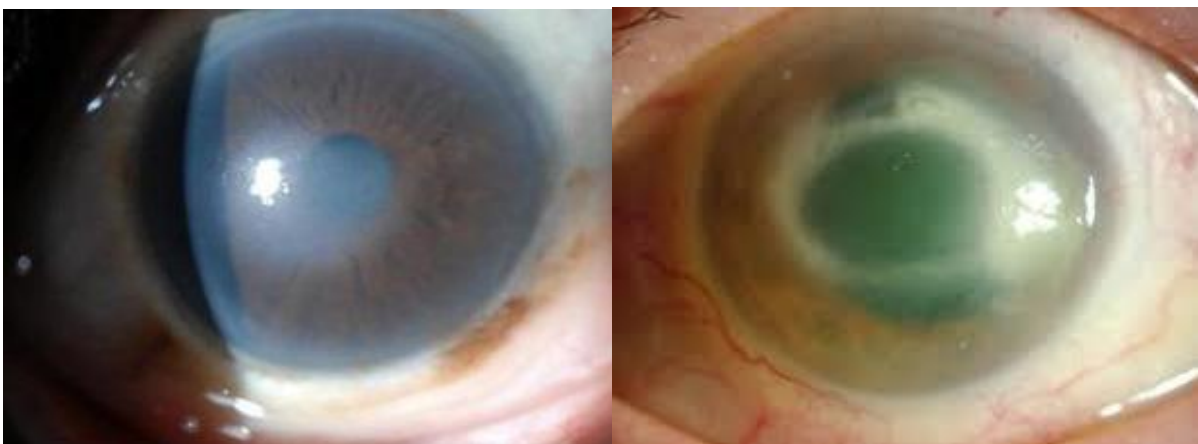
Neadekvatni rentgenski zahvati u dječjoj dobi mogu izazvati zastoje u rastu trajnih zubi.

Ozračeno polje treba pažljivo njegovati primjenom sredstava za pospješivanje granulacije i epitelizacije. Pri kroničnim oštećenjima s ulceracijama treba, ako je moguće, izvesti plastičnu operaciju s uklanjanjem bolesnog tkiva. Da bi se izbjegla kombinacijska oštećenja, treba izbjegavati sve dodatne podražaje koji bi mogli pojačati rentgensku reakciju (npr. sunčanje).

4.4. Kasna i ostala oštećenja

Kasna oštećenja organizma ionizirajućem zračenjem javljaju se s kliničkim simptomima mjesecima i godinama nakon izloženosti zračenju. Među najčešće spadaju: zamućenje i katarakta leće, kronični radiodermatitis, sterilitet, deformacije novorođenčadi ranije izloženih roditelja, usporen rast fizičkog i/ili psihičkog razvoja djece, genetske promjene s fiksiranim kromosomskim aberacijama te povećano pojavljivanje pojedinih malignih bolesti.

Očna leća vrlo je osjetljiva na ionizirajuće zračenje. Koagulacija proteina u leći javlja se već pri jednokratnim apsorbiranim dozama višim od 2 Gy. Započinje kao plak u subkapsularnom stražnjem polu leće i širi se prema prednjem dijelu kortexa. Ono može prouzročiti zamagljen vid, smečkastu ili žućkastu sliku i točke gdje je vid manje bistar. Latentno razdoblje za nastanak promjena na leći iznosi više od deset godina.



Sl. 23. Katarakt oka

Izvor: www.bilicvision.hr

Ako je u ranijom trudnoći ionizirajućim zračenjem ozračena zdjelica trudnice, može doći do deformacija fetusa ili embrija. Kod visokih doza vrlo često se javljaju nakaznosti djece. Zaostajanje razvoja koštanog sustava javlja se kod djece koja su izložena terapijskom zračenju ili kod one djece čije su majke bile u području izvođenja nuklearnih pokusa. Kod ozračenja embrija u ranom preembrionalnom razdoblju (0.-3. tjedan trudnoće) odnosno u embrionalnom razdoblju (4.-8. tjedan trudnoće) ili u fetalnom razdoblju (od 9. tjedna trudnoće do kraja trudnoće) može doći do malformacija djeteta. Malformacije su naslijeđeno ili stečeno odstupanje od normalnog oblika u građi cijelog tijela, njegovih pojedinačnih dijelova, organa ili psihološke funkcije. Tako pri ozračenju u preembrionalnoj i embrionalnoj fazi može doći do uništavanja nekih stanica u vrijeme razvoja pojedinih organa i ako embrij, a kasnije fetus, preživi, može izazivati teške kliničke slike kod novorođenčeta, a kasnije i u životu. Ozračenje fetusa u razdoblju između 8.-og i 15.-tog tjedna trudnoće dovodi do snižene inteligencije djece čije su majke bile ozračenje u tom periodu. Teratogeni učinci javljaju se već iznad praga od 0.01 Sv, ako je fetus bio ozračen u prvih 12. tjedana od začeća. Iz svih navedenih razloga se učinci i posljedice ozračivanja fetusa ionizirajućim zračenjem promatraju kao izdvojena kategorija prema NCRP(National Council on Radiation protection and Measurements –Nacionalno vijeće za zaštitu od zračenja i mjerenja) i ICRP (International Commission on Radiological Protection - Međunarodna komisija za radiološku zaštitu).

5. ZAKLJUČAK

Ionizirajuće zračenje je sastavni dio modernog svijeta te je prirodna i stalno prisutna pojava u brojim ljudskim djelatnostima. Sve više se koristi ionizirajuće zračenje umjetnih izvora, a u medicini i raznim djelatnostima nema adekvatne zamjene ionizirajućem zračenju u dijagnosticiranju.

Unatoč tome što društvo ima veliku korist od ionizirajućeg zračenja, ono je i dalje vrlo opasno po život i zdravlje ljudi, životinja, biljaka i okoliš. Iz tih razloga važno je poznavati i primjenjivati principe i načela sigurne upotrebe izvora ionizirajućeg zračenja.

Ionizirajuće zračenje uzrokuje biološka oštećenja kod čovjeka, a jačina tih oštećenja ovise o vrsti ionizirajućeg zračenja, vremenu izlaganja, apsorbiranoj dozi, površini i vremenskoj raspodjeli doze, individualnoj osjetljivosti te životnoj dobi izloženog čovjeka. Prema tome, mnogo je čimbenika koji utječu kakve posljedice će biti izazvane ionizirajućim zračenjem.

Rizik od ionizirajućeg zračenja mora se ograničavati i smanjivati tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama. Sustavnu organizaciju mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja nazivamo još zaštita od ionizirajućeg zračenja i odnosi se na sve ljude koji mogu biti izloženi zračenju ili posljedicama zračenja.

6. LITERATURA

- [1] Basta-Juzbašić, A., suradnici, „Dermatovenerologija“, Medicinska naklada Zagreb, Zagreb, 2014., ISBN: 978-953-176-662-3
- [2] Brajac, I., Halepović-Đečević, E., Kaštelan, M., Prpić-Massari, L., Periša, D., „Kožne i spolno prenosive bolesti“, Medicinska naklada Zagreb, Zagreb, 2009., ISBN: 978-953-176-406-3
- [3] Grgić, S., „Djelovanje ionizirajućih zračenja na žive stanice“ (III. Simpozij), Ministarstvo zdravstva Republike Hrvatske, HDZZ, Zagreb, 1999.
- [4] Hebrang, A., Klarić-Čustović, R., „Radiologija“, Medicinska naklada Zagreb, Zagreb, 2007., ISBN: 953-176-338-0
- [5] Janković, S., „Uvod u radiologiju“ (interna skripta), Sveučilište u Splitu, Medicinski fakultet, Split, 2014.
- [6] Lugarić, K., „Kemijski i biološki učinci ionizirajućeg zračenja – analiza rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici“ (Završni rad), Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2016.
- [7] Pavić Brčić, M., „Učinci zračenja na čovjeka i okoliš“ (Diplomski rad), Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2015.

Internet izvori:

- [8] Obnova znanja o primjeni mjera radiološke sigurnosti putem interneta, www.dzrns.hr, pristupljeno 04.12.2018.
- [9] Occupational Radiation Protection, www.iaea.org, pristupljeno dana 17.04.2019.
- [10] Radiation Protection of the Public and the Environment, www.iaea.org, pristupljeno dana 17.04.2019.

7. POPIS SLIKA

STRANICA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sl. 1. Proces ionizacije atoma ionizirajućim zračenjem..... | 2 |
| Sl. 2. Periodni sustav elemenata..... | 3 |
| Sl. 3. Alfa raspad..... | 6 |
| Sl. 4. Beta minus (β^-) i beta plus (β^+) raspad..... | 7 |
| Sl. 5. Gama zračenje - vraćanje atoma ugljika u osnovno stanje iz pobuđenog stanja..... | 8 |
| Sl. 6. Nastajanje X – zraka u rendgenskoj cijevi..... | 8 |
| Sl. 7. Moć prodiranja ionizirajućeg zračenja..... | 9 |
| Sl. 8. Mehanizmi međudjelovanja fotona sa materijom..... | 10 |
| Sl. 9. Izvori ionizirajućeg zračenja..... | 11 |
| Sl. 10. Načini zaštite od ionizirajućeg zračenja..... | 20 |
| Sl. 11. Tipovi matičnih stanica čovjeka iz kojih se specijaliziraju sve vrste stanica. | 24 |
| Sl. 12. Direktna i indirektna djelovanja..... | 25 |
| Sl. 13. Stanica i stanični organeli..... | 25 |
| Sl. 14. Molekule DNA i RNA..... | 28 |
| Sl. 15. Mehanizam popravka oštećenog dijela DNA..... | 30 |
| Sl. 16. Oštećenje DNA ionizirajućem zračenjem..... | 31 |
| Sl. 17. Kromosomske aberacije..... | 32 |
| Sl. 18. Faze stanične diobe..... | 34 |
| Sl. 19. Faze nastanka tumora..... | 37 |
| Sl. 20. Černobilska nuklearna nesreća..... | 42 |
| Sl. 21. Radiodermatitis acuta..... | 49 |
| Sl. 22. Radiodermatitis chronica..... | 50 |
| Sl. 23. Katarakt oka..... | 51 |

8. POPIS TABLICA

STRANICA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1. Težinski koeficijenti zračenja [8]..... | 14 |
| Tab. 2. Težinski koeficijenti tkiva [8] | 14 |
| Tab. 3. Granične doze za osoblje profesionalno izloženo ionizirajućem zračenju [7]..... | 17 |
| Tab. 4. Granične doze zračenja za stanovništvo [7]..... | 18 |
| Tab. 5. Radiobiološki učinci ionizirajućeg zračenja [8]..... | 38 |
| Tab. 6. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 1-2 Gy [8] | 46 |
| Tab. 7. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 2-4 Gy [8] | 46 |
| Tab. 8. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 4-6 Gy [8] | 47 |
| Tab. 9. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 6-8 Gy [8] | 47 |
| Tab. 10. Faze u razvoju radijacijske bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom >8 Gy [8] | 48 |