

PRIRUČNIK ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

Besednik, Marina

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2020

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:128:458334>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



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

Marina Besednik

PRIRUČNIK ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

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

Marina Besednik

RADIATION PROTECTION MANUAL

FINAL PAPER

Karlovac, 2020.

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

Marina Besednik

PRIRUČNIK ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr. sc. Slaven Lulić, v. pred.

Karlovac, 2020.



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, 2020.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Marina Besednik

Matični broj: 0422418006

Naslov: Priručnik za zaštitu od zračenja

Opis zadatka:

Tema završnog rada je priručnik za zaštitu od zračenja. Ovim priručnikom nastoji se prikazati što je ionizirajuće zračenje, koji su izvori i vrste zračenja, kako djeluje na čovjeka i najvažnije koje vrste zaštite od ionizirajućeg zračenja postoje. Objasnjene su različite metode zaštite, načini mjerenja zračenja i uređaji za detekciju istog. Opisuju se zaštite od umjetnih izvora zračenja, najviše iz medicinskih izvora, jer najveći doprinos umjetnih izvora daje medicinsko zračenje. Prikazuju se prevencije i mjere zaštite u području izloženosti te zakonske obveze svih izloženih zračenju.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

Veljača, 2020.

Lipanj, 2020.

Srpanj, 2020.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

dr.sc. Slaven Lulić, v. pred.

Ivan Štedul, prof.

PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći se navedenim izvorima podataka i stečenim znanjem za vrijeme studija.

Ovom prilikom želim se zahvaliti svim profesorima koji su mi predavali tijekom mog školovanja i nesebično mi prenijeli dio svog znanja i iskustva.

Zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Slavenu Luliću, v. pred. na ukazanom povjerenju, susretljivosti i pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada.

Na kraju, posebno bih zahvalila cijeloj svojoj obitelji, svim kolegama i prijateljima, a posebice svojim roditeljima na razumijevanju, potpori i pomoći tijekom cijelog studija.

SAŽETAK

Tema završnog rada je priručnik za zaštitu od zračenja. Ovim priručnikom nastoji se prikazati što je ionizirajuće zračenje, koji su izvori i vrste zračenja, kako djeluje na čovjeka i najvažnije koje vrste zaštite od ionizirajućeg zračenja postoje. Objasnjene su različite metode zaštite, načini mjerenja zračenja i uređaji za detekciju istog. Opisuju se zaštite od umjetnih izvora zračenja, najviše iz medicinskih izvora, jer najveći doprinos umjetnih izvora daje medicinsko zračenje. Prikazuju se prevencije i mjere zaštite u području izloženosti te zakonske obveze svih izloženih zračenju.

SUMMARY

A subject of this graduate thesis is the radiation protection manual. This manual tries to show what ionizing radiation is, what are the sources and types of radiation, how it affects humans, and most importantly what types of protection against ionizing radiation exist. There are explained various protection methods, methods of radiation measurement, and devices for its detection. Protections against artificial radiation sources are described, mostly from medical sources, because the greatest contribution of artificial sources is given by medical radiation. There are presented prevention and protection measures in the field of exposure and legal obligations of all exposed to radiation.

SADRŽAJ

	STRANICA
ZAVRŠNI ZADATAK.....	I
PREDGOVOR	II
SAŽETAK	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD.....	1
2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE	2
2.1. Izvori ionizirajućeg zračenja.....	2
2.1.1. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja	2
2.1.2. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja	4
2.2. Vrste ionizirajućeg zračenja	4
2.2.1. Rendgensko zračenje (X - zrake)	5
2.2.2. Gama zračenje.....	7
2.2.3. Alfa zračenje	8
2.2.4. Beta zračenje	10
2.2.5. Neutronske zračenje	12
3. MJERENJE I DETEKCIJA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	13
3.1. Fizikalne veličine i mjerne jedinice.....	13
3.2. Uređaji za mjerenje ionizirajućeg zračenja.....	15
3.2.1. Ionizacijska komora.....	16
3.2.2. Geiger-Müllerov brojač	17
3.2.3. Scintilacijski brojač	18
3.2.4. Čerenkovljev brojač.....	19
3.2.5. Osobni dozimetri	19
4. DJELOVANJE ZRAČENJA NA ČOVJEKA	22
4.1. Specifična ionizacija	22
4.2. Karakteristične doze i vrste izloženosti ionizirajućem zračenju.....	23
4.3. Biološki učinci zračenja.....	26
5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA	28
5.1. Prevencija.....	28
5.2. Načini zaštite	29
5.3. Zakonodavna zaštita.....	31

5.4.	Fizikalno – tehnička zaštita	32
5.5.	Kemijska zaštita.....	32
5.6.	Biološka zaštita.....	32
5.7.	Zaštita u nuklearnim elektranama.....	33
6.	ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI	35
6.1.	Zaštita od zračenja u medicinskoj dijagnostici	35
6.1.1.	Zaštita od raspršenog zračenja	35
6.1.2.	Kompjutorizirana tomografija (CT)	36
6.1.3.	Rendgenska dijaskopija	38
6.1.4.	Angiografija	39
6.1.5.	Osobna zaštitna sredstva.....	41
6.1.6.	Zahtjevi za radni okoliš u zaštiti od ionizirajućeg zračenja	42
6.2.	Zaštita od zračenja u radioterapiji	44
6.2.1.	Teleradioterapija	45
6.2.2.	Brahiradioterapija	45
7.	MJERE ZAŠTITE U PODRUČJU IZLOŽENOSTI	48
7.1.	Obilježavanje područja izloženosti.....	48
7.2.	Uvjeti za građevine u kojima se koriste izvori ionizirajućeg zračenja	50
7.3.	Svjetlosna signalizacija uređaja koji odašilje ionizirajuće zračenje	51
7.4.	Kategorizacija i evidencija izloženih radnika	51
7.5.	Uvjeti radnika izloženog ionizirajućem zračenju.....	52
7.6.	Zdravstvena sposobnost izloženih radnika	53
8.	ZAKLJUČAK	55
	LITERATURA	56
	POPIS SLIKA	57
	POPIS TABLICA.....	58

1. UVOD

Radioaktivnost je svojstvo koje ovisi o građi jezgre atoma. Brojem protona u jezgri određena je vrsta elementa. Što je veći broj protona, jezgra postaje sve teža.

Radioaktivnost jezgre ovisi o broju neutrona u jezgri. U većini slučajeva, da bi jezgra bila stabilna, broj neutrona mora biti tek nešto veći od broja protona. U stabilnoj jezgri neutroni i protoni povezani su nuklearnim silama toliko snažnim na kratkom doseg da se niti jedna čestica ne može odvojiti iz veze bez vanjskih utjecaja. No ako je broj neutrona neuravnotežen, situacija je značajno drugačija. U takvoj situaciji jezgra će se riješiti viška energije na različite načine u obliku elektromagnetskog vala i/ili struje čestica. Takvu emisiju nazivamo ionizirajuće zračenje.

Ionizirajuće zračenje je ono zračenje koje ima dovoljno veliku energiju da električki neutralne atome razbijaju na ione, pritom izbijajući iz atoma jedan elektron.

Svakodnevno smo izloženi zračenju iako toga nismo ni svjesni. Razlog tome je što nemamo razvijene receptore za prepoznavanje zračenja. Iz tog razloga ne prepoznamo kada smo izloženi i kojoj količini zračenja, a posljedice osjetimo naknadno tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o vrsti i svojstvima tog zračenja.

Iz tog razloga je razumljiv čovjekov strah, a poznavanje osnovnih svojstava ionizirajućeg zračenja, djelovanja zračenja na živa bića, svih uvjeta i mjera zaštite tijekom izlaganja zračenju je od izuzetne važnosti.

Opasnosti koje prate izlaganje ionizirajućem zračenju ne mogu se potpuno ukloniti, ali se rizici mogu ograničavati i smanjivati raznim mjerama. Zbog toga, svaka država ima obvezu izgradnje uređenog, sustavnog i kvalitetnog sustava zaštite od ionizirajućeg zračenja na svim društvenim razinama.

2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

U prirodi se atomi nalaze u neutralnom stanju, svaki atom treba imati jednak broj protona i jednak broj elektrona. Njihovi naboji se međusobno poništavaju pa nemamo nikakav naboj atoma kao cjeline. Zbog djelovanja izvana, elektron se može izbaciti iz elektronskog omotača u atomu pri čemu jedan proton ostaje bez kompenzacije naboja u omotaču pa se ukupno atom pokazuje kao nabijen s pozitivnim nabojem +1. Takav atom, odnosno česticu, zovemo ion, a proces stvaranja nabijenih čestica iz neutralnih čestica ionizacija. Zračenje koje može izazvati ionizaciju zovemo ionizirajućim zračenjem. Zajedničko je svojstvo svih vrsta ionizirajućeg zračenja njihovo atomsko i subatomsko podrijetlo, kao i relativno velika energija koja im omogućuje da vrše ionizaciju. Međutim, način kako do te ionizacije dolazi razlikuje se prema vrsti zračenja. Ionizirajuće zračenje ima sposobnost utjecaja na velike kemijske molekule od kojih su sastavljena sva živa bića te tako uzrokuje značajne biološke promjene.

2.1. Izvori ionizirajućeg zračenja

Izvori ionizirajućeg zračenja mogu se podijeliti na prirodne i umjetne.



Sl. 1. Izvori ionizirajućeg zračenja

Izvor: <https://www.unscear.org/>

2.1.1. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja

Prirodni izvori zračenja se nalaze svuda oko nas, u našem okolišu, te kod njih ne možemo kontrolirati dozu zračenja:

- **Kozmičko zračenje:** dolazi na Zemlju iz svemira, sadrži čestice veoma visoke energije, a većinom se sastoji od protona i helijevih jezgara, a tek neznatan dio čine ostale atomske jezgre, elektroni, pozitroni i druge antičestice, neutrini i gama-zračenje. Prolazom kroz atmosferu Zemlje intenzitet kozmičkog zračenja pada što ima za posljedicu da intenzitet zračenja, a time i ekvivalentna doza, ovisi o nadmorskoj visini. Do Zemljine površine dopijevaju uglavnom mioni, elektroni te malo nabijenih čestica i neutrona. Djelomično dolazi od Sunca i drugih izvora u našem sazviježđu i prolazi kroz Zemljinu atmosferu. Godišnja ekvivalentna doza na otvorenom prostoru, nultoj nadmorskoj visini i srednjim geografskim širinama iznosi 0,3 mSv, a na nadmorskoj visini od 3000 m iznosi 1,1 mSv.
- **Zračenje iz zemljine kore:** Zemljina kora sadrži i određeni postotak radioaktivnih tvari. S obzirom na to da se građevinski materijal uglavnom dobiva iz tla što znači da zgrade i kuće u kojima živimo sadrže male količine radioaktivnih tvari.
- **Radon:** je prirodni plin koji nastaje raspadom u uranskom nizu. Najčešće se oslobađa iz stijena ili dolazi iz tla, te tako dolazi u atmosferu gdje može doći do kuća i zgrada. On se također raspada te nastaju drugi radionuklidi. Ukoliko ostaje u zatvorenom prostoru on se nakuplja te udisanjem ulazi u tijelo, te se ugrađuje u pluća i tamo ozračuje okolno tkivo. Radioaktivni raspad radona i njegovih potomaka praćen je emisijama alfa zraka koje imaju maleni doseg ali zato vrše vrlo intenzivnu ionizaciju, uništavajući stanice u najbližoj okolini svog izvora. Doprinos radona ukupnoj dozi zračenja od prirodnih izvora je najveći i prosječno iznosi više od 50%. Srednja godišnja ekvivalentna doza koja potječe od udisanja radona i njegovih potomaka procjenjuje se na oko 1 mSv, dakle trostruko više nego od kozmičkog zračenja. Smatra se da je radon drugi najvažniji uzročnik raka pluća, odmah iza pušenja, koje zauzima vodeće mjesto.
- **Hrana i voda za piće:** U malim količinama radioaktivne tvari prisutne su u okolišu, te ulaze u organizam čovjeka kroz vodu i hranu. Radionuklid kalij-40 je najveći uzrok unutarnjem ozračenju ljudi.

U svakoj sekundi čovjeka pogodi približno 15 000 čestica prirodnog zračenja. Ekvivalentna doza koju čovjek primi tijekom 1. godine zbog prirodne radioaktivnosti iznosi 1mS. Od mjesta do mjesta na zemlji, prirodna radioaktivnost se može jako razlikovati.

Na površini oceana prirodna ekvivalentna doza koju čovjek primi tijekom godine je 0,5 mS, London 0,8 mS, Colorado 2 mS, dok u granitnim područjima Francuske zračenje iznosi približno 3 mS.

2.1.2. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja

Uz ove prirodne izvore čovjek je proizveo i niz umjetnih izvora zračenja, bilo da se radi o aparatima koji proizvode različita zračenja ili se radi o radioaktivnim kemikalijama, a kod kojih se može kontrolirati doza zračenja:

- Medicinsko ozračivanje rendgenskim aparatima (radiološki uređaj s ravnim detektorom, mamografski uređaj, pokretni digitalni rendgen uređaj, pokretni dijaskopski digitalni radiološki uređaj) radi dijagnostike ili za terapiju bolesnika. Udio u rendgenskoj dijagnostici je najveći u prosječnom ozračivanju stanovništva. Ona i danas, nakon mnogih poboljšanja uređaja i metoda, iznosi koliko i trećina pa i polovina prirodnog ozračivanja.
- Radionuklidi u okolišu kao posljedica nuklearnih istraživanja ili ispitivanja oružja ili drugih djelatnosti kao na primjer nuklearna postrojenja koja nam koriste za proizvodnju električne energije, a ispuštaju manje količine radioaktivnih tvari.
- Radioaktivne tvari koriste se i u industriji, rendgenski aparati koriste se u zračnim lukama, graničnim prijelazima, carini, te u proizvodnji papira, plastike i lima.

Upotreba ovih umjetnih izvora zračenja znatno povećava doze zračenja koje prima pojedinac, ali i čovječanstvo, odnosno živi svijet kao cjelina. Najviše se zračenja prima prilikom raznih radiografskih snimanja, pa se poduzimaju mjere kako bi se ono svelo na razumne mjere, te maksimalno zaštitilo djelatnike koji rade s ovakvim izvorima zračenja. Stoga, postoje stroge zdravstvene kontrole i svaki od djelatnika koji radi s izvorima zračenja mora nositi dozimetar koji očitava ukupnu dozu zračenja primljenu kroz određeno razdoblje. Osim toga mjere se i zagađenja radioaktivnošću u prostorijama gdje se ovakvi izvori primjenjuju. Tako za profesionalce koji rade s izvorima zračenja, efektivna doza na cijelo tijelo može biti iznositi do 20 mSv godišnje.

2.2. Vrste ionizirajućeg zračenja

Možemo razlikovati dvije osnovne skupine zračenja, a to su elektromagnetsko i korpuskularno, odnosno čestično zračenje.

Elektromagnetsko zračenje nastaje kada elektron koji se nalazi u elektronskom omotaču atoma prelazi s više energijske razine na nižu energijsku razinu, usporavanjem brzih elektrona te u nuklearnim procesima. Korpuskularno ili čestično zračenje nastaje raspadom atomske jezgre ili ubrzanjem čestica u električnom ili promjenjivom magnetskom polju. Karakteriziraju ga osnovna svojstva: brzina, masa, količina gibanja, električni naboj i energija čestice. Podjela zračenja na elektromagnetsko i korpuskularno u mnogim pojavama i nije važna jer elementi mikrosvijeta ovisno o energijskom području imaju dvojno ponašanje, u nekim pojavama pokazuju valna svojstva dok u nekim pokazuju čestična svojstva.

Ionizirajuće zračenje možemo podijeliti na dvije osnovne skupine:

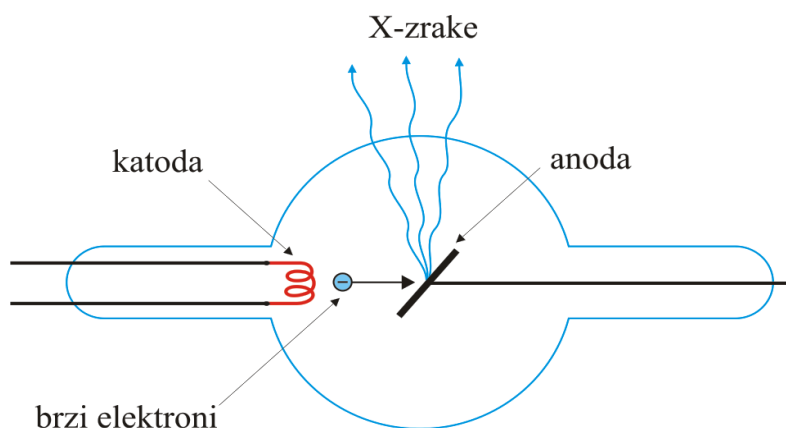
- **Elektromagnetsko ili fotonsko zračenje** koje se razlikuje od drugih zračenja po svojoj valnoj duljini i frekvenciji a to su:
 - Rendgenske zrake (kod rentgenskih zraka valovi su kratki od 0.001 do 10 nm, a frekvencija je velika 10^{16} do 10^{18} Hz)
 - Gama zrake / γ -zračenje (valna duljina kraća je od 10^{-13} m)
- **Korpuskularna ili čestična zračenja** su skup vrlo brzih subatomske čestice i njihovih skupina:
 - Alfa zračenje (ne predstavljaju veliku opasnost jer imaju veliku masu te u zraku imaju domet svega par centimetara, te ih kao vanjski izvor zračenja može zaustaviti list papira, ali su opasne ako uđu u organizam jer imaju jaku snagu ionizacije).
 - Beta zračenje (ima manju masu od alfa čestica i prodornije je, može prodrijeti duboko u tvar, zaustaviti ga može metalni lim ili staklo. Ulaskom u organizam ozračiti će ga iznutra).
 - Protonsko zračenje.
 - Neutronsko zračenje prisutno samo kod nuklearnih reaktora (ako pogodi jezgru može uzrokovati emisiju gama zraka te potaknuti ionizirajuće zračenje tvari).

2.2.1. Rendgensko zračenje (X - zrake)

Rendgensko zračenje čine elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina, od 1 pm do 10 nm, a energije fotona su u području $100 - 10^6$ eV. Često se naziva i X - zračenjem.

To zračenje je vrlo prodorno i prolazi kroz neprozirna tijela, vrlo slabo se apsorbira, naročito pri manjim valnim duljinama, odnosno većim frekvencijama. X - zrake izazivaju fluorescenciju, ne otklanjaju se u magnetskom polju. X – zrake nastaju kad se brzi e^- zaustave pri udaru u metu anodu rendgenske cijevi.

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 katodu je doveden visoki napon koji može biti u rasponu od nekoliko tisuća volti do nekoliko stotina tisuća volti. Katoda se žari posebnim krugom grijanja i događa se termalna emisija e^- . 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.



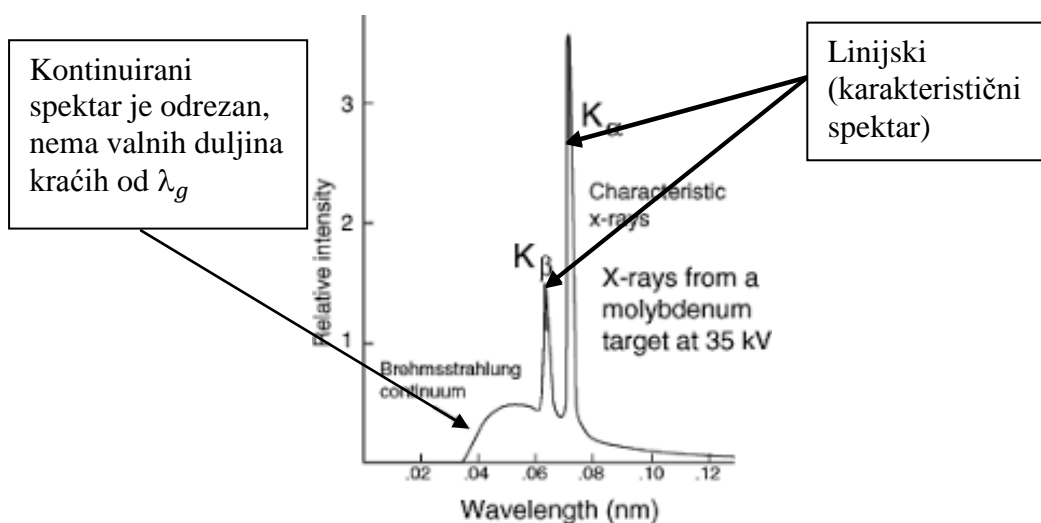
Sl. 2. Nastajanje X – zraka u rendgenskoj cijevi

Izvor: www.e-kemija.blogspot.com

Spektar rendgenskih zraka ovisi o energiji elektrona i materijalu mete u koju udaraju elektroni.

Razlikujemo 2 vrste spektra:

- Kontinuirani spektar – odrezan je na nižim valnim duljinama i ovisi samo o naponu rendgenske cijevi
- Linijski spektar – ovisi o materijalu mete (anodi rendgenske cijevi) u koju udaraju e^-



Sl. 3. Spektar rendgenskog zračenja

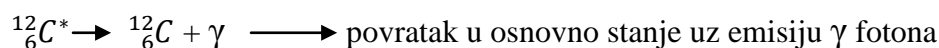
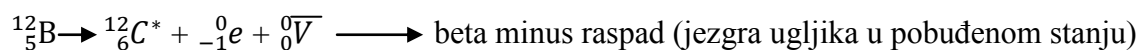
Izvor: <http://physics.mef.hr/Predavanja/IVG/pdf/X%20zracenje%20-%20D.pdf>

2.2.2. Gama zračenje

Svaka atomska jezgra može se nalaziti u nekom od svojih energetske stanja: osnovnom stanju, prvom pobuđenom, drugom pobuđenom... Elektromagnetsko zračenje koje jezgre emitiraju prilikom prijelaza u osnovno stanje naziva se gama zračenje.

Gama zračenje nastaje u slučaju kada jezgra koja je doživjela raspad (alfa ili beta) ostane u pobuđenom stanju. To nije raspad u pravom smislu riječi. Gama zračenje je fotonske (elektromagnetske) prirode i pri njegovoj emisiji ne dolazi do promjene ni atomskog ni masenog broja. Tijekom tog procesa emitira se čista energija, pa jezgra dolazi u stabilnije stanje (stanje niže energije).

Primjer:



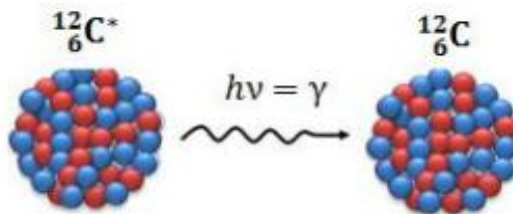
Gama fotoni su fotoni s najviše energije u elektromagnetskom spektru. Emitiraju ih jezgre nekih radioaktivnih atoma. U procesu emisije fotona smanjuje se energija jezgre, ali se njezina građa ne mijenja. Gama zračenje je veoma jako i opasno i otprilike je 1000 000 puta veće energije nego što je energija koju emitiraju atomi prilikom prijelaza u osnovno stanje.

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 tehnecij-99 (dijagnostičke studije u medicini). Gama zračenje primjenjuje se i za izazivanje genetskih mutacija kod biljaka i mikroorganizama te za proizvodnju antibiotika, koristi 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. 4. Emisija gama zračenja

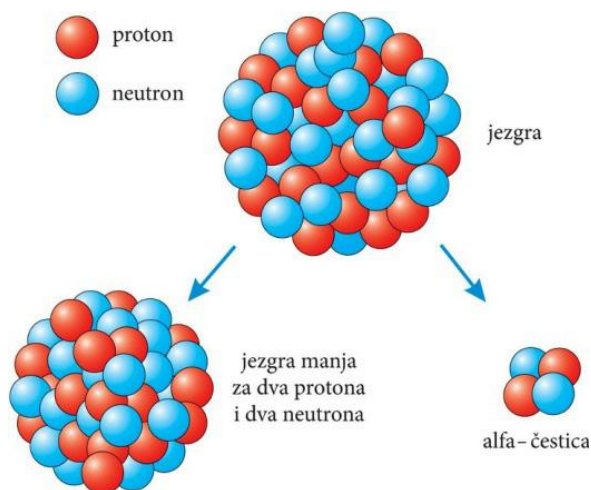
Izvor: <http://www.fzsri.uniri.hr/>

2.2.3. Alfa zračenje

Alfa zračenje je čestično ionizirajuće zračenje koje se sastoji od roja brzih α – čestica izbačenih iz teških atomskih jezgara radioaktivnim alfa raspadima. Alfa čestica je čestica identična jezgri helija, a sastoji se od dva protona i dva neutrona. Alfa čestica se od jezgre helija razlikuje samo po tome što ima puno veću brzinu gibanja.

Kinetička energija, a time i brzina gibanja alfa čestica ovisi o atomskoj jezgri iz koje je emitirana. Struja alfa čestica vrlo brzo gubi kinetičku energiju zbog jakog ionizirajućeg djelovanja i ne prodire duboko u tvar..

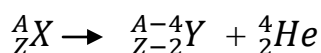
Neke jezgre spontano emitiraju 2 protona i 2 neutrona u obliku jezgre helija, taj proces nazivamo alfa raspadom (Sl. 5.). Pri tom se početna jezgra (jezgra roditelj) sa Z protona i N neutrona pretvara u drugu jezgru (jezgru kćer) koja ima 2 protona i 2 neutrona manje. Alfa raspad se događa najčešće kod masivnih jezgri koje imaju prevelik omjer protona u odnosu na neutrone. Alfa čestica je vrlo stabilna konfiguracija nukleona. Mnoge se jezgre masivnije od olova raspadaju upravo alfa raspadom.



Sl. 5. Alfa raspad

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

Simbolički se α raspad može napisati kao:



X – radioaktivna jezgra koja se raspada (roditelj), Y- novonastala radioaktivna jezgra (kćer), He – Helij (alfa čestica)

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.

U novije vrijeme pokušavaju se razviti metode u kojima bi se iskoristila velika biološka efikasnost alfa zračenja i mogućnost da se lokalnom primjenom u područje od interesa isporuči lokalno visoka doza zračenja dostatna za uništenje stanica karcinoma uz poštedu okolnog zdravog tkiva. U prošlosti radioterapije radij-226 se široko primjenjivao u terapiji karcinoma, ali je zbog svoje radiotoksičnosti naknadno izbačen iz uporabe. U nuklearnoj medicini u svrhe kalibracije koristi se alfa-gama emiter Am 241 .

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

2.2.4. Beta zračenje

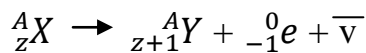
Beta čestica je elektron ili pozitron koji nastaje pretvorbom neutrona u proton u atomskim jezgrama radioaktivnih elemenata zbog djelovanja slabe nuklearne sile, jedne od 4 fundamentalne sile u prirodi.

β raspad je vrsta radioaktivnog raspada izazvana utjecajem slabe nuklearne sile, pri kojem atomska jezgra zrači elektron ili pozitron, i ne dolazi do promjene atomske mase, već se samo atomski broj poveća ili smanji za jedan, a to znači da atomska jezgra se pretvori u novi kemijski element, koji je sljedeći ili prethodni redni broj u periodnom sustavu elemenata. Radioaktivni izotopi koji se raspadaju beta raspadom našli su široku primjenu u medicini. β raspad se može koristiti za liječenje očiju i raka kostiju. U ispitivanju materijala koriste se i za mjerenje debljine tankih materijala, kao što je papir. β čestice se koriste i za stvaranje beta svjetlosti, koja nastaje ozračivanjem tricija i fluorescentne tvari.

Istraživanja su pokazala da β čestice imaju puno manju sposobnost ionizacije plinova od α – čestica, ali su im dometi puno veći, i do nekoliko metara. β čestice mogu prodrijeti kroz aluminijski lim debljine 1 mm, ali ih olovni lim debljine 3 mm apsorbira. Kod prolaza β čestica kroz neku tvar može nastati i zakočno rendgensko zračenje.

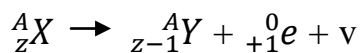
Nestabilne atomske jezgre koje imaju višak neutrona mogu spontano ostvariti β^- raspad, gdje se neutron raspada u proton, uz zračenje elektrona i antineutrina (Sl. 6.). β^- raspad nastaje zbog djelovanja slabe nuklearne sile. Taj postupak se obično javlja u nuklearnim reaktorima, ako u nuklearnom gorivu ima nestabilnih atomskih jezgara s viškom neutrona.

U β^- raspadu dolazi do raspada jednog neutrona u proton uz emisiju elektrona i antineutrina, što se simbolički može napisati kao:

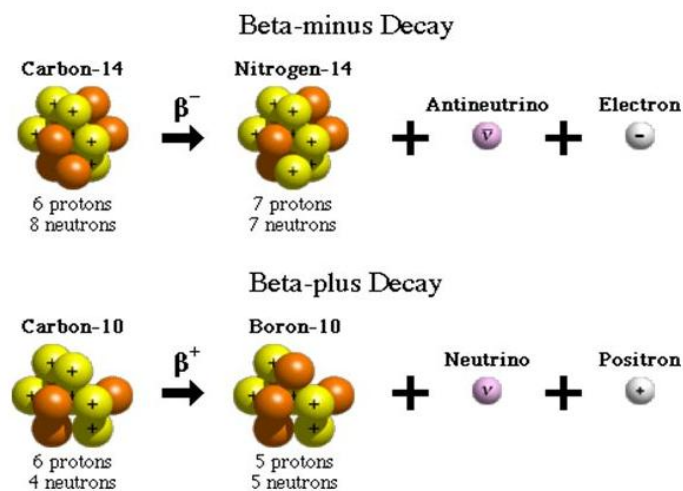


X – jezgra roditelj, Y – jezgra kćer, e – elektron, $\bar{\nu}$ - antineutrino

Nestabilne atomske jezgre koje imaju višak protona mogu spontano ostvariti β^+ raspad, gdje se proton raspada u neutron, uz zračenje pozitrona (antielektrona) i neutrina (Sl. 6.). Pozitron je antičestica elektrona koja ima jednaku masu i spin kao elektron, ali suprotni električni naboj. β^+ raspad se može dogoditi samo unutar atomske jezgre, kojoj je nuklearna energija vezanja novonastalog kemijskog elementa ili izotopa veća od nuklearne energije vezanja kemijskog elementa iz kojeg je radioaktivni raspad započeo. β^+ raspad se koristi u tomografiji pozitronskim zračenjem. Kod β^+ raspada dolazi do raspada 1 protona u neutron uz emisiju pozitrona (antielektrona) i neutrina, što se simbolički može napisati kao:



X – jezgra roditelj, Y – jezgra kćer, e – pozitron, ν - neutrino



Sl. 6. Beta minus (β^-) i beta plus (β^+) raspad

Izvor: <https://education.jlab.org/glossary/betadecay.html>

2.2.5. Neutronska zračenje

Neutronska zračenje je roj brzih neutrona. Neutroni su s protonima glavni sastojci atomske jezgre. Kada se neutron nalazi izvan jezgre on je nestabilan. Nakon nekog vremena on se raspada na tri elementarne čestice: proton, elektron i antineutrino. Neutron ne ionizira atom direktno. Zbog toga se on otkriva posredno putem sekundarnih čestica koje se pojavljuju kao interakcija neutrona s jezgrom atoma. Na neutron ne djeluju električna i magnetska polja tako da nema međudjelovanja neutrona i elektrona u atomskom omotaču ni električnog djelovanja neutrona i jezgre. Zbog toga neutron vrlo lako prodire kroz tvar i do atomske jezgre i tada na njega djeluju nuklearne sile. Neutronska zračenje posljedica je nuklearnih procesa. Neutronska zračenje je komponenta kozmičkog zračenja i zračenja iz nestabilnih teških jezgara. Posebno jaki izvori neutronske zračenja su nuklearni reaktor i nuklearne bombe. To zračenje je također prodorno kao i gama zračenje.

Valna duljina neutrona (λ) ovisi o impulsu neutrona (p): $\lambda = h/p$, gdje je h , Planckova konstanta. Ako se umjesto impulsa u jednadžbu uvedu masa neutrona (m) i njegova kinetička energija (E), jednadžba prelazi u oblik:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

3. MJERENJE I DETEKCIJA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Čovjek nema osjetila kojim bi mogao izravno zapaziti ionizirajuće zračenje. Može ga zapaziti samo preko pojava koje zračenje uzrokuje u tvarima. Mjerenjem tih pojava mjere se i pojedina svojstva zračenja. Svaka primjetljiva i mjerljiva pojava pri međudjelovanju zračenja i tvari može poslužiti za zapažanje i mjerenje zračenja. Najčešće se primjenjuju pojave zacrnenja radiografskog sloja, pojave ionizacije tvari, luminescencije tvari (fluorescencija, fosforescencija i scintilacija) i druge fizikalno kemijske promjene tvari.

3.1. Fizikalne veličine i mjerne jedinice

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 (oznaka je A).

Aktivnost je proporcionalna broju prisutnih neraspadnutih jezgara. Formula je: $A = \lambda N$. Gdje je λ – konstanta radioaktivnih raspada, a N- broj neraspadnutih jezgara. Jedinica kojom se izražava aktivnost neke nestabilne jezgre je 1 becquerel, oznake 1 Bq. Stara mjerna jedinica je curie (Ci) čiji je odnos prema novoj jedinici dat izrazom: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$.

Apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja (oznaka je D) je energija koju označena tvar upija po 1 kg mase. Apsorbirana doza je omjer predane energije (E_d) koju je zračenje predalo nekoj tvari i mase te tvari: $D = \frac{E_d}{m}$, gdje je E_d predana energija, a m masa. Predana energija E_d razlika je ukupne enrgije E_u svih čestica koje su ušle u promatrani element tvari i energije E_l svih čestica koje su ga napustile, umanjena za defekt mase. Jedinica za apsorbiranu dozu je gray [Gy], a 1 Gy predstavlja apsorpciju energije od 1 J (džul) u 1 kg neke supstance, znači $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. 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. Odnos nove i stare jedinice: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ rad}$.

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 određene vrste zračenja na organizam navedeni su u Tablici 1.

Tab. 1. Težinski koeficijent zračenja W_R [9]

Vrsta zračenja	Težinski koeficijent zračenja W_R
Rendgensko zračenje	1
Gama zračenje	1
Beta zračenje	1
Neutronska zračenje	10
Alfa zračenje	20

Ekvivalentna doza (H) ionizirajućeg zračenja iskazuje škodljiv učinak na tkivo koje je izloženo zračenju. Ekvivalentna doza iskazuje se umnoškom apsorbirane doze (D) i faktora učinka određene vrste zračenja na organizam (Q). $H=D \cdot Q$. Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert [Sv]. Odnos nove i stare jedinice: 1 Sv = 100 rem.

Konačna dozimetrijska veličina koja opisuje rizik od ozračivanja žive tvari jest efektivna doza (E). **Efektivna doza** je skup proizvoda ekvivalentne doze koju primi neki organ ili tkivo s faktorom ozračivanja za taj organ ili tkivo (W_T). Svako tkivo različite je osjetljivosti na ionizirajuće zračenje (Tab. 2.), a izražava se faktorom ozračivanja tkiva (W_T).

Tab. 2. Težinski koeficijenti tkiva W_T [9]

Tkivo	Težinski koeficijent tkiva W_T
Koštana srž (crvena)	0,12
Debelo crijevo	0,12
Pluća	0,12
Želudac	0,12
Grudi	0,12
Mjehur	0,4
Jednjak	0,4
Jetra	0,4
Mozak	0,1
Koža	0,1

Efektivnu dozu možemo definirati: $E = \sum_T H \cdot W_T$. Jedinica je ista kao i za ekvivalentnu dozu sivert (Sv), a u praksi se koriste većinom manje jedinice: $1 \text{ mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$. $1 \text{ } \mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$.

Efektivna doza dana je za cijelo tijelo.

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

3.2. Uređaji za mjerenje ionizirajućeg zračenja

Budući da ljudi nemaju osjetilo za zapažanje ionizirajućeg zračenja potrebni su nam uređaji koji će to učiniti umjesto nas. Postoje mnogi uređaji koji su napravljeni za zapažanje i mjerenje zračenja, a može ih se razvrstati u tri osnovne skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači (detektori).

Vizualizatori tragova su uređaji pomoću kojih se na temelju nekog međudjelovanja mogu privremeno ili trajno vidjeti tragovi čestica ili fotona u tvari. Primjeri takvih uređaja su radiografski sloj i Wilsonova maglena komora. Primjenjuju se prije svega u znanstvenim istraživanjima, gdje se promatranjem i mjerenjem tragova čestica i fotona mogu saznati mnoga njihova svojstva.

Dozimetri su uređaji pomoću kojih se mjeri energija (doza) koju je zračenje predalo tvari. Takvim uređajima pripada radiografski sloj kojemu se mjeri zacrtnjenje što ga je uzrokovalo zračenje, ionizacijske komore u kojima se mjeri jakost ionizacijske struje ili električno pražnjenje, luminiscentni slojevi na kojima se mjeri jakost svjetla što ga je uzrokovalo zračenje, kemijski dozimetri za koje se mjere u njima nastale kemijske promjene, itd.

Brojači, nazivani i detektorima, uređaji su pomoću kojih se registriraju i broje pojedine naelektrizirane čestice, a i fotoni, npr. gama zračenja. Takvi su uređaji Geiger-Müllerov brojač, scintilacijski brojač, poluvodički brojač, te mnogi drugi brojači. Suvremeni brojači mjere istodobno s više detektora i više mjernih kanala, pa se prostorni raspored radioaktivne tvari u nekoj drugoj tvari može vrlo točno odrediti (npr. gama kamere za medicinsku dijagnostiku).

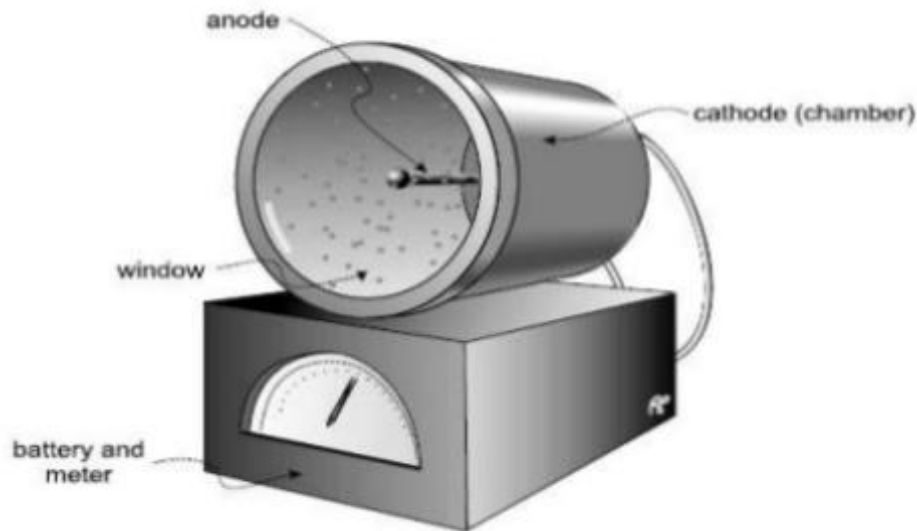
Osim ovih uređaja, postoje i razni uređaji posebnih namjena, npr. za razlučivanje pojedinih vrsta zračenja po energijama, masama čestica (analizatori, spektrometri), za promatranje slike prozračenih predmeta (fluorescentni zastori i elektronički pretvornici).

3.2.1. Ionizacijska komora

Ionizacijska komora je detektor za otkrivanje i mjerenje intenziteta ionizirajućega zračenja. Ionizacijske komore imaju sličnu građu kao i Geigerovi brojači, ali drugačije električno polje i drugačiji način baždarenja. One mjere apsorbiranu dozu u zraku.

Komora radi na čelu elektroskopa. Sastoji se od kvarcne niti koja je presvučena zlatom i koja je smještena u stakleni balon koji je ispunjen razrijeđenim argonom. Nit je nabijena i na jednom kraju balona nalazi se elektroda. Kad zračenje upadne u balon, nit se izbija jer se atomi argona ioniziraju. Ionizacijom neutralne molekule nastaju pozitivni ion i slobodni elektron, koji se nazivaju ionskim parom. Iz nastalih ionskih parova stvara se strujni signal, koji se dalje može oblikovati i pojačavati u izlazni signal, razmjernan intenzitetu (broju čestica i energiji) upadnoga zračenja.

Ionizacijske se komore koriste kada su potrebna precizna mjerenja polja zračenja, što je osobito važno u planiranju radioterapije.



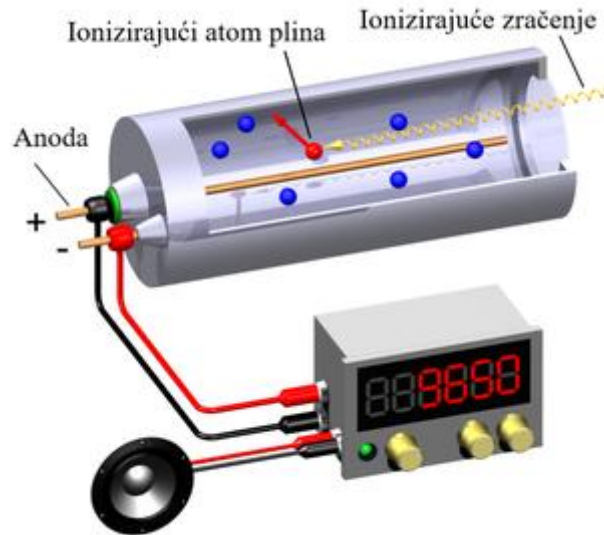
Sl. 7. Ionizacijska komora

Izvor: <https://pt.slideshare.net/anasyess1/ionization-chamber/10>

3.2.2. Geiger-Müllerov brojač

Geiger-Müllerov brojač (po Hansu Geigeru i Waltheru Mülleru) je uređaj za detekciju ionizirajućega zračenja, odnosno brojenje prolazaka ionizirajućih čestica ili fotona izveden u obliku **elektronske cijevi**. Najvažniji dio tog brojača je bakrena cijev koja je ispunjena plinom (npr. Argon ili neon) pod niskim tlakom i unutar koje se nalazi pozitivno nabijena žica. Katoda je plašt cijevi koji je nabijen negativno, a anoda je tanka metalna žica koja prolazi kroz os cijevi. Kad zračenje uđe kroz utor (prozorčić) dolazi do ionizacije plina pa unutar cijevi nastaje struja i to od pozitivno nabijenih iona i izbačenih elektrona. Ioni se ubrzano gibaju prema katodi, a elektroni prema anodi i pritom u plinu uzrokuju daljnju, lavinsku ionizaciju. Time se nakratko zatvara strujni krug i na otporniku u vanjskome dijelu kruga nastaje naponski impuls. Ti se impulsi odbrojavaju u elektroničkom brojaču. Neki brojači imaju i mali zvučnik i slušalice za zvučnu indikaciju zračenja (strujni impuls se pretvara u zvuk). Geigerovi brojači ne mjere brzinu ekspozicijske doze, već samo učestalost ionizacija. Ipak njihova je prednost što, zbog unutrašnjeg pojačanja “signal”, mogu detektirati ionizirajuća zračenja relativno malih energija. U praksi se koriste za nadzor i detekciju prisutnosti izvora zračenja, kada nije potrebna osobita preciznost.

Uređaj ne zahtijeva veliku potrošnju energije, relativno je jeftin i lagan te se široko primjenjuje kao prijenosni detektor zračenja.



Sl. 8. Geiger-Müllerov brojač

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D

3.2.3. Scintilacijski brojač

Scintilacijski brojač, odnosno detektor rabi svojstvo određenih materijala, scintilatora, da prilikom prolaska nabijene čestice proizvode mali svjetlosni bljesak, scintilaciju. Unutar metalne cijevi smješten je izvor zračenja. Radioaktivno zračenje izaziva luminiscenciju. Udarom o zastor od cinka – sulfida α čestica izaziva bljesak, brojeći bljeskove brojimo α čestice. Naime čestice upadnog zračenja proizvode u kratkom vremenskom intervalu puno fotona koji upadaju istodobno na katodu i čine jedan bljesak. Scintilacijski detektor se sastoji od tijela scintilatora, scintilacijskog kristala i fotomultiplikatora (Sl 9.). Scintilacijski detektor zajedno sa fotomultiplikatorskom cijevi je detektor zračenja koji koristi pojavu scintilacije u nekim materijalima koji mogu biti čvrsti, tekući i plinoviti.

Bljesak svjetla bilježi se fotomultikulatom koji je kombinacija fotoćelije i elektronske cijevi.



Sl. 9. Scintilacijski kristal okružen raznim scintilacijskim uređajima

Izvor: <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/crystal-scintillation>

3.2.4. Čerenkovljev brojač

Čerenkovljev brojač primjenjuje se u nuklearnoj fizici za detekciju brzih električki nabijenih čestica i za mjerenje njihovih brzina. Taj brojač počiva na efektu koji se događa ako nabijena čestica prelazi iz rjeđeg u gušće sredstvo. Tada u gušćem sredstvu može imati brzinu veću nego što je ima svjetlost. Stvara se udarni val slično kao kod valova zvuka pri proboju zvučnog zida. Dok zvučni val stvara tutnjavu, svjetlosni udarni val uočavamo kao plavkastu svjetlost.

3.2.5. Osobni dozimetri

Dozimetriju možemo definirati kao mjerenje doze ionizirajućeg zračenja s pomoću odgovarajućih instrumenata – dozimetara. Uspostavljanje numeričkih relacija između doze te fizikalnih, kemijskih i bioloških učinaka koje ta doza izaziva, omogućeno je kvantitativnim mjerenjima doze ionizirajućeg zračenja. Važnost osobne dozimetrije jest u tome da se samo redovitim i točnim praćenjem izlaganja profesionalnog osoblja može zaključiti je li zaštita od zračenja i metoda rada odgovarajuća. Djelatnici koji rade s izvorima ionizirajućeg zračenja obvezni su tijekom rada provoditi sve propisane i uobičajene mjere samozaštite od ionizirajućeg zračenja te koristiti uređaje za mjerenje osobnog ozračivanja.

Osobni dozimetri služe za mjerenje osobnih doza ljudi koji ih nose na odgovarajućem reprezentativnom mjestu na svom tijelu tijekom rada s izvorima. Ti uređaji se nose na lijevoj strani prsiju, a ispod olovne zaštitne pregače, ako se pregača nosi.

Svi tipovi dozimetara koji se koriste u osobnoj dozimetriji moraju zadovoljavati određene karakteristike. Dozimetri koji su namijenjeni za nošenje ispod odjeće moraju biti mali i mehanički otporni.

Dvije su najraširenije (zakonski priznate) metode mjerenja: filmdozimetar i termoluminiscentni dozimetar (TLD). Kod oba dozimetra prolazom zračenja dolazi do određenih procesa koje zračenje izaziva predajom energije: zacrnljenje filma ili podizanje elektrona na više energetska stanje.

Filmdozimetar ili filmski dozimetar - sastoji se od dva (za detekciju rendgenskog i gama zračenja) ili tri (za detekciju rendgenskog, gama i neutronske zračenja) fotografska filma umotana u papir koji ne propušta svjetlost. Ionizirajuće zračenje prolaskom kroz srebrni halid uzrokuje zacrnljenje filma. Stupanj zacrnljenja filma naziva se optička gustoća filma. Optička gustoća može se izmjeriti koristeći optički denzitometar. Fotografski film korišten u dozimetru je energijski ovisan u području nižih energija (0,2 MeV). Maksimalna osjetljivost je uočena pri 30 – 40 keV. Ispod te energije, osjetljivost filma opada zbog atenuacije zračenja. Zbog visoke energijske ovisnosti, dozimetar može pokazati krive vrijednosti za energije ispod 200 keV. Zbog toga, fotografski film se kalibrira zračenjem iste energije kao energija zračenja koje se detektira. Spremnik fotografskog filma dizajniran je tako da zračenje može proći direktno kroz fotografski film ili kroz filtre izrađene od aluminijske, bakrene, kadmijevske, kositarne i olovne, ovisno o vrsti zračenja koje se detektira. Ukoliko se ne čuva na suhom i hladnom mjestu s vremenom fotografski film blijedi što uzrokuje slabiju detekciju zračenja.

TLD (termoluminiscentni dozimetar) - Različiti kristali emitiraju svjetlo pod utjecajem termalnog pobuđenja atoma i molekula nakon što su izloženi zračenju. Ta pojava se naziva termoluminiscencija, a dozimetri bazirani na ovom principu termoluminiscentni dozimetri. Apsorpcija energije zbog pobuđivanja atoma u kristalu rezultira stvaranjem slobodnih elektrona i šupljina. Termalnim pobuđivanjem kristala slobodni elektroni se počinju gibati i bivaju privučeni u luminiscentne centre.

Rekombinacija elektrona i šupljina uzrokuje oslobađanje energije u obliku svjetlosti. Svaki nastali svjetlosni signal pomoću fotomultiplikacijske ćelije se detektira i pojačava.

Kod osoba gdje su dominantno izložene šake koriste se dozimetri koji se nose na prstu ili oko ručnog zgloba, a u intervencijskoj radiologiji i kardiologiji mjeri se i izloženost očne leće zračenju.



Sl. 10. Termoluminiscentni dozimetri za mjerenje izloženosti očne leće, šake ili kože te cijelog tijela

Izvor: <https://www.imi.hr/wp-content/uploads/2018/04/Priroda-5-6-2017.pdf>

TLD se koristi tamo gdje je zbog velikog broja korisnika potrebna i poželjna automatska obrada podataka, a filmdozimetri su pogodniji zbog trajnosti zapisa. Osjetljivost obje vrste osobnih dozimetara je podjednaka, a točnost im ovisi o servisima, načinu baždarenja, energiji zračenja i mnogim drugim čimbenicima.

Osnovni nedostatak obje vrste osobnih dozimetara je odgođeno dobivanje rezultata ozračenja, nakon proteka vremena nošenja i zbog toga su danas popularne brojne verzije dozimetara s trenutnim očitanjem primljene apsorpcijske doze. Tu spadaju penkala-dozimetar, elektronski dozimetar i slično, koji se koriste kao dodatni dozimetri uz službenu dozimetriju koja se provodi pomoću filmdozimetara ili TLD.



Sl. 11. Penkala dozimetar

Izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dozimetar>

4. DJELOVANJE ZRAČENJA NA ČOVJEKA

Posljedica ionizirajućeg djelovanja radioaktivnog zračenja na tvar je povećanje energije atoma i molekula u tvari. O tome kolika je apsorbirana energija ovisi i djelovanje zračenja na tvar, posebice na biološka tkiva. Izloženost niskim dozama prirodnog ionizirajućeg zračenja nema utjecaja na zdravlje ljudi. Izloženost visokim dozama ionizirajućeg zračenja može uzrokovati opekline, gubitak kose, mučninu, razne bolesti i smrt. Učinak izloženosti zračenju ovisi o količini apsorbiranog zračenja, trajanju izloženosti te spolu, starosti i zdravstvenom stanju izložene osobe. Kod osoba koje su bile izložene ionizirajućem zračenju prije rođena može doći do poremećaja mentalnih funkcija. Povećanje doze zračenja rezultira težim posljedicama. Izloženost ionizirajućem zračenju također povećava rizik od pojave karcinoma. Kao i s ostalim učincima, vjerojatnost pojave karcinoma raste s povećanjem doze zračenja.

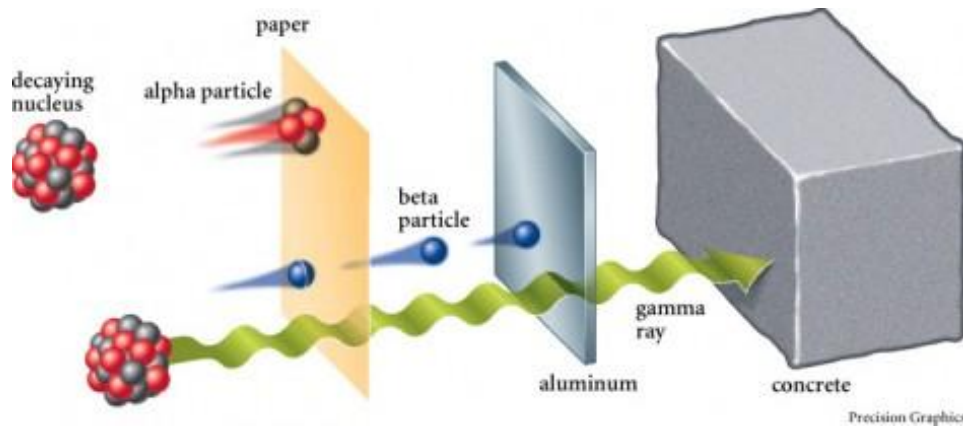
4.1. Specifična ionizacija

Prilikom prolaska radioaktivnog zračenja kroz tvar duž njezina puta nastaju ioni i slobodni elektroni. Broj iona po jedinici duljine puta naziva se specifična ionizacija. Specifična ionizacija ovisi o vrsti zračenja. Najveća je za alfa zračenje, manja za beta, a najmanja za gama zračenje.

Prolaskom gama zračenja kroz tvar, ono gubi najmanje energije od svih zračenja stoga je vrlo prodorno te prolazi kroz ljudsko tijelo. Alfa zračenje ima veliku specifičnu ionizaciju i zato mu je doseg u tkivu vrlo mali. Kada izvana padne na ljudsko tijelo, koža ga u potpunosti apsorbira i ne dopire do osjetljivih unutrašnjih organa. No ukoliko se alfa ili beta radioaktivna tvar unese u organizam udisanjem ili hranom, tada oni zbog svoje velike specifične ionizacije djeluju destruktivno (razorno) na osjetljive unutarnje organe.

Zbog toga je radioaktivno zračenje osobito opasno kada radioaktivne tvari uđu u organizam udisanjem ili hranom. Zaštitne mjere od radioaktivnog zračenja osobito su usredotočene na to da se što više smanji unošenje radioaktivnih tvari u organizam.

Alfa-čestice zaustavlja već papir, koža ili odjeća, a beta-čestice, metalne ploče (npr. aluminij), debele plastične folije, staklo. Od gama-zraka štitimo se betonskim zidovima, vodom u bazenima s istrošenim gorivom ili štitovima od gušćih elemenata, kao što je na primjer olovo.



Sl. 12. Moć prodiranja ionizirajućeg zračenja

Izvor: http://www.medioteka.hr/portal/print.php?tb=ss_fzk2&vid=3

4.2. Karakteristične doze i vrste izloženosti ionizirajućem zračenju

Doze zračenja koje prima čovjek, ili bi mogao primiti u nekim predviđenim ili nepredviđenim situacijama, razvrstavaju se kao prirodne doze, dopuštene doze, granične doze, kritične i natkritične doze.

Prirodna doza: Čovjek je prilagođen prirodnom ozračivanju, koje se na površini Zemlje mijenja u dosta širokom području vrijednosti. Prirodna doza potječe od kozmičkog zračenja (20 do 30 %) i zračenja okoline (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 (osim ako se prirodne mutacije smatraju nekim dijelom posljedica prirodnog ozračivanja).

Dopuštena doza: 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. 16. 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.

Granične doze: Doze koje 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.

Tab. 3. Godišnje granice ozračenja za radnike, pripravnike, studente i stanovništvo [9]

Tip osoba	Godišnje granice ozračenja (mSv):			
	efektivna doza	ekvivalentna doza za:		
		očnu leću	Kožu	Ekstremitete
Izloženi radnici	20 mSv	20 mSv	500 mSv	500 mSv
Pripravnici i studenti u dobi od 16 do 18 godina	6 mSv	15 mSv	150 mSv	150 mSv
Stanovništvo	1 mSv	15 mSv	50 mSv	

Granice ozračenja za izložene radnike primjenjuje se na zbroj godišnjih profesionalnih ozračenja od svih djelatnosti i aktivnosti za koje je ishodeno odobrenje za obavljanje djelatnosti ili rješenje o registraciji, profesionalnog ozračenja radnom na radnim mjestima i drugim profesionalnim ozračenjem.

U posebnim okolnostima ili u određenim situacijama ozračenja (sanacija ili preseljenje spremišta radioaktivnih izvora, montaža i demontaža visokoaktivnih radioaktivnih izvora, provedba specijalnih mjerenja i sl.), ravnatelj Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost može odobriti višu granicu ozračenja za efektivnu dozu od 20 mSv, a koja će u godini dana iznositi najviše 50 mSv, pod uvjetom da prosječno godišnje ozračenje tijekom pet uzastopnih godina, uključujući i godine u kojoj je granica ozračenja prekoračena, ne bude više od 20 mSv.

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 0,25 Sv, tj 250 mSv. Propisano je da se nakon jednokratno primljene tolike doze mora obaviti specijalistički liječnički pregled.

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 (uz prve smrtno slučajeve), 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, npr. ruku 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.

Izloženost ionizirajućem zračenju može biti kronična i akutna.

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

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

Ekstremni primjeri akutne izloženosti su:

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

4.3. Biološki učinci zračenja

Biološko djelovanje zračenja na organizam proizvodi skup efekata koji se mogu klasificirati kao: deterministički (nestohastički) i stohastički učinci.

Deterministički su učinci posljedica gubitka velikog broja stanica, nastaju primjenom velikih doza zračenja (jačina im je ovisna o efektivnoj dozi) i vidljivi su brzo nakon zračenja. Da bi učinak bio vidljiv potrebna je određena količina ("prag") zračenja. Pojavljuju se samo ukoliko je doza veća od određenog praga doze. Gubitak stanica ne predstavlja velik problem za čovječji organizam u kojem svakodnevno umire preko milijun stanica. Smrću stanice onemogućuje se prijenos izmijenjene genetičke informacije na stanicu kćerku. Ozbiljnost efekta zavisi od primljene doze (zamućenje očnog sočiva, sterilitet te malformacije u razvoju ploda). Ukoliko je postotak uništenih stanica u nekom organu ili tkivu velik, tada funkcija organa ili tkiva može biti oslabljena, a u pojedinim slučajevima gubitak stanica dovest će i do smrti organizma.

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

Stohaistički učinci karakteristični su jer je vjerojatnost da do njih dođe proporcionalna primljenoj dozi. Za ove efekte ne postoji prag doze ispod koga se dati efekt ne može pojaviti, tj. može ih izazvati i veoma mala doza zračenja. Ukoliko se pojave, uvijek su veoma ozbiljni (pojava malignih tumora i hereditarni efekti, nasljedne promjene, mutacije), tj. nema relacije doza - efekt. Stoga ih se niti ne može predvidjeti, kao što se to može učiniti za točno određeni - determinirani učinak, nego ih se može samo statistički predvidjeti. Stohastički učinci mogu nastati u somatskim, ali i u spolnim stanicama, pa se promjene mogu prenijeti na potomstvo (nasljedne promjene, indukcija leukemija, mentalna retardacija, malformacije, smrt ploda).

Tab. 4. Biološki učinci ionizirajućeg zračenja [1]

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, nasljedne bolesti,...

5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Ciljevi zaštite od zračenja su:

- spriječiti determinističke učinke,
- ograničiti pojavu stohastičkih učinaka na najmanju moguću mjeru,
- osigurati da djelatnost s izlaganjem zračenju bude opravdana na način da neto korist prevladava nad štetnim učincima.

Osnovna pravila o zaštiti ionizirajućeg zračenja su:

- zabranjen rad osobama u ionizirajućem zračenju mlađima od 18 godina,
- zabranjen rad ženama za vrijeme trudnoće,
- djelatnici moraju biti zaštićeni zaštitnim sredstvima,
- savjesna zaštita gonada mlađima od 40 godina,
- RTG pregledi žena, djece i trudnica obavljaju se na temelju nužnih medicinskih indikacija.

5.1. Prevencija

Kod prevencije i zaštite od ionizirajućeg zračenja cilj zaštite prije svega treba biti sprječavanje nastanka učinaka koji su rezultat direktnog izlaganja zračenju, te ograničiti na najmanju moguću mjeru pojavu stohastičkih učinaka. Potrebno je osigurati da prilikom obavljanja poslova kod kojih dolazi do izlaganja ionizirajućem zračenju to izlaganje bude opravdano, da korist od izlaganja bude veća od štete.

S obzirom na to da ne postoji tako mala doza zračenja za koju bismo mogli tvrditi da smo apsolutno sigurni da neće izazvati oštećenja, Međunarodna komisija za radiološku zaštitu preporučuje sustav radiološke zaštite na ovim načelima:

- opravdanost (obvezno biti sigurni da će se dobiti veća korist za izložene pojedince ili društvo od štete koju ta izloženost može prouzročiti),
- optimalizacija (izlaganja zračenju moraju se održavati nisko koliko je racionalno moguće, uvažavajući društvene i ekonomske čimbenike),
- granice doza (zakonom određene granice doza za djelatnike i stanovništvo)

Mjere prevencije i zaštite profesionalnog osoblja:

- Dobra stručna izobrazba prije početka rada,
- Primjena propisanih zaštitnih sredstava,
- Nošenje osobnih dozimetra za kontrolu doza izloženosti zračenju.

Liječnici (opće medicine, medicine rada, obiteljski liječnik, pedijatar, itd.) uvijek trebaju imati na umu da je izlaganje bilo kojoj vrsti ionizirajućeg zračenja štetno za bolesnika i stanovništvo u cjelini. Sve radiološke pretrage (povezane s ionizirajućim zračenjem) podliježu vrlo strogoj zakonskoj regulativi, a količina zračenja mora biti u skladu s principima ALARA (As Low Reasonably Achievable). Kad je potrebno primijeniti više radioloških pregleda, treba odabrati najlogičniji redoslijed pretraga na temelju vlastite prosudbe, te konzultacija s radiolozima i kliničarima.

Radiolozi imaju veliku ulogu i odgovornost u prevenciji i zaštiti stanovništva od zračenja, posebice od nepotrebnog zračenja. Uloga radiologa je:

- Provjerava valjanost indikacije za radiološku pretragu (može i odbiti pretragu),
- Odabire radiološku metodu koja uzrokuje manje zračenje bolesnika,
- Reducira vrijeme dijaskopije (radiološke pretrage) i nebitne rendgenske snimke,
- Smanjuje broj snimanja po pretrazi,
- Primjenjuje nova tehnološka postignuća.

5.2. Načini zaštite

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

- Udaljenost od izvora,
- Vrijeme izlaganja,
- Štit.

Dovoljna udaljenost od izvora - intenzitet zračenja smanjuje se povećavanjem udaljenosti od izvora zračenja; doza zračenja drastično se smanjuje što se više udaljavamo od izvora.

Što kraće vrijeme izlaganja - za ljude koji su uz prirodno pozadinsko zračenje izloženi dodatnim izvorima zračenja, ograničavanje ili minimiziranje trajanja izloženosti smanjit će dozu zračenja.

Korištenje štita - barijere od olova, betona i vode pružaju dobru zaštitu od prodirućeg zračenja kao što je gama zračenje. Zbog toga se neki radioaktivni materijali spremaju ili se rukuje njima pod vodom ili korištenjem daljinskog upravljanja u prostorijama izgrađenim od debelog betona ili obloženim olovom. Postoje posebni plastični štitovi koji zaustavljaju beta čestice, dok sloj zraka zaustavlja alfa čestice. Postavljanje odgovarajućeg štita između izvora zračenja i ljudi uvelike će smanjiti ili potpuno eliminirati dodatnu dozu zračenja.

Gama i X zračenje najbolje prigušuju elementi visokog rednog broja Z i velike gustoće. Standardni štit koji udovoljava spomenutom zahtjevu je olovo, a u slučajevima velikih i rasprostranjenih izvora ulogu štita najčešće igra masivni štit od teškog betona (beton s dodatkom željeznih strugotina ili željezne rudače).



Sl. 13. Primjer masivnog olovnog štita za potrebe nuklearnog laboratorija

Izvor: <http://www.nemis.hr/>

Štitovi koji štite od X i gama zraka automatski su dovoljni za zaštitu od elektrona, no posebno su zbog svoje prirode problematični neutroni, pa oni zahtijevaju ponešto različite štitove.

Prvi zadatak štita od neutronske zračenja je njihovo termaliziranje, čime im udarni presjek za uhvat, odnosno apsorpciju, jako poraste. Termalizaciju najefikasnije provode laki elementi, posebno vodik, tako da u štitu trebaju sudjelovati materijali s velikim postotkom vodika, takozvani hidrogenozni materijali.

Voda je svakako najbogatija vodikom, no u tekućem stanju nije podesna. Po sadržaju vodika ali i drugog lakog elementa-ugljika, vrlo je dobar parafin. Željezo također igra ulogu u neutronsom štitu, jer jednim neelastičnim raspršenjem brzog neutrona na jezgri željeza, neutron gubi veliki dio svoje energije. Sveukupno, beton s dodatkom željeza (teški beton) zbog udjela vode u njemu (oko 6%), vrlo je dobar i pristupačan materijal za neutronske štite, a ujedno služi i kao štiti od gama zračenja.

5.3. Zakonodavna zaštita

Zakonodavna zaštita je veoma važna jer vrlo strogim zakonskim propisima i pod zakonskim 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)
- Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 118/18)
- Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 53/18)
- Pravilnik o stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja (NN 36/18)
- Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti (NN 66/18)
- Uredba o mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja te postupanjima u slučaju izvanrednog događaja (NN 24/18)
- Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja, primjenu mjera radiološke sigurnosti i upravljanje tehničkim procesima u nuklearnim postrojenjima (NN 42/18)
- Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 38/18)
- Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja (NN 42/18)

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

5.4. Fizikalno – tehnička zaštita

Zakonom je definirana 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.

5.5. Kemijska zaštita

Kemijska zaštita uključuje primjenu kemijskih radioprotektora (oko 4000 različitih tvari). To su kemijske tvari koje smanjuju štetne biološke učinke zračenja (cistein, cistamin, amifostin u radioterapiji tumora). Mehanizam njihova djelovanja temelji se na tzv. „čišćenju“ slobodnih radikala i na popravljanju oštećenja nastalih djelovanjem slobodnih radikala.

Preporučuje se uzimanje kemijskih radioprotektora prije izlaganja zračenja, a najnovije generacije kemijskih radioprotektora i nakon izlaganja zračenju.

Danas se najčešće koriste kod popravaka nuklearnih reaktora, u terapijskoj primjeni zračenja, itd.

5.6. 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, 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.

5.7. Zaštita u nuklearnim elektranama

Iako najviše zračenja iz umjetnih izvora dolazi iz medicinskih ozračivanja, potrebno je i posvetiti pozornost zaštiti u nuklearnim elektranama.

Nuklearnoj sigurnosti već je u fazi planiranja reaktora i projektiranja elektrane posvećena velika pozornost. Projektirani su zaštitni sustavi koji u svim radnim stanjima, čak i u slučaju otkazivanja određene opreme, osiguravaju zaštitne funkcije. Nuklearna sigurnost obuhvaća postizanje odgovarajućih pogonskih uvjeta radi sprječavanja izvanrednog događaja ili umanjivanja posljedica izvanrednog događaja, radi zaštite radnika, javnosti i okoliša od štetnih posljedica ionizirajućeg zračenja.

Nuklearna je elektrana u sigurnome stanju ako su u svakom trenutku ispunjena tri osnovna sigurnosna uvjeta:

- učinkovit nadzor nad snagom reaktora
- hlađenje nuklearnoga goriva u reaktoru
- zadržavanje radioaktivnih tvari (onemogućeno oslobađanje radioaktivnih tvari u okoliš).

Zaštita od ionizirajućih zračenja u nuklearnim elektranama temelji se na sustavu sigurnosnih standarda za zaštitu zdravlja radnika i stanovnika, koji su na temelju preporuka Međunarodne komisije za radiološku zaštitu, ICRP-a (International Commission on Radiological Protection) sastavni dio svih međunarodnih sigurnosnih standarda koje izrađuje Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) ili ih izdaje Europska unija u obliku direktiva za svoje članice.

Potrebno je da doze zračenja budu unutar granica dopuštenih, odnosno ne iznad 20 mSv godišnje za izložene radnike.

Radioaktivni otpad iz nuklearnih elektrana potrebno je pravilno skladištiti i odlagati da bi se onemogućio kontakt radioaktivnih izotopa s biosferom i podzemnim vodama.

U radu nuklearne elektrane nastaju radioaktivne otpadne tvari koje mogu biti u plinovitom, tekućem i čvrstom agregatnom stanju. Ako je količina radionuklida iznad propisanih vrijednosti, te se tvari tretiraju kao radioaktivni otpad. S obzirom na svoju specifičnu aktivnost, on se dijeli na nisko i srednje radioaktivni otpad.

Odgovarajućim postupcima otpad se mijenja u oblike koji osiguravaju sigurno skladištenje, transport i odlaganje da bi se onemogućio kontakt radioaktivnih izotopa s biosferom i da bi se zaštitili ljudi i okoliš od ionizirajućega zračenja.



Sl. 14. Odlaganje radioaktivnog otpada

Izvor: <https://radioaktivniotpad.org/>

U Nuklearnoj elektrani Krško radioaktivni elementi u uzorcima koji su karakteristični za efluente (otpadne ispuste u okoliš) u većini su slučajeva ispod donje granice detekcije. Efektivna je doza na pojedinca iz skupine okolnoga stanovništva, koje može biti najviše izloženo utjecaju elektrane je ispod 1 mSv, što je manje od 0,1% doze koja je posljedica zračenja prirodnih i umjetnih izvora.

6. ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI

Medicinski izvori zračenja su:

- Sve radiološke dijagnostičke metode u medicini i stomatologiji
- Intervencijska radiologija,
- Radionuklidna dijagnostika,
- Radioterapijski postupci.

Medicinska radiološka dijagnostika daje oko 80% - 90% ukupne doze koju stanovništvo prima iz svih umjetnih izvora zračenja zajedno.

6.1. Zaštita od zračenja u medicinskoj dijagnostici

Danas radiološka dijagnostika predstavlja najveći umjetni izvor zračenja prosječne populacije u medicini. Mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja mora se pridržavati profesionalno osoblje koje to zračenje primjenjuje. Najbolja je zaštita za bolesnika smanjivanje rendgenskih pretraga na razumnu mjeru. U radiološkoj dijagnostici uređaji za rendgensko snimanje i uređaji za dijaskopiju te CT jako zrače, dok magnetna rezonancija i ultrazvuk ne koriste štetno ionizirajuće zračenje. Ali ipak magnetna rezonancija može biti opasna za pacijenta ako pacijent ima metalna strana tijela ili ugrađeni pacemaker.

Kod obavljanja različitih dijagnostičkih rendgenskih snimanja treba znati:

- Da je velik broj ljudi izložen rendgenskim snimanjima svake godine,
- Potrebno je uvijek provjeriti valjanost indikacije za traženo rendgensko snimanje,
- Izvršiti odabir metode snimanja s manjom količinom zračenja
- Primijeniti sve mjere zaštite od primarnog i raspršenog zračenja.

Rendgenskim snimanjima i/ili prosvjetljavanju u operacijskim dvoranama najviše su izloženi: abdominalni kirurzi, traumatolozi, ortopedi, dječji kirurzi, instrumentarke, anesteziolozi i anesteziološki tehničar.

6.1.1. Zaštita od raspršenog zračenja

Raspršeno zračenje je ono zračenje koje nije nastalo u izvoru zračenja (rendgenskoj cijevi) nego pri sudaru rendgenskih zraka s česticama materije. Najveći izvor raspršenog zračenja je tijelo bolesnika, odnosno zračenju izloženi dio tijela bolesnika.

Za zaštitu od raspršenog zračenja koriste se:

- Zaštitne naprave na rendgenskom uređaju (suziti prednji zastor – kolimator, ekran rendgenskog uređaja, ispod ekrana ili elektronskog pojačala dugačke i široke ploče od olovne gume zaštitne vrijednosti 2- 2,5 mm)
- Zaštitne naprave u rendgenskoj prostoriji (zaštitni stolac, zaštitne pregrade i paravani u prostoriji),
- Osobna zaštitna sredstva.

Drugi oblici zaštite od zračenja su:

- Skraćenje trajanja izlaganja ionizirajućem zračenju, a preduvjet je dobra izobrazba i uvježbanost u radu
- Udaljavanje tijela od izvora zračenja (kod rendgenskih snimanja snimati pomoću dugog električnog kabela ili iz druge prostorije, itd.)
- Način rada (sužavanje snopa rendgenskih zraka, zatvaranje vrata pri snimanjima s komandnog stola iz zaštićene prostorije, itd.)

6.1.2. Kompjutorizirana tomografija (CT)

Kompjutorizirana tomografija (računalna tomografija) je vrlo raširena i često primjenjivana radiološka metoda, te je značajan broj bolesnika izložen djelovanju ionizirajućeg zračenja. Doza zračenja koju primi bolesnik ovisi o: volumenu i gustoći snimanog dijela tijela, broju slojeva koji će se skenirati, vrsti i kvaliteti aparata i mjerama zaštite. Izloženost tijela po svakom sloju u principu je veća nego kod jedne prosječne rendgenske snimke bilo kojeg dijela tijela, ali je manja nego kod prosvjetljenja u trajanju od 1 minute. Najveća doza zračenja je u koži i neposredno ispod kože, a doze u dubljim organima su oko 0,005 Gy po sloju. Primjena zaštitnih sredstava je veoma otežana (rendgenska cijev cijelo vrijeme kruži oko pacijenta).

Izloženi radnik koji rukuje CT-om tijekom pripremnog razdoblja poslije uključivanja uređaja ne smije napustiti mjesto uz upravljačku jedinicu sve dok cijeli pripremni postupak nije završen.

Tijekom pripremnog razdoblja poslije uključenja CT-a, dok je u tijeku zagrijavanje i samopodešavanje rendgenske cijevi koja u tom razdoblju zrači, u prostoriji u kojoj je uređaj smješten ne smije nitko boraviti.



Sl. 15. CT uređaj

Izvor: <http://web.studenti.math.pmf.unizg.hr/~sakarme/meddijagnostika.html>

U svrhu što je moguće bolje zaštite od zračenja kod kompjutorizirane tomografije potrebno je:

- Dobra prevencija (čvrste medicinska indikacija),
- Izbor tehnike snimanja pri kojoj je bolesnik izložen manjoj dozi zračenja, osobito za kritične organe,
- Smanjiti broj slojeva skeniranja na najmanji potrebiti broj,
- Obvezatna je zaštita gonada djece i svih osoba u generativnoj dobi (ukoliko ta zaštita ne ometa izvođenje pretrage),
- Kod CT-a glave potrebno je po mogućnosti zaštititi očnu leću.

Jednoslojni rendgenski uređaj za kompjutoriziranu tomografiju ne smije se koristiti ako ne postoji procjena rizika u pisanom obliku za svaki predviđeni dijagnostički postupak koji se tim uređajem provodi.

CT mora moći dati informaciju o ozračenju pacijenta nakon završenog postupka

6.1.3. Rendgenska dijaskopija

Dijaskopija je postupak koji rendgensko zračenje koristi za prikazivanja tkiva i unutarnjih organa u pokretu. Ovom metodom se pacijenti samo prosvjetljavaju.

Kod korištenja dijaskopije (prosvjetljavanja) bilo u dijagnostičkoj ili intervencijskoj radiologiji treba znati:

- Da su doze zračenja pri prosvjetljavanju neusporedivo veće (više stotina puta) nego kod rendgenskih snimanja,
- Prije početka prosvjetljavanja treba se detaljno upoznati sa svim ranije urađenim pretragama (klinički nalaz, laboratorijski nalazi, nalazi UZV ranijih rendgenskih pretraga, tijekom liječenja, itd.),
- Obavezno primijeniti sve mjere zaštite od zračenja (zaštita od primarnog snopa, zaštita od raspršenog zračenja),
- Zabranjena je dijaskopija skeleta ili zubi.

Rendgenski uređaji za dijaskopiju koji nemaju elektroničko pojačalo slike i televizijski lanac ili jednako vrijedan uređaj ne smiju se koristiti.

Uređaj za dijaskopiju moraju imati ugrađenu automatsku kontrolu brzine doze zračenja i mora moći dati informaciju o ukupnom ozračenju pacijenta nakon završenog postupka. Mora biti ugrađen zvučni signal koji obavještava o vremenu dijaskopije duljim od 5 minuta.

Prekidač kojim se uključuje dijaskopija mora biti neprekidno pritisnut za cijelo vrijeme pregleda, otpuštanjem prekidača dijaskopija se mora automatski isključiti.

Uređaj za dijaskopiju koji se koristi za postupke koji uključuju djecu mora imati mogućnost uklanjanja rešetke.

Kod nepokretnih (stacionarnih) rendgenskih uređaja za dijaskopiju udaljenost žarište – koža pacijenta ne smije biti manja od 30 cm. Uređaj u uspravnom položaju pacijenta mora imati zaštitnu pregaču ispod elektroničkog pojačala slike i s njegove lijeve strane na nosaču, ako se rendgenski uređaj za dijaskopiju koristi u ležećem položaju pacijenta, zaštitna pregača mora biti i sa strane na kojoj se nalazi osoba koja obavlja pregled.

Tijekom uporabe uređaja za dijaskopiju pri posebnim postupcima (angiografija, nadzor nad ugradnjom implantata u tijelo pacijenta i sl.) osobe koje su uz pacijenta moraju koristiti i druga zaštitna sredstva, uključujući štitove, paravane i zavjese, kojima se smanjuje njihovo izlaganje ionizirajućem zračenju raspršenom od pacijenta i dijelova rendgenskog uređaja. Zaštitni učinak tih sredstava mora biti jednakovrijedan učinku olova debljine najmanje 0,4 mm.



Sl. 16. Uređaj za dijaskopski pregled

Izvor: <https://civilna-zastita.gov.hr/>

6.1.4. Angiografija

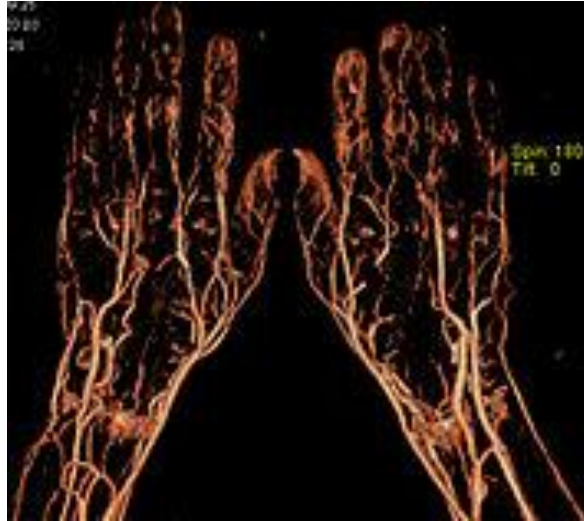
Angiografija je vrsta dijagnostičkog pregleda za prikaz krvnih žila. Spada pod intervencijski dijagnostički pregled jer je potrebno učiniti rez na preponi ili zapešću i uvoditi kateter u jednu od arterija. Primjeni se kontrastno sredstvo koje krvne žile prikaže vidljivima na rendgenskoj snimci (ili CT i MR snimci – ovisno o odabranoj metodi)

Vrste angiografije se razlikuje ovisno o dijelu tijela koje se snima te o vrsti snimanja:

- koronarna angiografija, moždana (cerebralna) angiografija, plućna angiografija, bubrežna angiografija,
- klasična (rendgenska) angiografija, CT angiografija, MR angiografija

MR angiografija je jedina angiografija koja ne zrači, neke magnetske rezonancije ne trebaju kontrastno sredstvo da bi pružile kvalitetnu sliku. Rizik kod MR angiografije predstavljaju pacemakeri i implantanti.

CT angiografija prikazuje kvalitetan prikaz krvnih žila i brža je od klasične i MR angiografije.



Sl. 17. CT angiografija šaka

Izvor: <https://zdravlje.eu/2010/07/07/kompjuterizovana-tomografska-angiografija/>

Kod klasične (rendgenske) angiografije, izloženost zračenju bolesnika i profesionalnog osoblja je velika. Radiolog je vrlo blizu rendgenske cijevi (pa je dodatno izložen i parazitskom zračenju rendgenske cijevi), a primjena zaštitnih rukavica nije moguća.

Zbog toga treba posvetiti osobitu pozornost kod zaštite od zračenja tijekom izvođenja:

- potrebno je suziti snop zračenja na najmanju moguću mjeru,
- skratiti vrijeme dijaskopije što je više moguće,
- raditi što je moguće više ispruženih ruku (udaljiti se od tijela bolesnika – izvora raspršenog zračenja, te rendgenske cijevi – parazitskog zračenja),
- obavezno nošenje zaštitne pregače, zaštitne naočale i štitnik za vrat, a tijekom snimanja treba se zakloniti iza olovnih paravana u dijagnostičkoj prostoriji,
- pri snimanjima koristiti automatsku štrcaljku kad god je moguće,
- obavezna je propisna zaštita na rendgenskom uređaju.

6.1.5. Osobna zaštitna sredstva

Kod rada u kontrolnoj sobi, radnici su zaštićeni dobrom izvedbom prostora u kojima se koriste rendgenski uređaji, a kod rada u prostoru u kojem se nalazi sami rendgenski uređaj koriste se i dodatna zaštitna sredstva i oprema.

Osobna zaštitna sredstva za zaštitu profesionalnog osoblja i bolesnika su: zaštitne pregače za zaštitu unutrašnjih organa, zaštitne rukavice, štitnik za vrat štiti štiti žlijezdu, štitnik za podlaktice i nadlaktice, štit za spolne žlijezde, zaštitne naočale za zaštitu očne leće, zaštitne pregače za bolesnike, štitnici za ovarije i sjemenike bolesnika.



Sl. 18. Osobna zaštitna sredstva za zaštitu profesionalnog osoblja i bolesnika

Izvor: <https://www.universalmedicalinc.com/all-products/radiation-protection.html>

Tijekom provedbe dijagnostičkog postupka moraju se rabiti zaštitna sredstva za smanjenje ozračenja dijelova tijela bolesnika koji se ne pregledavaju bez obzira na postupak koji se provodi, ako primjena takvih sredstava ne ometa ispravnu provedbu dijagnostičkog postupka.

Svojstva zaštitnih sredstva propisno moraju:

- Zaštitna pregača mora izloženog radnika koji je koristi pokrivati od ključnih kostiju do polovice potkoljenice, obuhvaćajući bedra.
- Zaštitni učinak pregača, ovratnika i naočala mora biti jednakovrijedan učinku olova debljine najmanje 0,25 mm.
- Zaštitni učinak rukavica mora biti jednakovrijedan učinku olova debljine najmanje 0,1 mm.

- Zaštitni učinak pregače pri naponu rendgenske cijevi iznad 100 kV ne smije biti manji od učinka olova debljine 0,35 mm.
- Zaštitne pregače i ovratnici ne smiju se savijati i ne smiju biti oštećeni.
- Cjelovitost i ispravnost zaštitnih pregača i ovratnika mora se redovito kontrolirati prema uputama proizvođača, a najmanje jednom godišnje, o čemu mora postojati pismeni dokaz. Necjelovite i neispravne zaštitne pregače i ovratnici ne smiju se koristiti.

Zaštitne pregače treba čuvati jer se olovna guma lako kvari i na pregibima brzo puca. Ispravnim održavanjem olovnoj se gumi može produžiti vijek. Olovnu gumu treba čuvati od topline i sunca. Napuknuta guma i rukavice propuštaju radijaciju zbog toga ih treba povremeno kontrolirati.

Rok zaštitnim rukavicama možemo produžiti tako da se ispod njih nose končane rukavice. One upijaju znoj te tako čuvaju unutarnje dijelove zaštitnih rukavica od djelovanja vlage, ujedno zaštićuju kožu radiologa od podražaja olovom zbog čega može doći do profesionalnog ekcema ruku.

Olovne naočale mogu znatno smanjiti količinu izloženosti zračenju koju radiološka tehnologija „doživljava“ njihovim očima. Primarni cilj je smanjenje količine izloženosti kojoj je radiološka tehnologija podvrgnuta tijekom svoga rada, ali prednosti od korištenja zaštitnih naočala mogu biti podcijenjene od strane samih radioloških tehničara. Jedan od primarnih uvjeta koji može spriječiti korištenje rendgenskih naočala je katarakta odnosno siva mrena.

Standardne naočale uopće ne štite od izloženosti zračenju te zbog toga koristeći dodane mjere opreza, kao što su štitovi od raspršivanja, dodatno smanjuje izloženost zračenju pritom osiguravajući još sigurnije okruženje. Preporučuje se za optimalnu zaštitu da se koriste olovne čaše ili olovni štit te zastori i rafinirana stakla kao dodatna zaštita od raspršivanja zračenja.

6.1.6. Zahtjevi za radni okoliš u zaštiti od ionizirajućeg zračenja

Odjel radiologije gdje se obavljaju dijagnostičke pretrage potrebno je izolirati od okoline, a za to se najčešće koriste olovne ploče ili neki drugi elementi koji zadržavaju prodor rendgenskih zraka u istoj mjeri kao i olovo.

Lokacija rendgen odjela također je bitna, dobro je da se oni nalaze na samom ulazu u bolnicu radi prijema hitnih slučajeva.

Od početka primjene rendgenskih uređaja ti odjeli su se najčešće nalazili u podrumima ili prizemljima bolnica, a i danas je u većini bolnica takav princip zbog toga što je na tim područjima bilo moguće pružiti najbolju zaštitu.

Čekaonica i kabine za presvlačenje pacijenata te tamna komora za razvijanje rendgenskih filmova moraju biti izvan područja izloženosti

U prostoriji s rendgenskim uređajem, akceleratorom ili drugim uređajem koji proizvodi ionizirajuće zračenje može se nalaziti samo oprema i predmeti koji su nužni za korištenje toga uređaja.

Upozoravajuće svjetlo mora biti postavljeno na ulaznim vratima u prostoriju u kojoj se nalazi rendgenski uređaj. Po mogućnosti može se omogućiti otvaranje vrata samo iznutra kada je uređaj u upotrebi te ugradnja prekidača koji isključuje rendgensko zračenje u slučaju otvaranja vrata za vrijeme rada uređaja.



Sl. 19. Prikaz rasporeda radioloških prostorija

Izvor: http://www.wardray-premise.com/structural/special_xray_rooms.html

Sve prostorije također moraju udovoljavati svim zahtjevima iz Pravilnika koji određuje minimalne uvjete u pogledu prostora, radnika i medicinsko-tehničke opreme za obavljanje zdravstvene djelatnosti kojima moraju udovoljavati sve zdravstvene ustanove. Moraju zadovoljavati svim sanitarno-tehničkim i higijenskim uvjetima (mehaničku otpornost i stabilnost, zaštitu od požara, higijenu, zdravlje i zaštitu okoliša, sigurnost u korištenju, zaštitu od buke, osvjetljenje 250-500 lx, visina stropa min. 260 cm, širina vrata min. 90 cm.

Instalacijski sustavi moraju biti prema normi HRN EN 793) i uvjetima u pogledu prostora, radnika i medicinsko-tehničke opreme za pojedine djelatnosti (specijalistička ordinacija mora biti sukladno zaštiti od ionizirajućeg zračenja).

6.2. Zaštita od zračenja u radioterapiji

Radioterapija koristi ionizirajuće zračenje u svrhu uništavanja malignih stanica.

Gotovo 70% onkoloških bolesnika prolazi kroz radioterapiju te je tako ona jedna od najčešćih metoda liječenja tumora. Cilj svake terapije ionizirajućim zračenjima je uništenje bolesnih tumorskih stanica, uz najveću moguću poštedu okolnih zdravih struktura.

U planiranju radioterapije potrebno je uzeti u obzir sljedeće činjenice:

- stanice u fazi ubrzanog dijeljenja, kao što je to slučaj kod tumorskih stanica su najosjetljivije
- mehanizmi oporavka zdravih stanica su brži i lakši u odnosu na tumorske
- nediferencirane matične stanice najzastupljenije u krvotvornom tkivu i spolnim žlijezdama osjetljivije su na zračenje u odnosu na diferencirane stanice čovječjeg tijela (mišićne, živčane, koštane itd.)
- stanice dobro opskrbljene kisikom osjetljivije su na zračenje u odnosu na hipoksične stanice
- različite vrste tumora su različito osjetljive na zračenje

U radioterapiji se izvori ionizirajućeg zračenja koriste na dva različita načina:

- Teleradioterapija (vanjsko zračenje) – najčešći oblik liječenja, izvor zračenja je uređaj koji se naziva linearni akcelerator
- Brahiradioterapija (unutrašnje zračenje) – izvor zračenja se postavlja u aplikator, a aplikator se postavlja unutar bolesnika (izravno u tkivo)

Svi otvori u prostoriju u kojoj se nalazi radioterapijski uređaj moraju se napraviti tako da se spriječi izlazak što većem broju raspršenih fotona i neutrona. Prostorijama u kojima se obavlja priprema i primjena zatvorenih radioaktivnih izvora koji se koriste za brahiterapiju i terapiju s daljinskim upravljanjem izvora, ulazi u postrojenja s panoramskim ozračivanjem te ulazi prostorije s akceleratorom moraju prethoditi zaštitna vrata i labirint.

6.2.1. Teleradioterapija

Teleradioterapija podrazumijeva bolesnika najčešće u ležećem položaju, dok se linearni akcelerator (izvor zračenja) nalazi iznad njega i nije u neposrednom dodiru s bolesnikom. Bolesnik koji je podvrgnut vanjskom zračenju nije opasnost za okolinu jer nije radioaktivan.

Akceleratori moraju imati dvojni sustav za prekidanje ozračivanja. Ako otkáže primarni mjerni sustav, drugi mora prekinuti zračenje nakon što se doza poveća za više od 0,4 Gy u odnosu na dozu postavljenu za terapijski postupak. Također mora imati i pričuvni vremenski prekidač koji može prekinuti zračenje ako prva dva sustava ne isključe ozračivanje.



Sl. 20. Linearni akcelerator

Izvor: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-receives-medical-linear-accelerator-under-partnership-from-manufacturer>

Prostorija u kojoj je smješten akcelerator koji proizvodi rendgensko zračenja energije iznad 10 MeV mora imati ugrađenu odgovarajuću zaštitu od neutrona i poseban uređaj za provjetravanje odgovarajuće učinkovitosti. Ulaz u prostorije s akceleratorom moraju prethoditi zaštitna vrata i labirint. Debljine zidova prostorije mora biti takva da je izloženost osoblja najviše tolika da je u skladu s propisima.

6.2.2. Brahiradioterapija

Pacijente s unesenim zatvorenim radioaktivnim izvorima za brahiterapiju mora se ozračivati u posebno namijenjenim/izgrađenim prostorijama. Za vrijeme ozračivanja pacijentima nisu dozvoljeni posjeti.

Tijekom njege pacijenta kojeg se ozračuje moraju se provoditi sve uobičajene mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja, a naročito uporaba pokretnih štitnika. Nakon ozračivanja pacijenta, mora se provjeriti je li zatvoreni radioaktivni izvor ili dio tog izvora zaostao u njegovu tijelu te je li došlo do radioaktivnog onečišćenja.

U blizini brahiterapijskog uređaja mora biti smješten odgovarajući pomoćni (servisni) spremnik (sef) u kojeg je moguće spremiti zatvoreni radioaktivni izvor kojeg iz bilo kojeg razloga nije moguće vratiti u glavni spremnik.

Zatvoreni radioaktivni izvori za brahiterapiju tehnikom naknadnog uvođenja daljinskim upravljanjem smiju se prenositi ili prevoziti unutar odjela za terapiju isključivo u spremnicima koji su predviđeni za tu namjenu.

Radi provjere položaja aplikatora i/ili zatvorenog radioaktivnog izvora unesenog u pacijenta koriste se rendgenski uređaji za provedbu dijagnostičkih postupaka.

Pri uporabi zatvorenih radioaktivnih izvora za brahiterapiju područja izloženosti su:

- spremišta za privremenu pohranu radioaktivnih izvora u kojima se zatvoreni radioaktivni izvori čuvaju kad se ne koriste,
- prostorije za ozračivanje pacijenta, dok je zatvoreni radioaktivni izvor u prostoriji,
- operacijske dvorane, dok je zatvoreni radioaktivni izvor u operacijskoj dvorani,
- prostorija u kojoj se koristi rendgenski uređaj za dijaskopiju i snimanje koji služi za pozicioniranje zatvorenog radioaktivnog izvora u pacijentu, dok je zatvoreni radioaktivni izvor u prostoriji,
- putovi za vrijeme prijevoza zatvorenih radioaktivnih izvora za brahiterapiju i pacijenta sa zatvorenim radioaktivnim izvorima unesenim u tijelo,
- prostorija sa zatvorenim radioaktivnim izvorom za terapiju vanjskim ozračivanjem s daljinskim upravljanjem.

Područja posebnog nadgledanja smatraju se: prostorije u kojima se otvoreni radioaktivni izvori pripremaju za primjenu i čuvaju prije uporabe, prostorije u kojoj se pacijentima primjenjuje radionuklid i čekaonica za bolesnike kojima su primijenjeni aplikatori.

Na mjestima uporabe zatvorenih radioaktivnih izvora za brahiterapiju na vidnom mjestu moraju biti izvještene upute za postupanje u slučaju izvanrednog događaja.

Svi radnici koji sudjeluju u provedbi brahiterapije moraju biti upoznati s uputama za postupanje u slučaju izvanrednog događaja sa zatvorenim radioaktivnim izvorom koji se koristi u brahiterapiji te moraju biti obučeni za njihovu primjenu.

Tab. 5. Parametri koji se ispituju te rokovi ispitivanja za brahiterapiju [8]

PARAMETAR	UČESTALOST ISPITIVANJA			
	Dnevno	Mjesečno	Godišnje	Nakon zamjene izvora
Sigurnosni paramteri	X			
Jakost izvora	X			
Položaj izvora		X		X
Duljina aplikatora			X	
Vremenski brojač	X			
Linearnost vremena			X	
Kalibracija izvora			X	X

7. MJERE ZAŠTITE U PODRUČJU IZLOŽENOSTI

Nositelj odobrenja za obavljanje djelatnosti s izvorom ionizirajućeg zračenja je pravna ili fizička osoba, tijelo državne uprave i drugo državno tijelo ili tijelo jedinice lokalne ili područne samouprave kojem je dano odobrenje i koje je odgovorno za obavljanje određene djelatnosti s izvorom ionizirajućeg zračenja, nuklearne djelatnosti ili djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora ili obavljanje radnih aktivnosti.

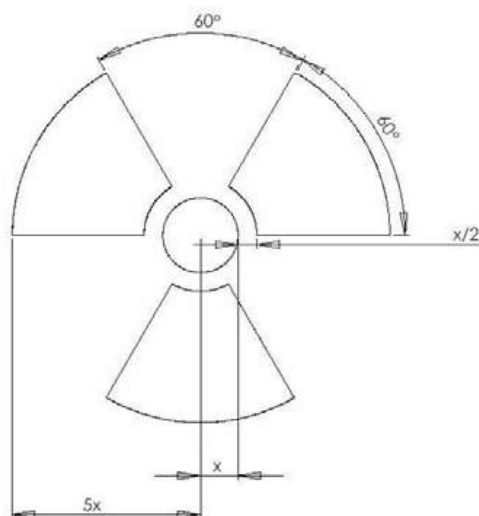
Kako bi što bolje mogli pratiti primjenu mjera nositelj odobrenja obavezan je izraditi **analizu rizika** u skladu s uputama te obnavljati analizu rizika sa svakom izmjenom uvjeta koji mogu bitno utjecati na rizik vezan uz djelatnosti koju obavljaju uporabom izvora ionizirajućeg zračenja. Prilikom izrade i obnavljanja analize rizika obavezan je savjetovati se sa stručnjakom za zaštitu od ionizirajućeg zračenja.

Analiza rizika koristi se kao temelj za primjenu mjera radiološke sigurnosti. Uz osobe koje su izradile analizu, potpisuje ju i stručnjak za zaštitu od ionizirajućeg zračenja s kojim se nositelj odobrenja savjetovao tijekom izrade.

Analiza rizika mora sadržavati sljedeće: naziv, adresa i osobni identifikacijski broj pravne ili fizičke osobe, podaci o djelatnosti, opis djelatnosti s izvorima zračenja, podaci o izvorima zračenja i prostorijama u kojima se upotrebljavaju, mjere zaštite izloženih radnika i stanovništva od ionizirajućeg zračenja, dozna ograničenja, procjene izlaganja zračenju kao posljedica obavljanja djelatnosti i zbrinjavanja radioaktivnog otpada, plan optimizacije zaštite od zračenja, popis i potpisi osoba koje su analizu rizika izradile te stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja s kojim se budući nositelj odobrenja savjetovao.

7.1. Obilježavanje područja izloženosti

Rizik od ionizirajućeg zračenja se označava putem međunarodne oznake za radioaktivnost ISO 361 (Sl. 21.) i predstavljen je crnim ili crvenim simbolom u obliku djeteline na žutoj podlozi uokviren crnim trokutom.



Sl. 21. Međunarodni simbol za radioaktivnost ISO 361

Izvor: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_04_41_782.html

Područje izloženosti ionizirajućem zračenju mora biti obilježeno oznakom opasnosti od ionizirajućeg zračenja prikazanom na slici 22. Područje izloženosti mora biti obilježeno oznakom koja sadrži podatke o vrsti izvora ionizirajućeg zračenja s naznakom radi li se o području nadgledanja ili području posebnog nadgledanja te o riziku vezanim uz izvor. Uz znak za ionizirajuće zračenje mora stajati i pravokutni znak s crvenom podlogom; gore je precrтана silueta muškarca, a u krugu ispod koga piše: Zabranjen ulaz neovlaštenim osobama. Ako postoji mogućnost kontaminacije osoba koja rade i borave u kontroliranoj zoni (npr. na odjelima nuklearne medicine) to se označava posebnom oznakom na kojoj piše: Opasnost od kontaminacije (na žutoj podlozi; iznad znak za radioaktivnost) i Obavezno korištenje zaštitne opreme (na plavoj podlozi, a iznad je znak sa usklikom). Ulaz u područje izloženosti mora biti izveden tako da onemogućava nekontrolirani ulazak.



Sl. 22. Znak opasnosti od zračenja

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje

7.2. Uvjeti za građevine u kojima se koriste izvori ionizirajućeg zračenja

Pri projektiranju i izgradnji građevina ili prostorija namijenjenih za korištenje izvora ionizirajućeg zračenja, odnosno privremenu pohranu radioaktivnih izvora nositelj odobrenja odredit će odgovarajuće zaštitne mjere: dostatan broj i pravilan raspored prostorija, oprema prostorija, tehnološki tijek rada s optimalnom organizacijom radnih mjesta i mjere održavanja osobne čistoće osoblja, odgovarajući sustav provjetravanja te organiziran i siguran sustav sakupljanja i zbrinjavanja radioaktivnog otpada koji nastaje tijekom rada.

Prostorije namijenjene za korištenje radioaktivnih izvora, moraju biti projektirane, izgrađene i opremljene tako da zidovi, vrata, dovratnici, prozori, strop i pod tijekom korištenja izvora ionizirajućeg zračenja u svim uvjetima rada, smanjuju vjerojatnost radioaktivnog onečišćenja na najmanju moguću mjeru.

Vrsta, sastav, debljina, način ugradnje i ostala svojstva materijala i opreme za izgradnju prostorija moraju se odrediti i specificirati projektom uzimajući u obzir:

- najveću moguću aktivnost radioaktivnih izvora, najveću energiju i jakost zračenja, usmjerenost snopa zračenja, efektivno vrijeme proizvodnje ionizirajućeg zračenja te radna mjesta u susjednim prostorijama, odnosno nazočnost osoba u okolišu prostorije namijenjene za korištenje izvora ionizirajućeg zračenja, odnosno privremenu pohranu radioaktivnog izvora
- granice ozračenja i preporučena dozna ograničenja za pojedinog stanovnika i izložene radnike.

Brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta na vanjskoj površini zidova, vrata, dovratnika, prozora, stropa i poda te na položajima mjesta rada mora biti toliko niska koliko je to razumno moguće postići uzimajući u obzir tehničke, gospodarske, socijalne i ostale čimbenike prilikom projektiranja, gradnje i opremanja prostorije za korištenje izvora ionizirajućeg zračenja.

Za razgradnju građevina u kojima su bili smješteni izvori ionizirajućeg zračenja ili su se obavljale djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja mora biti izrađen Plan razgradnje. Plan razgradnje odobrava Zavod.

7.3. Svjetlosna signalizacija uređaja koji odašilje ionizirajuće zračenje

Na upravljačkoj jedinici uređaja koji odašilje ionizirajuće zračenje moraju postojati vidljivo označene oznake namjene svakog prekidača, mora biti ugrađena svjetlosna signalizacija koja ukazuje da je uređaj uključen i da je emitiranje ionizirajućeg zračenja u tijeku.

Na uređaju koji ima ugrađen i zvučni signal koji se javlja kad se emitira ionizirajuće zračenje, trajanje tog signala mora biti najmanje jednako vremenu u kojem se emitira ionizirajuće zračenje.

Stacionarni električni uređaj koji proizvodi ionizirajuće zračenje mora imati sigurnosni prekidač za trenutno prekidanje dovoda električne energije u uređaj, koji se mora nalaziti i u prostoriji iz koje se upravlja uređajem.

7.4. Kategorizacija i evidencija izloženih radnika

Nositelj odobrenja za obavljanje djelatnosti s izvorom ionizirajućeg zračenja ili vanjski izvođač mora osigurati provođenje kategorizacije svojih izloženih radnika, u cilju praćenja i nadzora, prema sljedećem kriteriju:

Izloženi radnici **kategorije A** su radnici koji bi mogli u jednoj godini primiti:

- efektivnu dozu višu od 6 mSv ili
- ekvivalentnu dozu višu od 15 mSv za očnu leću ili
- ekvivalentnu dozu višu od 150 mSv za kožu i ekstremitete.

Izloženi radnici **kategorije B** su radnici koji nisu klasificirani kao radnici kategorije A, odnosno primaju manju dozu zračenja od njih.

Nositelj odobrenja ili vanjski izvođač mora osigurati provođenje kategorizacije svojih izloženih radnika prije početka rada u području izloženosti.

Nositelj odobrenja dužan je voditi evidenciju o svim izloženim radnicima kategorije A i ako je prikladno kategorije B koja sadrži najmanje sljedeće podatke:

- podaci o izloženom radniku
- podaci o zaposlenju
- rezultati procjene osobnog ozračenja – za svako mjerno razdoblje

- rezultati procjene ozračenja za slučajno izlaganje
- rezultati procjene ozračenja u slučaju posebno odobrenog izlaganja
- rezultati procjene ozračenja u slučaju izvanrednog događaja
- rezultati mjerenja iz radiološkog nadzora mjesta rada korišteni za procjenu pojedinačnih doza ako je nužno

Nositelj odobrenja dužan je čuvati sve podatke iz evidencije za svakog od svojih izloženih radnika do godine kad se očekuje navršavanje 75. godine starosti izloženog radnika, ali nikako ne kraće od 30 godina od dana prestanka rada izloženog radnika u području izloženosti.

7.5. Uvjeti radnika izloženog ionizirajućem zračenju

Poslovi pri kojima je radnik izložen ionizirajućem zračenju su poslovi rukovanja izvorima ionizirajućeg zračenja i drugi poslovi koji se obavljaju u okolini u kojoj se koriste izvori ionizirajućeg zračenja.

Posebni uvjeti radnika:

- Dob života (zahtjevi): radnik stariji od 18 godina
- Spol (kontraindikacije): žena za vrijeme trudnoće
- Stručna sposobnost (zahtjevi): odgovarajuća stručna osposobljenost
- Zdravstveno stanje (kontraindikacije): bolesti krvotvornih organa, maligne bolesti, bolesti očne leće (katarakta), bolesti kože uzrokovane ionizacijskim zračenjem, teži duševni poremećaji, teže bolesti centralnog živčanog sustava, teži poremećaji endokrinih žlijezda
- Psihička sposobnost (samo za rukovanje nuklearnim reaktorima i sl.):
Zahtjevi: opća intelektualna razvijenost, perceptivna sposobnost, emocionalna stabilnost iznad donje granice prosjeka. Kontraindikacije: izrazitija anksioznost

Rok za ponovnu provjeru:

- Zdravstvenog stanja: 12 mjeseci
- Psihičke sposobnosti: 48 mjeseci

7.6. Zdravstvena sposobnost izloženih radnika

Zdravstvena sposobnost za rad u području izloženosti mora se provjeravati za učenike, studente i specijalizante prije početka obrazovanja za rad u području izloženosti te za pripravnike i izložene radnike prije početka rada u području izloženosti u okviru prethodnog zdravstvenog pregleda.

Zdravstvena sposobnost izloženih osoba određuje se:

- **Prethodnim zdravstvenim pregledom** - obavezan je za sve izložene osobe bez obzira na kategoriju izloženosti. Obavlja se prije početka obrazovanja za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja ili prije početka rada u području izloženosti.
- **Redovnim zdravstvenim pregledom** - obavezan je za izložene radnike kategorije A odnosno studente ili pripravnike u dobi od 18 godina ili starije koji bi tijekom obrazovanja za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja mogli biti ozračeni kao izloženi radnici kategorije A. Redovni zdravstveni pregled **obavlja se svakih 12 mjeseci**.
- **Nadzornim zdravstvenim pregledom** - obavlja se u roku kraćem od redovnog zdravstvenog pregleda kada specijalist medicine rada/rada i sporta odredi potrebu takvoga pregleda.
- **Izvanrednim zdravstvenim pregledom** - obavlja se kod osoba koje su primile dozu veću od doze propisane Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti i/ili na osnovi prijedloga doktora medicine specijalista medicine rada/rada i sporta ili izabranog liječnika primarne zdravstvene zaštite ili na zahtjev poslodavca ili radnika.
- **Izlaznim zdravstvenim pregledom** - obavezan je za izloženu osobu bez obzira na kategoriju izloženosti, a obavlja se nakon prestanka rada u području izloženosti.

Troškove provjere zdravstvenih pregleda izloženih radnika snosi nositelj odobrenja koji izdaje radniku uputnicu za utvrđivanje zdravstvene sposobnosti (Sl. 23.).

Troškove provjere zdravstvenih pregleda osoba koje se obučavaju ili obrazuju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja tijekom obrazovanja snosi ustanova u okviru čijih se nastavnih planova polaznici obučavaju ili obrazuju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja.

<div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 50px; margin: 0 auto;"></div> <p style="text-align: center; margin-top: 5px;"><i>(poslodavac)</i></p>	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">Obrazac RA-1</div> <p>Broj: _____</p> <p>Datum: _____</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: 0;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> <td style="width: 20px; height: 20px;"> </td> </tr> <tr> <td colspan="10" style="text-align: center; font-size: small;">OIB</td> </tr> </table>											OIB									
OIB																					
<p>UPUTNICA</p> <p>za utvrđivanje zdravstvene sposobnosti radnika</p>																					
<p>Ime i prezime: _____ , _____ <i>(ime oca – majke)</i></p> <p>Datum i mjesto rođenja: _____ OIB _____</p> <p>Zanimanje: _____ Školska sprema: _____</p> <p>Poslovi za koje se utvrđuje zdravstvena sposobnost: _____</p> <p>1) Poslovi su prema članku _____ točka _____ Pravilnika o poslovima s posebnim uvjetima rada.</p> <p>2) Poslovi prema drugim zakonima, propisima ili kolektivnom _____ _____ se utvrđuje zdravstvena sposobnost radnika.</p> <p style="font-size: small;"><i>(navesti zakon, propis ili kolektivni ugovor)</i></p> <p>3) Poslovi su prema propisima o mirovinskom osiguranju utvrđeni kao poslovi na kojima se staž osiguranja računa s povećanim trajanjem.</p> <p>Ukupni radni staž: _____ Radni staž na poslovima za koje se utvrđuje zdravstvena sposobnost: _____</p> <p>Zdravstveni pregled: <input type="checkbox"/> prethodni <input type="checkbox"/> periodički <input type="checkbox"/> izvanredni</p> <p>Posljednji zdravstveni pregled je učinjen _____ prema članku _____ točki _____ Pravilnika o poslovima s posebnim uvjetima rada, ili _____</p> <p style="font-size: small;"><i>(navesti zakon, propis ili kolektivni ugovor iz članka 2. stavka 1. podstavka 2. ili 3. Pravilnika)</i></p> <p>s ocjenom zdravstvene sposobnosti _____</p> <p>Kratak opis poslova: _____</p> <p>Strojevi, alati, aparati¹: _____</p> <p>Predmet rada²: _____</p> <p>Mjesto rada: <input type="checkbox"/> u zatvorenom <input type="checkbox"/> na otvorenom <input type="checkbox"/> na visini <input type="checkbox"/> u jami <input type="checkbox"/> u vodi <input type="checkbox"/> pod vodom <input type="checkbox"/> u mokrom.</p> <p>Organizacija <input type="checkbox"/> u smjenama <input type="checkbox"/> noćni rad <input type="checkbox"/> terenski rad <input type="checkbox"/> radi sam <input type="checkbox"/> radi s grupom <input type="checkbox"/> radi sa strankama</p> <p><input type="checkbox"/> radi na traci <input type="checkbox"/> brzi tempo rada <input type="checkbox"/> ritam određen <input type="checkbox"/> monotonija.</p> <p>Položaj tijela i aktivnosti³: <input type="checkbox"/> rad stojeći <input type="checkbox"/> učestalo sagibanje <input type="checkbox"/> podvlačenje <input type="checkbox"/> rad sjedeći <input type="checkbox"/> zakretanje trupa <input type="checkbox"/> balansiranje</p> <p><input type="checkbox"/> u pokretu <input type="checkbox"/> klečanje <input type="checkbox"/> uspinjanje ljestvama <input type="checkbox"/> kombinirano <input type="checkbox"/> čučanje <input type="checkbox"/> uspinjanje stepenicama</p> <p><input type="checkbox"/> diz. tereta _____ kg <input type="checkbox"/> prenoš. tereta _____ kg <input type="checkbox"/> guranje tereta _____ kg</p> <p>U poslu je <input type="checkbox"/> vid na daljinu <input type="checkbox"/> vid na blizinu <input type="checkbox"/> raspoznavanje boja <input type="checkbox"/> dobar sluh <input type="checkbox"/> jasan govor</p> <p>Uvjeti rada: <input type="checkbox"/> visoka temperatura <input type="checkbox"/> visoka vlažnost <input type="checkbox"/> niska temperatura <input type="checkbox"/> buka <input type="checkbox"/> vibracije stroja ili alata</p> <p><input type="checkbox"/> vibracije poda <input type="checkbox"/> povišeni atmosferski tlak <input type="checkbox"/> povećana izloženost ozljedama</p> <p><input type="checkbox"/> ionizirajuća zračenja <input type="checkbox"/> neionizirajuća zračenja <input type="checkbox"/> prašina.</p> <p>Kemijske tvari: _____</p> <p>Biološke štetnosti: _____</p>																					
<p>¹ upisuju se strojevi, alati i aparati kojima radnik rukuje ili posluhuje</p> <p>² upisuju se radne tvari s kojima radnik rukuje ili dolazi u dodir</p> <p>³ zaokružuje se odgovarajući položaj tijela i aktivnosti koje se svakodnevno javljaju M.P. _____</p> <p>⁴ zaokružuje se funkcija bez koje se predviđeni posao ne može obaviti <i>(potpis odgovorne osobe)</i></p>																					

Sl. 23. Uputnica za utvrđivanje zdravstvene sposobnosti radnika

Izvor: http://www.hzzo-net.hr/dload/zastita_zdravlja/Obrazac_RA-1.pdf

8. ZAKLJUČAK

Ionizirajuće zračenje je prirodna i stalna pojava u prirodi te u brojnim ljudskim djelatnostima. Upotreba umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja sve je raširenija. Bez obzira koliko upotreba takvog zračenja ima veliku korist ono je i dalje veoma opasno po okoliš, zdravlje i život ljudi i životinja.

Izrazito je važno napomenuti da će rizik uvijek postojati, ali ne mora nužno predstavljati neotklonjivu opasnost za zdravlje i život profesionalno izloženih djelatnika. Razvoj svijesti i znanja o tim rizicima uvelike smanjuju štetu te optimiziraju sigurnu uporabu ionizirajućeg zračenja.

Ionizirajuće zračenje je jedno od osnovnih sredstava u medicini, u dijagnostici i u liječenju. Sve veća uporaba ionizirajućeg zračenja povećava mogućnost nastanka štetnosti opasnih po zdravlje ako se ono ne koristi pravilno, stoga je od iznimne važnosti da radnici budu educirani o svim mogućim metodama zaštite i da se pridržavaju zakonskih i drugih propisa o zaštiti od zračenja te da se ponašaju u skladu s pravilima struke kako bi se štetnosti od zračenja svele na minimum zbog zaštite vlastitog zdravlja i zdravlja pacijenata.

Svako radno mjesto sadrži tvari i opremu koje mogu nanijeti štetu zaposleniku. Svi radnici imaju pravo raditi u okruženju gdje su rizici za njihovo zdravlje i sigurnost pravilno kontrolirani. Također, obveza je radnika koristiti se propisanom zaštitnom opremom, te aktivno sudjelovati u zaštiti vlastitog zdravlja.

LITERATURA

- [1] Jakobović Z.: „Ionizirajuće zračenje i čovjek“, Školska knjiga, Zagreb (1991.), ISBN: 86-03-99228-2
- [2] Novaković M.: „Zaštita od ionizirajućih zračenja: propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima“, Ekoteh-dozimetrija, Zagreb (2001.), ISBN: 953-98623-0-2
- [3] Janković S., Eterović D.: „Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike“, Medicinska naklada, Zagreb (2002.), ISBN: 953-176-176-0
- [4] Hebrang, A., Klarić-Čustović, R., „Radiologija“, Medicinska naklada, Zagreb (2007.), ISBN: 953-176-338-0

Internet izvori:

- [5] Radioaktivnost, <https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>, pristupljeno 15.04.2020.
- [6] Dozimetrijski nadzor, <https://civilna-zastita.gov.hr/>, pristupljeno 04.05.2020.
- [7] Nuklearne elektrane, <https://www.nek.si/hr>, pristupljeno 04.05.2020.

Korišteni pravilnici:

- [8] Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, (NN 53/2018), pristupljeno 15.04.2020.
- [9] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 38/2018), pristupljeno 20.04.2020.
- [10] Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/84), pristupljeno 04.05.2020.
- [11] Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti (NN 66/2018), pristupljeno 04.05.2020.

POPIS SLIKA

STRANICA

Sl. 1. Izvori ionizirajućeg zračenja.....	2
Sl. 2. Nastajanje X – zraka u rendgenskoj cijevi.....	6
Sl. 3. Spektar rendgenskog zračenja.....	7
Sl. 4. Emisija gama zračenja	8
Sl. 5. Alfa raspad	9
Sl. 6. Beta minus (β^-) i beta plus (β^+) raspad	11
Sl. 7. Ionizacijska komora	17
Sl. 8. Geiger-Müllerov brojač	18
Sl. 9. Scintilacijski kristal okružen raznim scintilacijskim uređajima	19
Sl. 10. Termoluminiscentni dozimetri za mjerenje izloženosti očne leće, šake ili kože te cijelog tijela	21
Sl. 11. Penkala dozimeter	21
Sl. 12. Moć prodiranja ionizirajućeg zračenja.....	23
Sl. 13. Primjer masivnog olovnog štita za potrebe nuklearnog laboratorija	30
Sl. 14. Odlaganje radioaktivnog otpada	34
Sl. 15. CT uređaj	37
Sl. 16. Uređaj za dijaskopski pregled	39
Sl. 17. CT angiografija šaka	40
Sl. 18. Osobna zaštitna sredstva za zaštitu profesionalnog osoblja i bolesnika.....	41
Sl. 19. Prikaz rasporeda radioloških prostorija	43
Sl. 20. Linearni akcelerator	45
Sl. 21. Međunarodni simbol za radioaktivnost ISO 361	49
Sl. 22. Znak opasnosti od zračenja	49
Sl. 23. Uputnica za utvrđivanje zdravstvene sposobnosti radnika	54

POPIS TABLICA

STRANICA

Tab. 1. Težinski koeficijent zračenja WR [9]	14
Tab. 2. Težinski koeficijenti tkiva WT [9].....	15
Tab. 3. Godišnje granice ozračenja za radnike, pripravnike, studente i stanovništvo [9].....	24
Tab. 4. Biološki učinci ionizirajućeg zračenja [1]	27
Tab. 5. Parametri koji se ispituju te rokovi ispitivanja za brahiterapiju [8].....	47