

Zaštita od zračenja u nuklearnoj medicini - pregledni rad

Paragi, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:176:733214>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-23**

Repository / Repozitorij:



Sveučilišni odjel zdravstvenih studija
SVEUČILIŠTE U SPLITU

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
Podružnica
SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ
RADIOLOŠKE TEHNOLOGIJE

Martina Paragi

**ZAŠTITA OD ZRAČENJA U NUKLEARNOJ MEDICINI -
pregledni rad
Diplomski rad**

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
Podružnica
SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ
RADIOLOŠKE TEHNOLOGIJE

Martina Paragi

**ZAŠTITA OD ZRAČENJA U NUKLEARNOJ MEDICINI -
pregledni rad**

**RADIATION PROTECTION IN NUCLEAR MEDICINE -
review**

Diplomski rad / Master's Thesis

Mentor:

Ana Barić Žižić, doc. dr. sc.

Split, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu

Sveučilišni odjel zdravstvenih studija

Sveučilišni diplomski studij radiološke tehnologije

Znanstveno područje: biomedicina i zdravstvo

Znanstveno polje: kliničke medicinske znanosti

Mentor: Ana Barić Žižić, doc. dr.sc.

ZAŠTITA OD ZRAČENJA U NUKLEARNOJ MEDICINI – pregledni rad

Martina Paragi, 1003122276

SAŽETAK

U nuklearnoj medicini mogu se pojaviti tri različite vrste izloženosti ionizirajućem zračenju: medicinska, profesionalna i javna. Medicinska izloženost odnosi se na pacijente koji imaju koristi od dijagnostičkih ili terapijskih postupaka primjenom ionizirajućeg zračenja. Drugu skupinu čine profesionalno izložene osobe koje rade na odjelu nuklearne medicine, a treća skupina su građani. Na temelju Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti («Narodne novine», br. 141/13, 39/15 i 130/17) ravnatelj Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost, u suradnji s ministrom nadležnim za graditeljstvo, donio je *Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja* prema kojemu zaštita od zračenja u nuklearnoj medicini započinje već pri gradnji nuklearnomedicinskog odjela. Rad s otvorenim izvorima zračenja zahtjeva prostorije izgrađene od nehigroskopskih materijala te otpornih na utjecaj kemikalija i topline. Također, prostorije je potrebno dobro ventilirati. Podovi, kako bi se lakše održavali, moraju biti glatki bez prekida i pukotina. Pravilnik propisuje i sva postupanja s otvorenim izvorima zračenja: rukovanje u za to namijenjenim i posebno označenim prostorijama, nošenje radionuklida uz korištenje hvataljki, pinceta, apliciranje špricama obloženim olovnom štitom. Odjeću i tijelo je potrebno štititi posebnim zaštitnim odijelima i olovnim pregačama. Pacijent kojemu se primijeni radiofarmak se izolira od ostalih pacijenata i osoblja zaštitnim olovnim pregradama, a medicinsko osoblje vrši samo nužnu njegu uz što kraće zadržavanje uz pacijenta.

Ključne riječi: nuklearna medicina; radiofarmak; zaštita; zračenje

Rad sadrži: 52 stranice; 18 slika; 3 tablice

Jezik izvornika: hrvatski

BASIC DOCUMENTATION CARD

MASTER THESIS

University of Split
University Department for Health Studies
University graduate study of Radiological technology

Scientific area: biomedicine and health care

Scientific field: clinical medical sciences

Supervisor: Ana Barić Žižić, doc.dr.sc.

RADIATION PROTECTION IN NUCLEAR MEDICINE - review

Martina Paragi, 1003122276

SUMMARY

Keywords: nuclear medicine; protection; radiation; radiopharmaceutical

Thesis contains: 52 pages; 18 figures; 3 tables

Original in: Croatian

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA..... | I |
| BASIC DOCUMENTATION CARD..... | II |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. CILJ RADA..... | 3 |
| 3. ISPITANICI I METODE..... | 4 |
| 4. POVIJEST NUKLEARNE MEDICINE..... | 5 |
| 4.1 NUKLEARNA MEDICINA U HRVATSKOJ | 6 |
| 5. INTERAKCIJA ZRAČENJA I MATERIJE | 7 |
| 6. RADIOBIOLOGIJA | 8 |
| 6.1 ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA STUPANJ OŠTEĆENJA ORGANIZMA | 8 |
| 6.2 OSJETLJIVOST TKIVA NA IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE | 9 |
| 6.3 BIOLOŠKI EFEKTI ZRAČENJA | 10 |
| 7. ZAŠTITA OD ZRAČENJA | 11 |
| 7.1 CILJ | 11 |
| 7.2 NAČELA ZAŠTITE OD ZRAČENJA | 12 |
| 7.3 GRANICA DOZE | 12 |
| 7.4 PRAĆENJE DOZE NA RADNOM MJESTU | 13 |
| 7.5 MJERNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE DOZE | 14 |
| 8. NAČINI ZAŠTITE OD ZRAČENJA..... | 17 |
| 8.1 ZAŠTITA PACIJENTA | 17 |
| 8.1.1 Trudnice (embrij, fetus)..... | 19 |
| 8.1.2 Dojilje | 22 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 8.1.3 | Pacijentice koje planiraju trudnoću..... | 25 |
| 8.1.4 | Djeca..... | 26 |
| 8.2 | ZAŠTITA STANOVNIŠTVA..... | 29 |
| 8.3 | ZAŠTITA PROFESIONALNOG OSOBLJA | 31 |
| 8.3.1 | Preporuke i oprema za smanjenje profesionalne izloženosti | 33 |
| 9. | RUKOVANJE S OTVORENIM IZVORIMA ZRAČENJA | 35 |
| 9.1 | PRIMJENA RADIOAKTIVNIH PRIPRAVAKA PACIJENTIMA..... | 37 |
| 10. | PROSTORNO UREĐENJE..... | 38 |
| 11. | POSTUPCI U SLUČAJU KONTAMINACIJE | 42 |
| 11.1 | DEKONTAMINACIJA LJUDI | 42 |
| 11.2 | DEKONTAMINACIJA PROSTORA | 44 |
| 12. | ZAKLJUČAK | 45 |
| 13. | LITERATURA..... | 46 |
| 14. | ŽIVOTOPIS | 51 |

1. UVOD

U fizici zračenje predstavlja prijenos energije elektromagnetskim valovima ili snopovima subatomske čestice koje se gibaju kroz prostor. Razlikujemo više oblika zračenja, a u medicini posebno mjesto zauzima ionizirajuće zračenje. To je zračenje koje prolaskom kroz materiju izaziva ionizaciju i predaje joj energiju. Kako ljudska osjetila nisu osjetljiva na ionizirajuće zračenje tj. nemoguće ga je osjetilima prepoznati, potrebna je posebna instrumentacija za detekciju. Poznato je da visoke doze ionizirajućeg zračenja primljene u jako kratkom vremenu mogu biti fatalne za živa bića. S druge strane, niske doze mogu izazvati promjene u stanicama tkiva i organa koje kasnije vode prema nastanku malignih bolesti i genetskih oštećenja (1).

Unatoč tome uporaba umjetnih izvora zračenja je sve raširenija. Tako u medicini uporaba umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja nema adekvatne zamjene i koristi se u dijagnostici, terapiji te sterilizaciji medicinskog pribora i opreme. Osim u medicini zračenje se koristi i u drugim djelatnostima, kao što su npr. industrija hrane gdje se koristi za konzerviranje namirnica, a koristi se još i u gospodarstvu, poljodjelstvu, znanosti te mnogim drugima (2).

Korištenje ionizirajućeg zračenja uz mnoge benefite donosi i rizik. Tom riziku ne podliježu samo osobe koje rukuju njime već i stanovništvo, stoga je potrebna kontrolirana primjena izvora ionizirajućeg zračenja. Opasnost koju izaziva ionizirajuće zračenje ne može se u potpunosti ukloniti, ali je moguće ograničiti i smanjiti uporabu izvora raznim tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama. Upravo iz tog razloga svaka država je obvezna uspostaviti sustav zaštite od zračenja na svim razinama društvenog ustrojstva. U Republici Hrvatskoj područje radiološke i nuklearne sigurnosti uređeno je Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti i pripadajućim podzakonskim aktima. Do 31. prosinca 2018. godine tijelo državne uprave nadležno za poslove radiološke i nuklearne sigurnosti bio je Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, a 1. siječnja 2019. godine Ministarstvo unutarnjih poslova preuzelo je nadležnost za provedbu Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Ministarstvo unutarnjih poslova surađuje s ostalim tijelima državne

uprave, državnim upravnim organizacijama, stručnim i znanstvenim organizacijama te domaćim i međunarodnim organizacijama u području radiološke i nuklearne sigurnosti, a zaduženo je za izdavanje odobrenja i rješenja o registraciji za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja te različite dozvole i suglasnosti. Također, ministarstvo prati ozračenje izloženih radnika, organizira stručno obrazovanje, nadzire i kontrolira uporabu izvora ionizirajućeg zračenja i brine o zaštiti pacijenata (3).

2. CILJ RADA

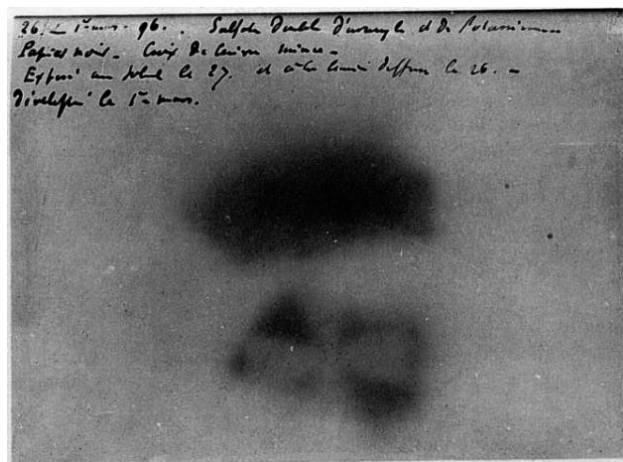
U ovom preglednom radu cilj je pregledom dostupne literature prikazati zaštitu od zračenja u nuklearnoj medicini. Primarni cilj je prikazati kako se zaštita od zračenja u nuklearnoj medicini ne odnosi samo na profesionalno osoblje i pacijenta već i na stanovništvo, a dobrom edukacijom profesionalnog osoblja moguće je zaštititi sve tri skupine. Sekundarni cilj je prikazati kako bi trebao izgledati dijagnostički odjel, ali i odjel nuklearne medicine namijenjen za terapiju radioaktivnim izotopima te kako to utječe na zaštitu. Također, cilj je i prikazati smjernice koje izdaje Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*, IAEA) te kako su implementirane u Hrvatski Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti.

3. ISPITANICI I METODE

Za izradu rada korištena je dostupna literatura relevantna za temu rada kao što su publikacije Međunarodne agencije za atomsku energiju, Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, knjige nuklearne medicine, te PubMed i druge dostupne internetske stranice.

4. POVIJEST NUKLEARNE MEDICINE

Nuklearna medicina je grana medicine koja za ostvarivanje svojih ciljeva kao što su dijagnostika i liječenje bolesti uključuje i druge znanosti, poput fizike i kemije. Od velike važnosti za sam razvoj nuklearne medicine je razvoj teorije o atomskoj strukturi tvari. Zahvaljujući Wilhelmu C. Röntgenu i otkriću prodornog rendgenskog zračenja započinje razvijanje slike strukture atoma, osim toga, svojim istraživanjem potaknuo je 1896. godine, Antoineta Henrija Becquerela na proučavanje fosforescentnih materijala. Želio je uvidjeti može li izlaganjem fosforescentnih materijala jakom vidljivom svjetlu natjerati ih da emitiraju rendgenske zrake. Uranijeve soli izložio je jakoj sunčevoj svjetlosti, zamotane u crni papir kako bi blokirao vidljivu svjetlost te postavio na fotografske ploče. Nakon nekog vremena razvio je ploče gdje je uočio obrise soli i zaključio da su soli uranija apsorbirale sunčevu svjetlost te fosforescencijom emitirale rendgensko zračenje. Nakon ovog krivog zaključka sasvim slučajno je, nešto kasnije 1896. godine, došao do onoga pravog otkrića. Iako imajući prethodnu teoriju o apsorpiranju sunčeve svjetlosti i emitiranju rendgenskog zračenja, odlučio je razviti fotografske ploče koje je čuvao u ladici umotane u tamni papir zajedno sa paketom soli uranija i medaljonom s malteškim križem. Razvijene ploče tako zamotane nisu trebale biti izložene takozvanom rendgenskom zračenju uranijevih soli, ali na Becquerelovu sreću razvijene ploče pokazale su medaljon i križ te ga dovele do otkrića spontanog zračenja uranija (4).



Slika 1. Razvijena ploča sa slikom malteškog križa na medaljonu

Izvor: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34250151/>

Ponavljanjem postupka otkrio je kako se s vremenom smanjuje „učinak“ uranija. Becquerelovo otkriće nije odmah povezano s medicinom, međutim otvorio je put razumijevanju strukture atoma i radioaktivnosti, što će se kasnije pokazati ključnim za dijagnostičke i terapijske primjene u medicini (4). Godinu nakon njegovog otkrića Marie Curie obznanila je svoje otkriće novih elemenata, radija i polonija te koristi termin radioaktivnost. Pionirsko istraživanje Marie Curie dovelo je do spoznaje da je zračenje moćan alat sa širokim rasponom potencijalnih primjena u medicini te da se može koristiti za proučavanje i liječenje bolesti, posebice uz značajan intenzitet i energiju zračenja koje emitira radij (5). Ova rana istraživanja unaprijedila su znanstveno razumijevanje atomske fizike i omogućili put razvoju nuklearne medicine (6).

Prema nekim izvorima, prva medicinska uporaba radioaktivnih izotopa dogodila se 1923. godine kada je mađarski kemičar George de Hevesy upotrebio olovo-212, radioaktivni izotop, da bi istražio apsorpciju i translokaciju olova u biljkama, zbog čega je zaslužio naziv „otac nuklearne medicine“ (7). Iako je primarna upotreba bila u botanici pokazala je potencijal izotopa kao markera u nuklearnoj medicini. Mogućnost korištenja radioaktivnih izotopa kao markera ili terapijskih sredstava unaprijedila je dijagnostičko oslikavanje i liječenje, što je dovelo do revolucionarnih tehnika kao što su PET skeniranje, SPECT i radioterapija za liječenje karcinoma (6). Od 1930. do 1950. nuklearna medicina zbog raznih tehnoloških otkrića, između ostalog razvoja ciklotrona, uređaja koji ubrzava nabijene čestice do visokih energija, omogućujući bombardiranje materijala za proizvodnju umjetnih radionuklida, doživljava pravu evoluciju. Prije nego je izumljen ciklotron istraživači su se oslanjali na prirodne radionuklide, koji su bili rijetki i ograničene raznolikosti. Ciklotron je stvorio širi raspon radionuklida koji su bili važni za proširenje mogućnosti nuklearne medicine, posebice u dijagnostici (6).

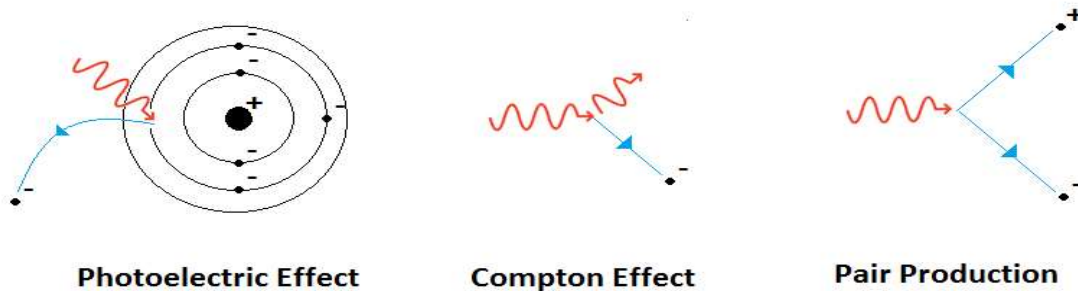
4.1 NUKLEARNA MEDICINA U HRVATSKOJ

Početak nuklearne medicine u Hrvatskoj ostvarilo je Vijeće medicinskog fakulteta u Zagrebu koje je 1. srpnja 1959. donijelo odluku o osnivanju Radioizotopnog odjela u sklopu Interne klinike na Rebru. Nedugo nakon toga započinje osnivanje odjela nuklearne medicine

diljem Hrvatske: 1963. Sestre milosrdnice, potom Rijeka 1965., Split 1966., Osijek 1967., Varaždin 1969., Dubrovnik 1969., Zadar 1980., Šibenik 1980., Klinička bolnica Dubrava 1989., te Pula 2006. Kao osnovna specijalistička grana medicine nuklearna medicina je uvrštena u Pravilnik o specijalizacijama 30.travnja 1974. (7).

5. INTERAKCIJA ZRAČENJA I MATERIJE

Prolaskom zračenja kroz materiju dolazi do ionizacije, a energija zračenja se predaje elektronima u atomima. Alfa i beta čestice predstavljaju čestična zračenja, a prolaskom kroz materiju sudaraju se s atomima i predaju dio svoje energije elektronima. Alfa čestica u odnosu na beta česticu je znatno veće mase te predaje veću energiju materiji, a zbog velike mase ima i kraći put. Obzirom na veliku masu alfa česticu može se zaustaviti listom papira. Beta čestice imaju manju masu, rjeđe se sudaraju s atomima te im je potreban dulji put da bi predale svu svoju energiju. Druga vrsta zračenja je elektromagnetsko zračenje koje je sastavljeno od fotona (2). Kod takve vrste zračenja nema klasičnih sudara već tri mehanizma interakcije fotona i materije. Prvi takav mehanizam je fotoelektrični efekt. Foton se sudara s elektronom u elektronskom omotaču pri čemu mu predaje svu svoju energiju. Foton nestaje, a elektron se oslobađa iz atoma te ostaje atom s pozitivnim nabojem. Ovo je slučaj fotona niže energije, dok fotoni više energije predaju elektronu dio svoje energije i izbace ga iz elektronskog omotača pod nekim kutom sa umanjenom energijom. Energija zračenja je smanjena, ali foton nije nestao. Ovakav mehanizam interakcije naziva se Comptonov efekt. Njime nastaje raspršeno ili sekundarno zračenje koje predstavlja veliki problem u zaštiti od zračenja. Comptonov efekt je najvjerojatniji za gama zrake čija je energija jednaka energijskom ekvivalentu mase elektrona $E_{\gamma}=511 \text{ keV}$. I treći mehanizam je tvorba para elektron-pozitron koji se događa kada je energija zračenja veća od zbroja mase mirovanja elektrona i pozitrona, a iznosi 1.02MeV . Foton takve energije prolaskom kraj jezgre nestaje trošeći svoju energiju za stvaranje para elektron/pozitron. Proces stvaranja para uvijek prati anihilacijsko zračenje i bitan je samo za fotone vrlo visokih energija te učestaliji u sredstvima s visokim atomskim brojem (8).



Slika 2 Mehanizmi interakcije fotona i materije

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/The-interactions-between-photons-and-tissue-Showing-the-photoelectric-effect-the_fig2_322365936

6. RADIOBIOLOGIJA

Radiobiologija složenica je riječi „radio“ i „biologija“ što bi značilo radijacijska biologija, odnosno grana biofizike koja proučava djelovanje različitih vrsta zračenja na žive organizme, od subcelularne i celularne razine sve do cijelog organizma ili populacije (9). Izloženost zračenju moguće je podijeliti u tri skupine, na profesionalnu izloženost kojoj pripadaju svi izloženi ionizirajućem zračenju tijekom obavljanja rada iz izvora zračenja na radnom mjestu. Potom, medicinska izloženost, svaka izloženost ionizirajućem zračenju u svrhu dijagnostike ili terapije. I treća skupina je izloženost stanovništva tj. ukupna izloženost stanovništva koja ne podrazumijeva ozračivanje u medicinske svrhe i profesionalnu izloženost (10).

6.1 ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA STUPANJ OŠTEĆENJA ORGANIZMA

Stupanj oštećenja organizma ovisit će o čimbenicima kojima je organizam bio izložen. Tako jedan od čimbenika i najosnovniji je apsorbirana doza koja je prema definiciji količina energije predana jediničnoj masi tvari tijekom prolaska zračenja kroz nju. Ona određuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja na organizam, a što je veća to je i njezin biološki

učinak veći. Stupanj oštećenja ne ovisi samo o predanoj energiji nego i njezinoj vrsti. Jednaka količina apsorbirane doze različitih vrsta zračenje neće dati jednak učinak na tkivo. Kako bi se dobila mjera koja vrijedi za pojedine vrste zračenja, apsorbirana doza množi se faktorom karakterističnim za tu vrstu zračenja i konačno dobije veličina koja se naziva ekvivalentna doza (10).

6.2 OSJETLJIVOST TKIVA NA IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Poznato je da nisu sva tkiva podjednako osjetljiva na zračenje. Osjetljivost ovisi o brzini dijeljenja stanica, pa tako tkiva građena od stanica koje se vrlo brzo dijele su i osjetljivija na zračenje (11). Takve stanice su nediferencirane stanice, one izgrađuju krvotvorno tkivo, spolne žlijezde te stanice kože i sluznice (2). U situacijama kao što je nuklearna medicina gdje se apliciranjem radiofarmaka aplicira i doza na cijelo tijelo mora se uzeti u obzir i ovaj čimbenik. Kako bi se uvažili različiti rizici za različite organe računa se ukupni rizik odnosno efektivna doza, a tako da se ekvivalentna doza množi težinskim koeficijentom za ozračena tkiva (10).

Table 6.3. Risk factors and tissue weighting factors (w_T) for different organs in the body for the whole population

| Tissue or organ | Probability of fatal cancer 10^{-2} Sv^{-1} | Tissue weighting factor w_T |
|------------------------|---|-------------------------------|
| Bladder | 0.30 | 0.05 |
| Bone marrow | 0.50 | 0.12 |
| Bone surface | 0.05 | 0.01 |
| Breast | 0.20 | 0.05 |
| Colon | 0.85 | 0.12 |
| Liver | 0.15 | 0.05 |
| Lung | 0.85 | 0.12 |
| Esophagus | 0.30 | 0.05 |
| Ovary | 0.10 | ^a |
| Skin | 0.02 | 0.01 |
| Stomach | 1.10 | 0.12 |
| Thyroid | 0.08 | 0.05 |
| Remainder ^b | 0.50 | 0.05 |
| Total | 5.00 | 0.80 |

Slika 3 Tablica rizika i težinskih koeficijenata za pojedine organe

Izvor:

https://neuron.mefst.hr/docs/katedre/nuklearna_medicina/english/Sharp%20PF.%20Practical%20Nuclear%20Medicine.pdf

6.3 BIOLOŠKI EFEKTI ZRAČENJA

Ozračivanje organizma ionizacijskim zračenjem može izazvati oštećenja u organizmu. Razlikujemo unutarnje i vanjsko ozračenje. Apsorpcija ionizirajućeg zračenja u organizmu izaziva eksitaciju molekula. Oslobođena energija može dovesti do stvaranja slobodnih radikala koji mogu napraviti ireverzibilna oštećenja na molekulama bitnim za funkcioniranje stanice te izazvati njezinu smrt. U nuklearnoj medicini vrlo je mala vjerojatnost nastanka ovakvih oštećenja putem slobodnih radikala zbog niskih doza, a s druge strane i zbog velikog broja stanica u organizmu (1).

Mutacije su promjene na genskom ili kromosomskom nivou. Mogu se javljati u germinativnim ili somatskim stanicama. Kod ozračenih spolnih stanica nastale mutacije mogu se očitovati na potomcima ozračenih (2).

Oštećenja DNA molekule mogu nastati izravnom interakcijom ili putem slobodnih radikala. Zbog građe stanice, koju čini 80% vode, tijekom izlaganja zračenju radiolizom nastaju ioni i slobodni radikali. Ukoliko dospiju do DNA reagiraju s njom i uzrokuju promjene. Ovakav slučaj nije čest jer tijekom difuzije radikali reagiraju i s drugim molekulama. Vanjsko ozračenje je zapravo prolazak ionizirajućeg zračenja kroz organizam pri čemu se gubi energija zračenja i taj gubitak energije u blizini DNA uzrokuje oštećenje na jednom lancu, odnosno jednolančani lom. Isti takav gubitak energije ili više istodobnih događaja može izazvati i dvolančani lom, odnosno oštećenje na oba lanca (2).



Slika 4. Dvolančano oštećenje DNA

Izvor: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/backgrounders/radiation-effects-on-cells-dna>

Pri dozama koje se susreću u nuklearnoj medicini (uglavnom <10 mGy) svaki učinak skraćivanja života bit će minimalan. Ionizirajuće zračenje također može uzrokovati dugoročna oštećenja na određenim dijelovima tijela. Jedno od njih je nastanak katarakte koja je posljedica izravnog oštećenja stanica leće. Vremenski interval za pojavu zamućenja vrlo je promjenjiv i može biti od 6 mjeseci do 30 godina (11). Pojava katarakte je primjer determinističkog učinka zračenja. Takvi učinci dobro definiraju prag doze iznad kojega se pojavljuju učinci zračenja. Također, većina izvora koji se koriste u nuklearnoj medicini mogu isporučiti visoke doze na prste i izazvati oštećenja prstiju i ruku. Međutim, glavni problemi radijacijskog opterećenja u nuklearnoj medicini su pojavnost karcinogeneze i mutageneze. Pretpostavlja se da su to stohastički učinci zračenja. Kod njih ne postoji "sigurna" razina zračenja, prema tome sve doze i za osoblje i za pacijente moraju biti onoliko niske koliko je razumno moguće. Rizik od zračenja mora se procijeniti u odnosu na korist i kvalitetu informacija koje će se dobiti primjenom ionizirajućeg zračenja (2).

Dokazi da zračenje uzrokuje karcinome kod ljudi dolaze iz mnogih izvora. Na primjer, izloženost na radnom mjestu dovodi do povećane učestalosti raka pluća kod rudara uranija, a postoje i dobro dokumentirani dokazi o "slikarima radijskih brojčanika". Riječ je o uglavnom mladim ženama koje su oko 1920-ih bojale brojčanike na satovima svjetlećom bojom. Običaj im je bio kist oblikovati usnama pri čemu su unosile znatne količine ^{226}Ra koji je putem krvotoka putovao do skeleta. Godinama kasnije prijavljeni su brojni tumori, posebno, inače relativno rijetki osteogeni sarkomi (11).

7. ZAŠTITA OD ZRAČENJA

7.1 CILJ

Primarni cilj zaštite od zračenja je spriječiti pojavu determinističkih učinaka i ograničiti pojavu stohastičkih učinaka ionizirajućeg zračenja na što nižu moguću mjeru (10).

U nuklearnoj medicini cilj zaštite od zračenja je osigurati postizanje očekivanog medicinskog ishoda za pacijenta i optimizaciju postupka uz ograničenje rizika od zračenja za pacijente, medicinsko osoblje i javnost (12).

7.2 NAČELA ZAŠTITE OD ZRAČENJA

Uz pretpostavku da ne postoji prag štetnosti doze Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (eng. *International Commission on Radiological Protection*, ICRP) u svojim publikacijama postavila je tri osnovna načela na kojima se treba zasnivati sustav radiološke zaštite, a to su načelo opravdanosti, optimizacije te ograničenja (11). Opravdanost govori da svaka izloženost zračenju uključuje balansiranje između dobiti od postupka i štete od zračenja, a ključno je procijeniti prirodu i radiološki rizik za izložene radnike prilikom izvođenja postupaka. Načelo optimizacije ili ALARA načelo (As Low as Reasonably Achievable), u praksi je najvažnije, a govori kako doza koju pojedinac primi iz bilo kojeg izvora mora biti toliko niska koliko je razumno moguće, a u skladu s gospodarskim i socijalnim čimbenicima koji se moraju uzeti u obzir. Načelo ograničenja odnosi se na ozračenje pojedinca, a govori da ekvivalentna doza za pojedince ne bi trebala prelaziti zakonom utvrđene granice (11).

7.3 GRANICA DOZE

Kako bi se ostvario cilj zaštite od zračenja određene su granice doze za profesionalno osoblje. Ograničena je efektivna doza koja iznosi 100 mSv u 5 uzastopnih godina, uz to da ni u jednoj godini doza ne prijeđe 50 mSv. Ograničavanje efektivne doze predstavlja postavljanje razine iznad koje je visok rizik od nastanka stohastičkih učinaka izloženosti zračenju, prema tome, određivanje efektivne doze za leću, kožu, ekstremitete ne osigurava pojavnost determinističkih učinaka. Za navedena tkiva stoga se postavlja ograničenje ekvivalente doze. Za leću, prema ICRP publikaciji, ekvivalentna godišnja doza određena je na 150 mSv, dok prema novijem vodiču koji je objavila IAEA ekvivalentna dozu za leće iznosi 20 mSv u godini dana, odnosno 100 mSv u 5 uzastopnih godina te 500 mSv za kožu, stopala, šake i podlaktice (13). Propisane godišnje doze služe samo kako bi se provelo načelo optimizacije, ali ne znači da će ispod tih granica vrijednosti biti prihvatljive. Točna granica doze za pacijente, odnosno u medicinske svrhe, se ne može ograničiti, ali je potrebno smanjiti razinu zračenja koliko je razumski moguće uz zadržavanje kvalitete usluge te uvažavajući socioekonomske čimbenike (10). Vodičem Međunarodne agencije za atomsku energiju, ali

i Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja određene su granice doza za studente od 16 do 18 godina, koji su u sklopu svog studija dužni rukovati radioaktivnim izvorima. Tako je određena efektivna doza koja u godinu dana ne smije prijeći 6 mSv te ekvivalentna doza, koja za leću u godinu dana ne smije prijeći 15 mSv, a za ekstremitete i kožu 150 mSv (13).

7.4 PRAĆENJE DOZE NA RADNOM MJESTU

Kako bi se utvrdilo ozračenje profesionalnog osoblja na radnom mjestu jednom godišnje provodi se mjerenje razine zračenja. Mjeri se razina zračenja na svim radnim površinama, vratima, zidovima, uređajima. Radna mjesta se prema takvoj procjeni dijele na područje nadgledanja i područje posebnog nadgledanja. Područjem nadgledanja smatra se područje u kojemu postoji mogućnost ozračivanja radnika dozom iznad 1 mSv, a nižom od 6 mSv u jednoj godini, dok područje gdje postoji mogućnost ozračivanja radnika dozom unutar zakonom propisane doze, ali iznad 6 mSv nazivamo područje posebnog nadgledanja (10).

Prema tome, područje nadgledanja su sobe za preglede, hodnici i druge prostorije u kojima se nalaze pacijenti kojima još nije apliciran radioaktivni pripravak. Također, područje oko upravljačke ploče hibridne opreme za snimanje (npr. PET/CT i SPECT/CT) treba klasificirati kao područje nadgledanja, iako razine zračenja mogu biti vrlo niske zbog dizajna zaštite. Klasifikacija ovog područja kao područja pod nadzorom osigurat će ograničeni pristup čime će se izbjeći ometanje rada, što bi moglo dovesti do slučajnog ili nenamjernog medicinskog izlaganja pacijenata ili osobe koja je ušla u prostor. Kako bi se izbjegle nesigurnosti oko opsega kontroliranih područja i područja pod nadzorom, granice takvih područja trebaju, kada je to moguće, biti zidovi i vrata ili druge fizičke barijere, označene odgovarajućim znakovima upozorenja (14).



Slika 5 Znakovi upozorenja i zabrane na odjelu nuklearne medicine

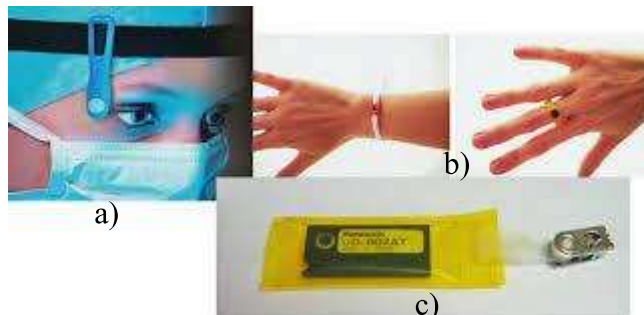
Izvor: <https://www.zirs.hr/zastita-na-radu>

S druge strane su područja posebnog nadgledanja, a pod njih podrazumijevamo prostorije u kojima se pripremaju radiofarmaci („vrući“ laboratoriji), potom prostori u kojima se radiofarmaci apliciraju pacijentima. Prostor koji služi kao skladište i za raspadanje radiofarmaka također se smatra prostorom posebnog nadgledanja i tako treba biti označen, jednako kao i prostorije za snimanje, posebno one u kojima se nalazi oprema za doziranje radiofarmaka, ali i čekaonice namijenjene pacijentima kojima su ubrizgani radiofarmaci. Sobe u kojima se nalaze pacijenti koji su podvrgnuti terapiji radionuklidima također su prostori posebnog nadgledanja kao i prostorije u kojima se nalaze hibridni uređaji koji imaju rendgensku komponentu (PET/CT i SPECT/CT) te tako trebaju biti i označeni, a svjetlo upozorenja na ulazu u prostoriju trebalo bi upozoravati kada je uređaj uključen kako bi se spriječio nenamjeren ulazak. Samo u iznimnim situacijama, posjetitelju ili pratnji može dopustiti ulazak u takav prostor, ali bi on ili ona cijelo vrijeme trebao biti u pratnji člana osoblja koji poznaje mjere zaštite i sigurnosti za to područje. Posebnu pažnju, u svim slučajevima, treba posvetiti ženama koje jesu ili bi mogle biti trudne (14).

7.5 MJERNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE DOZE

Bez obzira u kojemu se području nadzora nalazili radnici moraju biti podvrgnuti osobnoj dozimetriji koja se najčešće vrši termoluminiscentnim dozimetrima (TLD) ili još optički stimuliranim luminiscentnim dozimetrima (OSL). Njima se mjeri ukupna doza koju primi cijelo tijelo tijekom perioda nošenja, a tako da se dozimetar nosi na lijevoj strani prsa ispod zaštitne pregače (10). Nakon mjesec dana nošeni dozimetar se šalje u jedinicu za očitavanje i uzima novi. Očitana doza se bilježi te se izvješće šalje korisniku. Od ukupne zabilježene

doze oduzima se vrijednost prirodnog zračenja, tako da neto vrijednost predstavlja samo doprinos od profesionalnog ozračenja (15).



Slika 6. Osobna dozimetrija: termoluminiscentni dozimetri a) za leću, b) ruke, c) cijelo tijelo

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

U nuklearnoj medicini često se nose i kontrolni osobni dozimetri. Kontrolni dozimetri ili aktivni elektronički osobni dozimetri (AEPD) imaju mogućnost bilježenja trenutačne vrijednosti primljene doze te brzine doze kojoj je izložen pojedinac. Ukoliko je pojedinac izložen visokoj brzini doze dozimetar ima mogućnost alarmiranja (15).



Slika 7. AEPD

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

Monitoring radnog mjesta obuhvaća mjerenja u radnoj okolini i interpretaciju rezultata. Monitoriranje ili praćenje radnog mjesta služi u nekoliko svrha uključujući rutinsko praćenje, posebno praćenje za posebne prilike te praćenje radi potvrde pretpostavki o uvjetima izloženosti. Praćenje radnog mjesta može se koristiti za provjeru profesionalnih doza osoblja čiji rad uključuje izloženost predvidljivim niskim razinama zračenja, a osobito je važno za članove osoblja koji nisu pod osobnom dozimetrijom. U prostorima nuklearne medicine, nadzor na radnom mjestu trebao bi sustavno nadzirati vanjsko zračenje i površinsku kontaminaciju. Svaki odjel nuklearne medicine treba biti opremljen ispravno kalibriranim instrumentima za praćenje radnog mjesta, uključujući mjerače i prijenosne monitore kontaminacije (14).

Kontaminaciju je potrebno pratiti na svim radnim površinama, alatima, opremi i uređajima kao i na svim predmetima uklonjenim iz područja moguće kontaminacije. Mjerni uređaji bi trebali biti dostupni u blizini izlaza kako bi se prilikom napuštanja kontroliranog prostora mogla mjeriti eventualna kontaminacija zaštitne i osobne odjeće i obuće. Osim zaštitne i osobne odjeće mjerenje je potrebno vršiti i na odjeći, posteljini i posuđu pacijenata koji su podvrgnuti terapiji izotopima. Također mjerenja se vrše i na radnim stanicama, ventilacijskim sustavima i odvodima kada im je potrebno pristupiti u svrhu održavanja (14).

Najčešći mjerni uređaj je Geiger-Mullerov brojač koji služi za detekciju ionizirajućeg zračenja u prostoru i na površinama. Brojač se sastoji od cijevi ispunjene inertnim plinom koji postaje vodič električne energije kada u njega udari čestica visoke energije. Prilikom tog procesa privremeno se zatvara prekidač i generira električni puls koji se registrira na mjeracu, bilo akustički kao klik čiji intenzitet raste s povećanjem ionizirajućeg zračenja ili bilo vizualno kao kretanje kazaljke (16). Tako Geiger-Mullerov brojač zapravo broji impulse, a ne mjeri dozu zračenja. Za mjerenje apsorbirane doze u zraku koriste se ionizacijske komore. Slične su građe kao i brojači, ali drugačijeg električnog poja i načina baždarenja (2).



Slika 8. Monitor za mjerenje površinske kontaminacije

Izvor:

https://www.iaea.org/sites/default/files/22/04/iaea_webinar_radiation_protection_nm_sigrid_leide-svegborn_for_publication.pdf

8. NAČINI ZAŠTITE OD ZRAČENJA

Postoje tri glavna načina zaštite od zračenja: vrijeme, udaljenost i štit. Doza je proporcionalna vremenu izloženosti ionizirajućem zračenju, stoga da bi se smanjila doza potrebno je skratiti vrijeme izlaganja zračenju. Također, doza opada sa kvadratom udaljenosti. Osim toga, korištenjem štitova između npr. osobe i izvora moguće je smanjiti dozu na izloženu osobu do minimuma. Efikasnost štita ovisi o materijalu od kojega je građen. Pojedini materijali bolje zaustavljaju prodorne zrake ionizirajućeg zračenja od drugi materijala. Ta sposobnost materijala naziva se poludebljina¹ (14).

8.1 ZAŠTITA PACIJENTA

Svaka pretraga na koju se upućuje pacijent mora biti klinički opravdana kao i razmotrene sve mogućnosti za dobivanje rezultata koje ne uključuju korištenje ionizirajućeg zračenja. Prije početka bilo kojeg postupka u nuklearnoj medicini, kao i u bilo kojoj grani medicine, pacijenta je potrebno identificirati, slijedeći uobičajenu bolničku rutinu. Poželjno je koristiti najmanje dva oblika provjere identiteta kao što su npr. pitanja vezana za ime, prezime, datum

¹ Debljina materijala koja ulazno zračenje smanji na polovicu.

rođenja, adresu. Također, s pacijentom je potrebno obaviti razgovor kako bi se prikupile važne informacije potrebne za sigurno izvođenje pretrage ili liječenje. Razgovor treba sadržavati pitanja o dobi, tjelesnoj masi, visini, trenutnim lijekovima koji se koriste, trudnoći, dojenju, inkontinenciji, mučnini, vrsti posla, korištenju javnog prijevoza i životnim uvjetima. Informacije koje pacijent pruži odredit će kako se terapija treba primijeniti i koja su ograničenja u svakodnevnom životu pacijenta potrebna kako bi se smanjila izloženost drugih osoba. Poželjna su usmena i pismena objašnjenja postupka koja bi pacijentu pomogla u razumijevanju prirode postupka i eventualnih rizika za bolesnika ili druge osobe (17).

Pretrage je potrebno obavljati na osjetljivoj i dobro održavanoj opremi uz korištenje kvalitetnih radiofarmaka. Rezultati pretraga ili tijek terapije potrebno je dokumentirati i čuvati kako se pretrage ne bi morale ponavljati u slučaju gubitka rezultata. Pretrage se trebaju ponavljati samo iz kliničkih razloga. Sva dodatna izlaganja zračenju nose dodatni rizik. Također, važno je dati dovoljnu količinu aktivnosti, ne premalu ni preveliku. Kod dinamičkih snimanja i tomografije potrebne su veće količine aktivnosti, ako je količina premala može dati neadekvatne i nejasne rezultate. Cilj pretrage bi bio odgovoriti na kliničko pitanje najisplativijim putem uz što veću poštedu pacijenta od doze zračenja. Zato sposobno i adekvatno educirano osoblje nuklearnomedicinskog odjela uz dobru pripremu pacijenta vodi do uspješno postignutog cilja. Pacijenta je unaprijed potrebno uputiti na eventualnu dijetu, prestanak korištenja nekih lijekova. U nekim slučajevima kada se daju spojevi radioaktivnog joda, pacijentima je potrebno prethodno dati i jodid za blokiranje štitnjače čime se smanjuje ozračenje štitnjače. Isto tako poticanjem na hidraciju potiče se izlučivanje radiofarmaka iz sustava i smanjuje doza (11). Pridržavanjem datih dijagnostičkih referentnih razina za radiodijagnostičke postupke u nuklearnoj medicini za tipičnog odraslog pacijenta koje su sadržane u Prilogu II. Pravilnika o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja (slika 9.) moguće je spriječiti prekomjerno ozračenje pacijenata.

PRILOG II.

DIJAGNOSTIČKE REFERENTNE RAZINE ZA RADIODIJAGNOSTIČKE POSTUPKE U NUKLEARNOJ MEDICINI ZA TIPIČNOG ODRASLOG PACIJENTA*

* pacijent prosječne mase 70 kg

| Postupak | Radionuklid | Kemijski spoj ^a | Najveća uobičajena aktivnost po jednom postupku (MBq) ^b |
|---|-------------------|---|--|
| Kosti | | | |
| Ispitivanje kostiju | ^{99m} Tc | Fosfonat i fosfatni spojevi | 600 |
| Ispitivanje kostiju kompjutoriziranom tomografijom emisijom jednog fotona (SPECT) | ^{99m} Tc | Fosfonat i fosfatni spojevi | 800 |
| | ^{99m} Tc | Označeni koloidi | 740 |
| Mozak | | | |
| Ispitivanje mozga (statičko) | ^{99m} Tc | TcO ₄ | 740 |
| | ^{99m} Tc | Dietilentriaminopentacetatna kiselina (DTPA), glukonat i glukohexonol | 500 |
| Ispitivanje mozga (SPECT) | ^{99m} Tc | TcO ₄ | 800 |
| | ^{99m} Tc | DTPA, glukonat i glukohexonol | 800 |
| | ^{99m} Tc | Bicisat (Eksametazin) | 800 (500) |
| Moždani krvotok | ¹¹³ Xe | Izotonična otopina natrijklorida | 400 |
| | ^{99m} Tc | Heksametilpropilen amin oksim HM-PAO | 800 |
| Scintigrafija dopaminskog sustava | ¹²³ I | Ioflupan I-123 | 200 |
| Cisternografija | ¹¹¹ In | DTPA | 40 |
| Lakrimal | ^{99m} Tc | TcO ₄ | 4 |
| Lakrimalni odvod | ^{99m} Tc | Obilježeni koloid | 4 |
| Štitnjača | | | |
| Ispitivanje štitnjače | ^{99m} Tc | TcO ₄ | 400 |
| | ¹²³ I | I – | 25 |
| Metastaze štitnjače (poslije ablacije) | ¹³¹ I | I – | 400 |
| Ispitivanje doštitne žlijezde | ^{99m} Tc | MIBI (tetrofosfomin) | 600 |

Slika 9. Dio iz Priloga III. Pravilnika o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja

Izvor: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2018_05_42_813.html

8.1.1 Trudnice (embrij, fetus)

U polju zaštite od zračenja, najosjetljivije skupine pacijenata su trudnice odnosno embrij i fetus. Upravo se najveća pažnja usmjerava na dozu koju bi fetus mogao primiti putem placente i distribucijom radiofarmaka u fetalnim tkivima, kao i vanjskim zračenjem radiofarmaka nakupljenog u organima i tkivima majke. Fizička, kemijska i biološka svojstva radiofarmaka kritični su čimbenici u mogućem prijenosu kroz placentu (18).

U prvim tjednima kada se embrij sastoji od nediferenciranih stanica izlaganje zračenju češće rezultira smrću embrija nego pojavom stohastičkih učinaka u rođenog djeteta. Prema *ICRP Publication 62 Radiological Protection in Biomedical Research* ozračivanje embrija u prva tri tjedna od začeća neće rezultirati ni determinističkim ni stohastičkim učincima iako se u tom vremenskom periodu razvijaju živčani sustav i srce. Tijekom ostatka organogeneze malformacije mogu biti uzrokovane u organu koji se za vrijeme zračenja razvija. Po karakteru ti su učinci deterministički i procijenjeni (pokusima na životinjama) na dozu oko 0,1 Gy. Posebno je potrebno istaknuti mentalnu retardaciju i karcinome koji se mogu razviti kasnije u djetinjstvu ili u odrasloj dobi kao specifične učinke zračenja na embrij i fetus u razvoju (19). Postoje dokazi o povećanom riziku nastanka leukemije kod ozračenog fetusa te prema radu Otakea i suradnika povećan je rizik od pojavnosti mentalne retardacije što je dokazano nakon eksplozije atomske bombe u Japanu, a posebno je istaknuto kod izloženih trudnica od 8. do 16. tjedna od začeća (11).

Tablica 1. Efekti ozračenja embrija i fetusa u razvoju

| <i>Vrijeme nakon začeća</i> | <i>Učinak</i> | <i>Učestalost kod živorođenih</i> |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| <i>Prva 3 tjedna</i> | Ni stohastički ni deterministički učinak kod živorođenih | - |
| <i>Od 3. do 8. tjedna</i> | Moguće malformacije | 0.06 (1 od 17) |
| <i>Od 8. do 25. tjedna</i> | Mogućnost pojave mentalne retardacije | 5×10^{-3} (1 od 200) |
| <i>Od 4. tjedna do kraja trudnoće</i> | Karcinom u dječjoj ili odrasloj dobi | 1×10^{-3} (1 od 1000) |

Izvor: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_22_3

Nacionalni Odbor za zaštitu u radiologiji (eng. *National Radiological Protection Board*, NRPB) u Velikoj Britaniji objavio je savjete za izlaganje ionizirajućem zračenju tijekom trudnoće. Cilj NRPB- a je minimizirati rizik od nenamjernog izlaganja prije trudnoće i kako

bi se spriječilo nepotrebno izlaganje fetusa kada su tijekom trudnoće indicirani dijagnostički postupci (20).

U Sjedinjenim Američkim Državama procjenjuje se da je godišnje izlaganje pozadinskom zračenju za cijelo tijelo 3,1 mSv. Agencija za nuklearnu regulativu Sjedinjenih Američkih Država (eng. *United States Nuclear Regulatory Commussuin*, USNRC) tijekom trudnoće preporučuje ukupnu dozu za fetus manju od 5,0 mSv. Doza zračenja fetusa ispod 50 mGy smatra se sigurnom i ne uzrokuje nikakvu štetu. Prema Centru za kontrolu bolesti (CDC), doza zračenja između 50 mGy i 100 mGy smatra se sigurnom za fetus. Doze iznad 100 mGy, posebno one iznad 150 mGy, smatraju se minimalnom količinom doze koje će dovesti do neželjenih posljedica (21).

Prije početka nuklearno medicinskog postupka potrebno je utvrditi postoji li mogućnost trudnoće kod pacijentice, upozoriti ju na sve rizike ukoliko se ne dobije točna informacija. Kada se radi o sumnji na trudnoću potrebno je osigurati prije samog postupka utvrđivanje trudnoće ili kada je poznata trudnoća uz uputnu dijagnozu liječnik koji zahtjeva postupak dužan je naznačiti i taj podatak. U takvim slučajevima, odgovorni liječnik na odjelu nuklearne medicine mora odlučiti postoji li veći rizik za fetus od postupka ili za pacijenticu bez provođenja dijagnostike i/ili liječenja (18).

Trudnoća ne mora biti potpuna kontradikcija za postupke nuklearne medicine, posebno one dijagnostičke koji uključuju kratkotrajne radionuklide, pod uvjetom da postoje snažna klinička opravdanja i da su istražene alternative koje uključuju neionizirajuće zračenje. Kod izrazito mirnih pacijentica, primjenom manjih aktivnosti radiofarmaka koji ne prolaze placentu kao i ^{99m}Tc , ali i duljeg vremena snimanja moguće je smanjiti apsorbiranu dozu za fetus kao i pravilnim redoslijedom pretraga (14). Primjer je ventilacijsko perfuzijska studija (VQ scan) za otkrivanja plućne embolije. Prvi modalitet snimanja trebao bi biti ultrazvuk donjih ekstremiteta za traženje duboke venske tromboze. Ukoliko indikacija i dalje postoji moguće je prvo učiniti perfuzijsku scintigrafiju pluća. Kod urednog nalaza, ventilacija nije ni potrebna. U ventilacijskoj fazi moguće je smanjiti dozu korištenjem plina ^{133}Xe , dok ^{99m}Tc -DTPA aerosol će se izlučivati putem bubrega do mokraćnog mjehura što će pridonijeti fetalnoj dozi. Dobra hidratacija majke i često mokrenje mogu smanjiti fetalnu dozu nakon primjene radiofarmaka (22). Prema preporuci Pahade JK i suradnika nakon ultrazvuka, ako i

dalje postoji klinička sumnja na plućnu emboliju, bolje je učiniti CT plućni angiogram (CTPA) nego ventilacijsko-perfuzijsku (VQ) studiju. Fetalna doza VQ puno je viša od CTPA, iako je majčina doza puno niža. Zbog niže fetalne doze, CTPA je preferirani test izbora (23).

Zbog slobodnog prolaska radioaktivnih jodida kroz placentu i odlaska u fetalno tkivo (npr. štitnjaču) trudnoća se smatra kao apsolutna kontraindikacija kod liječenja Gravesove hipertireoze jodom-131, isto vrijedi i za radiosinoviortezu ² te scintigrafiju jodom-131. Neutvrđivanje trudnoće kod pacijentice prilikom dijagnostičke primjene ¹³¹I može dovesti do ozbiljnog slučajnog izlaganja fetusa (1). Specifična procjena pojedinačnih fetalnih doza obično nije potrebna nakon dijagnostičkih studija nuklearne medicine koje uključuju radiofarmak ^{99m}Tc. U slučaju radiofarmaka kao što su jod ili galij, može biti potrebno izračunati dozu za fetus i procijeniti rizik (14).

Posebno zabrinjava korištenje CT-a u PET/CT ili SPECT/CT pretragama. Rutinski dijagnostički CT pregledi zdjelične regije sa i bez ubrizgavanja kontrasta mogu dovesti do doze od 50 mSv na maternicu, za koju se pretpostavlja da je u ranoj trudnoći ekvivalentna fetalnoj dozi. Kada je PET/CT ili SPECT/CT indiciran za trudnicu, potrebno je koristiti CT protokole niske doze, a područje snimanja treba svesti na minimum. Prije korištenja fluorodeoksigluoze (FDG) ili drugih radiofarmaka kod PET snimanja trudnica ili pacijentica koje bi mogle biti trudne, treba uzeti u obzir nižu aktivnost FDG-a. Zaštita fetusa može se optimizirati primjenom manjih primijenjenih aktivnosti i duljim trajanjem snimanja (14).

8.1.2 Dojilje

Svaki pacijent podvrgnut nekom tretmanu koji uključuje apliciranje radiofarmaka može se neposredno nakon završetka tretmana naći u blizini male djece. Poseban problem su pacijentice/ dojilje. Mnogi radionuklidi koji se koriste u radiofarmacima mogu se pojaviti u majčinom mlijeku. To predstavlja potencijalnu opasnost od zračenja za novorođenče. Glavni

² Radiosinoviorteza - terapijski postupak redukcije volumena i uspostave uredne funkcije sinovijske membrane primjenom otvorenih izvora zračenja.

rizik za dijete bit će izazivanje raka, a smatra se faktorom dva do tri puta većim nego za prosječnu populaciju. Mnogi dijagnostički radiofarmaci brzo se uklanjaju iz organizma i imaju radionuklide samo s gama emisijom i kratkim poluraspadom. Radionuklidi za terapiju, s druge strane, dizajnirani su da oštete ciljno tkivo, često imaju emisije čestica (obično beta čestica) te dulje vrijeme poluraspada, kako bi se postigao cilj. Svaki terapijski radiofarmak koji se daje oralno, intravenski ili arterijski potencijalno je opasan za dijete te se mora prekinuti dojenje. Intrakavitarnе primjene suspendiranih čestica kao što je itrij-90 silikat predstavljaju malu opasnost; međutim, ipak bi bilo poželjno prestati dojiti. Konkretno, dojenje je apsolutna kontraindikacija kod terapije jodom-131. Druga kontraindikacija za dojenje nakon terapije je nužna blizina majke djetetu, što predstavlja opasnost od vanjskog zračenja (24). Također, prestanak dojenja preporuča se na minimalno 24 sata od primjene ^{99m}Tc pertehnetata (1). Pacijenticama koje doje savjetuje se prestanak dojenja prije terapije radionuklidima kako bi došlo do inaktivacije tkiva dojke i time smanjila doza dojki. Neki liječnici smatraju poželjnim prestanak dojenja dva ili tri tjedna prije terapije radioaktivnim jodom (25).

Sigrid Leide – Svegborn i suradnici proveli su istraživanje nad 53 dojilje čije mlijeko su prikupljali u različito vrijeme nakon primjene 16 različitih radiofarmaka. Na temelju postavljene granice efektivne doze od 1mSv za dojenčce, preporučuju prekidanje dojenja nakon primjene $(^{131}\text{I})\text{-NaI}$ te na 12 sati prekid za $(^{125}\text{I})\text{-jodohipurat}$, $(^{131}\text{I})\text{-jodohipurat}$, $(^{99m}\text{Tc})\text{-pertehnetat}$ i $(^{99m}\text{Tc})\text{-MAA}$. Tijekom tog 12-satnog razdoblja svo majčino mlijeko treba izdojiti najmanje tri puta i baciti (26).

Tablica 2 Slučajevi za prekid dojenja

| <i>Radiofarmak</i> | <i>Najčešća upotreba</i> | <i>Aktivnost (MBq)</i> | <i>Prekid dojenja (sati)</i> |
|---|---|----------------------------|---|
| ^{99m}Tc - <i>pertechnetat</i> | Snimanje štitnjače, Meckelova divertikula | 100-400 | 12 h |
| ^{99m}Tc - <i>MAA</i> | Prikaz perfuzije pluća | 40-150 | 12 h |
| ^{99m}Tc - <i>HMPAO WBC</i> | Prikaz infekcija | 180-400 | 12 h |
| ^{99m}Tc - <i>označen RBC</i> | Radionuklidna ventrikulografija | 800 | 12 h |
| ^{99m}Tc - <i>mebrofenin i drugi iminodiacetni derivati kiselina</i> | Prikazi funkcija hepatobilijarnog sustava | 300 | 4 h |
| ^{99m}Tc - <i>albumin nanocolloidalparticles</i> | Sentinel čvorovi Snimanje jetre | 5-120 120-200 | 4 h 4 h |
| ^{111}In - <i>octreotide</i> | Neuroendokrini tumori | 100-200 | 60 h (2.5 d) |
| ^{123}I - <i>MIBG</i> | Prikaz neuroblastoma | 400 | > 3 tjedna ili potpuni prekid (3) |
| ^{123}I - <i>NaI</i> | Prikaz i funkcija štitnjače | 20 | > 3 tjedna ili potpuni prekid |
| ^{123}I - <i>ioflupan (FP-CIT)</i> | Dopaminergična nurotransmisija (D1) kod poremećaja kretanja | 150-250 | > 3 tjedna ili potpuni prekid |

Izvor: https://www.iaea.org/sites/default/files/22/04/iaea_webinar_radiation_protection_nm_sigrid_leide-svegborn_for_publication.pdf

Osim ozračenja dojenčeta putem majčinog mlijeka rizik je od vanjskog ozračenja koje dojenče primi u blizini majke. Događa se pri pozitronskoj emisijskoj tomografiji (PET) kada

metabolički aktivno tkivo dojke u laktaciji akumulira primijenjenu radioaktivnost, tj. FDG koji je analog glukoze, nakuplja se u tkivima s povećanim metabolizmom i na taj način osim morfološke, omogućuje i metaboličku vizualizaciju i identifikaciju metabolički aktivnih lezija u tijelu. FDG se ne izlučuje u majčino mlijeko. Međutim, kontakt između majke i djeteta trebao bi biti ograničen 12 sati nakon injekcije FDG-a zbog radioaktivnosti koncentrirane unutar samog tkiva dojke. Tijekom tog vremena mlijeko se može izdajati i sigurno davati djetetu (27).

8.1.3 Pacijentice koje planiraju trudnoću

Većini se pacijentica koje su podvrgnute terapiji radioaktivnim jodom savjetuje odlaganje trudnoće najmanje 6 mjeseci nakon radiojodne terapije. ICRP preporučuje dozu za nerođeno dijete od 1 mGy samo ako je provođenje pretrage ili terapije medicinski neophodno za zdravlje majke. Postoje slučajevi u kojima se povremeno koriste ³²P, ⁸⁹Sr ili ¹³¹I meta-jodobenzilgvanidin za terapiju. Sukladno tom, kako bi se doza za fetus održala ispod 1 mGy, treba izbjegavati trudnoću barem oko 3 mjeseca (22).

Tablica 3 Vrijeme izbjegavanja trudnoće za dane bolesti i radionuklide

| <i>Radionuklidi</i> | <i>Bolest</i> | <i>Aktivnost (gornja vrijednost/ MBq)</i> | <i>Izbjegavanje trudnoće (u mjesecima)</i> |
|---------------------|------------------------|---|--|
| <i>I-131 jodid</i> | Hipertireoza | 800 | 4 (ICRP) 6 (ARSAC ³) |
| <i>I-131 jodid</i> | Karcinom štitnjače | 6000 | 4 (ICRP) 6(ARSAC) |
| <i>I-131 MIBG</i> | Neuroendokrine bolesti | 7500 | 3 |

³ Administration of Radioactive Substances Advisory Committee

| | | | |
|---------------------|---------------------------|-------|----|
| <i>P-32 fosfat</i> | Mijeloproliferatna bolest | 200 | 3 |
| <i>Sr-89 klorid</i> | Koštane metastaze | 150 | 24 |
| <i>Y-90 koloid</i> | Sinovektomija | 400 | 0 |
| <i>Y-90 koloid</i> | Maligne bolesti | 4000 | 1 |
| <i>Au koloid</i> | Maligne bolesti | 10000 | 2 |
| <i>Er-169</i> | Sinovektomija | 400 | 0 |

Izvor: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/pub1417_web.pdf

Iako nema dovoljno dokaza, odgoda planiranja potomstva preporučuje se i muškim pacijentima na određeno vrijeme nakon provođenja terapije radioaktivnim izotopima (25).

8.1.4 Djeca

Posebna skupina pacijenata su i djeca kod kojih je potreban poseban oprez zbog povećanog rizika od karcinogeneze. Znajući da apsorbirana doza ovisi između ostalog i o masi organa, djeci se ne može aplicirati aktivnost koju bi dali odrasloj osobi. To bi rezultiralo visokom efektivnom dozom. Aktivnost je potrebno prilagoditi težini ili tjelesnoj površini (11). Primijenjene previsoke doze dovode do povećane doze zračenja za pacijenta bez poboljšane dijagnostičke osjetljivosti ili točnosti dok preniske doze možda neće omogućiti odgovarajući pregled. U oba slučaja, previsoke ili preniske doze dovode do nepotrebnog izlaganja zračenju (28).

Dvije uobičajene metode koriste veličinu pacijenta prema njegovoj težini ili površini: Clarkovo pravilo i pravilo površine. Druge metode u izračunavanju doze koriste dob kao prevladavajući faktor, a to su Youngovo pravilo, Websterovo pravilo i Friedovo pravilo. Metoda doziranja koja se koristi u pojedinoj klinici uvelike ovisi o preferencijama liječnika. Prijevremeno rođena dojenčad i novorođenčad zahtijevaju posebnu pozornost, a potrebno je razmotriti koncept minimalne primijenjene doze odnosno količinu primijenjenog radiofarmaka ispod koje će studija biti neadekvatna bez obzira na veličinu pacijenta (28).

Europsko udruženje nuklearne medicine (eng. *European Association of Nuclear Medicine*, EANM) 2008. godine objavilo je prvu verziju smjernica za primijenjene aktivnosti kod djece koje uključuju karticu s dozama, koja daje preporučene primijenjene aktivnosti za različite dijagnostičke postupke nuklearne medicine i odgovarajuće radioizotope. Cilj EANM-ove kartice s dozama je osigurati slične razine doze zračenja za sve pacijente koji su podvrgnuti određenoj vrsti nuklearnomedicinskog postupka. Stoga su za svaki radiofarmak izračunate preporučene primijenjene aktivnosti tako da pacijenti u različitim dobnim skupinama primaju slične procijenjene efektivne doze. U Sjevernoj Americi pak oformila se stručna skupina i u kampanji „*Image Gently*“ također pokrenula razvoj pedijatrijskih smjernica koje iznose 2011. godine. Tijekom kongresa EANM-a 2012. godine, sastala se radna skupina EANM-a i Društvo za nuklearnu medicinu i molekularnu sliku (eng. *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, SNMMI) kako bi proučili mogućnosti usklađivanja datih smjernica. Cilj je bio identificirati razlike između ovih smjernica i predložiti promjene u obje kako bi se postigla razina usklađenosti. U kolovozu 2016. izdano je posljednje ažuriranje EANM Pedijatrijske kartice s dozama (slika 10.) (29).

Dosage Card (Version 5.7.2016)

Multiple of Baseline Activity

| Weight kg | Class A | Class B | Class C | Weight kg | Class A | Class B | Class C |
|--------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|------------|
| 3 | 1 | 1 | 1 | 32 | 3.77 | 7.29 | 14.00 |
| 4 | 1.12 | 1.14 | 1.33 | 34 | 3.88 | 7.72 | 15.00 |
| 6 | 1.47 | 1.71 | 2.00 | 36 | 4.00 | 8.00 | 16.00 |
| 8 | 1.71 | 2.14 | 3.00 | 38 | 4.18 | 8.43 | 17.00 |
| 10 | 1.94 | 2.71 | 3.67 | 40 | 4.29 | 8.86 | 18.00 |
| 12 | 2.18 | 3.14 | 4.67 | 42 | 4.41 | 9.14 | 19.00 |
| 14 | 2.35 | 3.57 | 5.67 | 44 | 4.53 | 9.57 | 20.00 |
| 16 | 2.53 | 4.00 | 6.33 | 46 | 4.65 | 10.00 | 21.00 |
| 18 | 2.71 | 4.43 | 7.33 | 48 | 4.77 | 10.29 | 22.00 |
| 20 | 2.88 | 4.86 | 8.33 | 50 | 4.88 | 10.71 | 23.00 |
| 22 | 3.06 | 5.29 | 9.33 | 52-54 | 5.00 | 11.29 | 24.67 |
| 24 | 3.18 | 5.71 | 10.00 | 56-58 | 5.24 | 12.00 | 26.67 |
| 26 | 3.35 | 6.14 | 11.00 | 60-62 | 5.47 | 12.71 | 28.67 |
| 28 | 3.47 | 6.43 | 12.00 | 64-66 | 5.65 | 13.43 | 31.00 |
| 30 | 3.65 | 6.86 | 13.00 | 68 | 5.77 | 14.00 | 32.33 |

$$A[\text{MBq}]_{\text{Administered}} = \text{Baseline Activity} \times \text{Multiple}$$

- For a calculation of the administered activity, the baseline activity value has to be multiplied by the multiples given above for the recommended radiopharmaceutical class (see reverse).
- If the resulting activity is smaller than the minimum recommended activity, the minimum activity should be administered.
- The national diagnostic reference levels should not be exceeded!

Examples:

- ^{18}F FOP-PET Brain, 50 kg: activity to be administered [MBq] = 14.0×10.71 [MBq] = 150 MBq
- ^{123}I mIBG, 3 kg: activity to be administered [MBq] = 28.0×1 [MBq] = 28 MBq < 37 MBq (Minimum Recommended Activity) → activity to be administered: 37 MBq

Recommended Amounts in MBq

| Radiopharmaceutical | Class | Baseline Activity (for calculation purposes only) MBq | Minimum Recommended Activity ¹ MBq |
|---|-------|---|---|
| ^{123}I (Thyroid) | C | 0.6 | 3 |
| ^{123}I Amphetamine (Brain) | B | 13.0 | 18 |
| ^{123}I HIPURAN (Abnormal renal function) | B | 5.3 | 10 |
| ^{123}I HIPURAN (Normal renal function) | A | 12.8 | 10 |
| ^{123}I mIBG | B | 28.0 | 37 |
| ^{131}I mIBG | B | 5.6 | 35 |
| ^{18}F FDG-PET torso | B | 25.9 | 26 |
| ^{18}F FDG-PET brain | B | 14.0 | 14 |
| ^{18}F Sodium fluoride | B | 10.5 | 14 |
| ^{67}Ga Citrate | B | 5.6 | 10 |
| ^{67}Ga -labelled peptides | B | 12.8 | 14 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ALBUMIN (Cardiac) | B | 56.0 | 80 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ COLLOID (Gastric Reflux) | B | 2.8 | 10 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ COLLOID (Liver/Spleen) | B | 5.6 | 15 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ COLLOID (Marrow) | B | 21.0 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ DIMSA | B | 6.8 | 18.5 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ DTPA (Abnormal renal function) | B | 14.0 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ DTPA (Normal renal function) | A | 34.0 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ECD | B | 51.8 | 100 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ HMPAO (Brain) | B | 51.8 | 100 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ HMPAO (WBC) | B | 35.0 | 40 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ IDA (Biliary) | B | 10.5 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAA / Microspheres | B | 5.6 | 10 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAG3 | A | 11.9 | 15 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MDP | B | 35.0 | 40 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Perchnetate (Cystography) | B | 1.4 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Perchnetate (Ectopic Gastric Mucosa) | B | 10.5 | 20 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Perchnetate (Cardiac First Pass) | B | 35.0 | 80 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Perchnetate (Thyroid) | B | 5.6 | 10 |

Slika 10. Kartica doza

Izvor: <https://www.eanm.org/initiatives/dosage-card/>

Kartica sa dozama temelji se na publikaciji Jacobsa F. i suradnika, a sažima stajališta Pedijatrijskog i Dozimetrijskog odbora EANM-a. Dostupna je i u obliku aplikacije za pametne telefone. Europske i sjevernoameričke smjernice razlikuju se zbog različitih modela korištenih za njihov razvoj, a za neke radiofarmake postoje značajna odstupanja između dviju smjernica u referentnim aktivnostima za odrasle, koje se koriste za izračun aktivnosti djece (29).

Pri određivanju odgovarajuće primijenjene aktivnosti za djecu i adolescente također treba uzeti u obzir opremu za snimanje koja se koristi kao i protokol snimanja. U slučaju planarnog snimanja ili SPECT-a, izbor detektora može utjecati na kvalitetu slike kao i na osjetljivost, a time i na količinu radioaktivnosti koju treba primijeniti (30).

8.2 ZAŠTITA STANOVNIŠTVA

Obično ne postoje ograničenja u pogledu izlaganja javnosti za otpuštanje pacijenata koji su bili podvrgnuti dijagnostičkim postupcima nuklearne medicine. Pacijente treba savjetovati o mjerama za povećanje eliminacije zaostale radioaktivnosti, kao što je uzimanje puno tekućine i često pražnjenje mokraćnog mjehura, te izbjegavanje dugotrajnog kontakta s osjetljivim osobama iz društva (mala djeca i trudnice) (14).

Pacijenti liječeni otvorenim izvorima zračenja, kao npr. radioaktivnim jodom mogu biti značajan izvor zračenja za okolinu, posebno za trudnice i djecu. Doza za člana obitelji koji ostaje na udaljenosti od 0,5 metara od pacijenta dok se radioaktivnost potpuno ne raspadne (oko 10 tjedana) iznosi oko 1,3 mGy kod bolesnika s hipertireozom i 6,8 mGy kod bolesnika s rakom štitnjače. Također, ovi pacijenti moraju paziti da ne prenesu kontaminaciju radioaktivnim jodom na članove obitelji izravnim ili neizravnim putem (22).

Obitelj i prijatelji koji pomažu oko pacijenata smatraju se volonterima te postoji izravna korist i za pacijente i za one koji se za njih brinu. Njihova izloženost definirana je kao medicinska izloženost i stoga ne podliježu ograničenjima doze. Ovaj savjet odobrila je IAEA u Direktivi o osnovnim sigurnosnim standardima (eng. *Basic Safety Standards Directive*, BSS) i EU u svojoj Direktivi o medicinskoj izloženosti, ali ograničenja doze treba uspostaviti kako bi se definirala politika zaštite i za posjetitelje pacijenata i za obitelji kod kuće kada se pacijenti nuklearne medicine otpuštaju iz bolnice. Takve skupine mogu uključivati djecu (25).

Međunarodna agencija za nuklearnu energiju zahtijeva efektivnu dozu za bilo kojeg posjetitelja ili pratnju (tj. njegovatelje i obitelj) nižu od 5 mSv tijekom razdoblja liječenja pacijenta radioaktivnim pripravkom dok za djecu ta razina bi trebala biti manja od 1 mSv godišnje (17). Također, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) vođen zahtjevima IAEA-e, Pravilnikom o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja u članku 11. donosi odredbu o efektivnoj dozi za članove obitelji i ostale stanovnike ozračene od pacijenta kojem je u svrhu radioterapijskog postupka primijenjen otvoreni radioaktivni izvor nakon trenutka njegova otpuštanja sa terapije (slika 11.).

GRANICE EFEKTIVNE DOZE ZA RAZLIČITE KATEGORIJE OSOBA OZRAČENE OD PACIJENTA KOJEM JE U SVRHU
RADIOTERAPIJSKOG POSTUPKA OTVORENIM RADIOAKTIVNIM IZVORIMA PRIMIJENJEN RADIONUKLID NAKON
OTPUŠTANJA IZ PRAVNE ILI FIZIČKE OSOBE KOJA PROVODI TAJ POSTUPAK

| Osoba | Granice efektivne doze | |
|---|------------------------|------------|
| | po postupku | u 5 godina |
| Osobe (osim trudnica) koje skrbe i pomažu bolesniku (dragovoljno) | 5 mSv | – |
| Ostale osobe u domaćinstvu | 1 mSv | 5 mSv |
| Pojedini pripadnici stanovništva | 0.3 mSv | 5 mSv |

Slika 11. Prilog III Granice efektivne doze za različite kategorije osoba ozračene od pacijenta kojem je u svrhu radioterapijskog postupka otvorenim radioaktivnim izvorima primijenjen radionuklid nakon otpuštanja iz pravne ili fizičke osobe koja provodi taj postupak

Izvor: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2018_05_42_813.html

U Ujedinjenom Kraljevstvu provedena je studija mjerenja doze djece koja su bila u neposrednoj blizini otpuštenih pacijenata s hipertireozom i koja je pokazala da je 89% djece primilo dozu manju od 1 mSv. Međutim, 35% djece u dobi od tri godine ili mlađe primilo je više od 1 mSv, što ukazuje na potrebu za posebnim mjerama opreza za mlađu djecu (31). Podaci iz jedne belgijske studije pokazali su da, kada su djeca izbivala iz kuće prvih osam dana nakon terapije, srednje doze koje su primili tijekom sljedeća dva tjedna iznosile su 0,08 odnosno 0,13 mSv kod pacijenata s karcinomom štitnjače i hipertireoze (32). Sukladno tome, neki autori preporučuju, ako je moguće, kraći boravak u bolnici nakon terapije radioaktivnim jodom (umjesto ambulantne primjene). Time bi se izbjegao nenamjeran, ali teško isključiv kontakt s malom djecom u kući (25).

Osim obitelji, nakon otpuštanja pacijenta koji je primio radiofarmak, postoji mogućnost ozračenja i drugih osoba, vanjsko ozračenje npr. bliskim kontaktom u javnom prijevozu, te unutarnja kontaminacija osoba kao rezultat izlučenog ili izdahnutog radionuklida. Postavljanjem pravila i preporuka moguće je osigurati da izloženost bilo kojeg člana javnosti, nakon puštanja pacijenta, bude manja od javne granice doze i niža od bilo kojeg primjenjivog ograničenja doze (14). Kako bi se to postiglo potrebno je dati pisane upute o mjerama kojih se mora pridržavati kako bi se smanjio rizik od vanjskog ozračenja ili radioaktivne kontaminacije prostora i izloženosti drugih osoba. Kako nalaže članak 11. Pravilnika pacijent kojem su u svrhu radioterapijskog postupka primijenjen otvoreni radioaktivni izvori smije

napustiti bolesnički odjel samo uz pisano odobrenje specijaliste nuklearne medicine, koje se daje ovisno o preostaloj radioaktivnosti u tijelu, o načinu putovanja i vremenu potrebnom za dolazak na odredište (33).

8.3 ZAŠTITA PROFESIONALNOG OSOBLJA

Profesionalno izložene osobe u nuklearnoj medicini obično su radiološki tehnolozi, liječnici nuklearne medicine, radiofarmaceuti (kemičari) i medicinski fizičari. Drugi zdravstveni djelatnici, poput medicinskih sestara i drugog pomoćnog osoblja uključenog u liječenje pacijenata koji su primili radiofarmake osobito u ustanovama nuklearne medicine koje pružaju usluge terapije, također se mogu smatrati profesionalno izloženima. Ostali djelatnici kao što su administrativno i drugo uslužno pomoćno osoblje, osoblje za čišćenje i radnici u široj zdravstvenoj ustanovi u kojoj se nuklearnomedicinska ustanova nalazi, a kojima izvori zračenja nisu nužni ili u neposrednoj vezi s njihovim radom, moraju imati istu razinu zaštite kao i građani. Za takve radnike potrebno je uspostaviti pravila, posebno u pogledu pristupa kontroliranim područjima i područjima pod nadzorom (14).

Kako bi sigurnost osoblja, ali i pacijenata uvijek bila na vrhuncu prije svega potrebno je pružiti odgovarajuću praktičnu i teoretsku edukaciju osobama koje rukuju s izvorima zračenja. Osoblje mora biti informirano o osnovnim fizičkim principima pomoću kojih se njihova doza zračenja može smanjiti (vrijeme, udaljenost i zaštita), kao i o potrebi za zadržavanjem pri rukovanju otvorenim radioaktivnim materijalima. Vrijeme provedeno u blizini radioaktivnih izvora mora se svesti na najmanju moguću mjeru. Pacijenti kojima se apliciraju radiofarmaci su također radioaktivni izvori te je svu pripremu, koja uključuje kontakt s pacijentom potrebno obaviti prije aplikacije radiofarmaka. Sve izvore potrebno je brzo vratiti u zaštićene spremnike, a sve kontaminirane predmete i radioaktivni otpad ukloniti na sigurno mjesto. Gama zračenje se pokorava zakonu obrnutog kvadrata, pa tako udvostručenje udaljenosti od točkastog izvora smanjuje brzinu doze za faktor četiri. Udaljenost između radioaktivnih izvora i operatera treba biti što veća, a za postizanje te udaljenosti mogu pomoći dugačke pincete oblikovanog vrha za lakše nošenje bočica.



Slika 12. Pinceta za nošenje bočica

Izvor: <https://nuclearsupplies.co.nz/products/high-density-lead-glass-vial-shield>

Za nošenje radioaktivnih pripravaka treba koristiti olovne spremnike i štitnike. Volumen radioaktivnosti u štrcaljki ne bi trebao premašiti 50% kapaciteta štrcaljke, a korištenjem velike štrcaljke za male volumene povećava se udaljenost izvora do prsta (11).

Koji oblik zaštite će se koristiti ovisit će o vrsti i energiji zračenja koje emitira izvor. Poludebljina olova potrebna da bi se brzina doze smanjila na pola kod gama zračenja ^{99m}Tc (141 keV) iznosi 45 mm vode ili 0,28 mm olova, a za snop γ -fotona ^{131}I (364 keV-a) potreban je sloj od 63 mm vode ili 2,3 mm olova (1). Molibden-99 emitira puno veću energiju gama zraka, stoga se radioaktivne Tc/Mo generatore treba pohraniti iza olovnih zidova. Prilikom obilježavanja radiofarmaka kao zaštita od zračenja koristi se olovno staklo, a olovne pregrade postavljaju se oko izvora zračenja (11). Za beta emitere prikladnija je zaštita koja uključuje akril jer smanjuje količinu proizvedenog zakročnog zračenja. Olovo treba biti presvučeno kako bi se osigurala površina koja se može čistiti. Prigušenje olovnim pregačama pri tipičnim gama energijama koje se koriste u nuklearnoj medicini je skromno, a još je manje za zaštitne pregače koje ne sadrže olovo. Učinkovitiji načini smanjenja doze su automatski dozatori i injektori te mobilni štitovi, pogotovo kada se vrši pregled koji zahtjeva blizinu pacijentu s apliciranim radiofarmakom (14).

Prema istraživanju Surić Mihić i suradnika koje su objavili u časopisu *Priroda* najveće efektivne doze profesionalno osoblje primi u intervencijskoj radiologiji, ali i u nuklearnoj medicini (15).



Slika 5. Prikaz najvećih i prosječnih godišnjih efektivnih doza primljenih u različitim granama medicine, istraživanju i industriji u 2012. godini.

Slika 13. Prikaz najvećih i prosječnih godišnjih doza primljenih u različitim granama medicine, istraživanju i industriji u 2012. godini.

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

Slika 13. prikazuje grafički prikaz najvećih i prosječnih godišnjih doza primljenih u različitim granama medicine, istraživanju i industriji u 2012. godini te kako nije bilo zabilježenih vrijednosti efektivne doze iznad graničnih vrijednosti⁴ za mjereno razdoblje (15).

8.3.1 Preporuke i oprema za smanjenje profesionalne izloženosti

Međunarodna agencija za atomsku energiju u svojoj publikaciji „*IAEA Safety Standards for protecting people and the environment*“ predlaže postupke koji mogu značajno smanjiti profesionalnu izloženost. Jedan od prijedloga je rad iza štitnika od olovnog stakla te korištenje zaštićenih bočica i štrcaljki, nošenje rukavica za jednokratnu upotrebu tokom pripreme i izdavanje radiofarmaka. Za vrijeme pregleda pacijenata kojima je već apliciran radiofarmak, a nemoguće je održati dovoljan razmak od pacijenta, potrebno je koristiti pomične prozirne štitnike (14).

⁴ 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, ali niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza ne smije biti veća od 50 mSv

Ovisno s kojim izvorima se rukuje potrebno je odabrati adekvatne štitove za bočice, štrcaljke i blokove za vrući laboratorij (tj. L-blokove i bočne blokove) odnosno potrebno je odabrati štitnike odgovarajućeg materijala i debljine koji odgovaraju vrsti i energiji zračenja.

Ukoliko je riječ o alfa emiteru štitnici moraju biti od materijala visokog atomskog broja zbog karakterističnih X zraka i visokoenergetskih gama komponenti. Za ^{223}Ra ne treba zaštita s visokim atomskim brojem jer gama komponenta ne doprinosi značajno dozi. Otopine koje sadrže čiste beta emitere niske energije, kao što je ^{14}C , zahtijevaju plastični štit za prigušivanje beta čestica dok otopine koje sadrže beta emitere visoke energije, kao što su ^{32}P i ^{90}Y , zahtijevaju plastični štit za prigušivanje beta čestica uz korištenje i štita od materija visokog atomskog broja za zakočno zračenje. Otopine koje sadrže radionuklide koji imaju i beta zračenje i gama zračenje, kao što su ^{169}Er , ^{177}Lu , ^{186}Re i ^{153}Sm , potrebno je olovo kao zaštita za prigušivanje visokoenergetskih gama fotona (14).

Kako bi se osoblje zaštitilo u radnim područjima gdje postoji vjerojatnost kontaminacije (laboratoriji) potrebno je koristiti zaštitnu odjeću. Zaštitna odjeća može uključivati laboratorijske kute, voodootporne rukavice (napravljene od lateksa ili drugih materijala kao što su neopren, polivinil klorid ili nitril), navlake za cipele, kape i maske za aseptičan rad. Odjeća služi i za zaštitu tijela, ali i za sprječavanje prijenosa kontaminacije na druga područja. Odjeću treba monitorirati (mjeriti dozu) i skinuti prije napuštanja određenog područja. Kada se kreće između nadziranih područja kao što je soba s kamerom i područje ubrizgavanja, rukovatelj radiofarmakom ne mora mijenjati zaštitnu odjeću osim ako se sumnja na prolijevanje. Nakon svake manipulacije poželjno je promijeniti rukavice. Zaštitnu odjeću obavezno treba skinuti prije ulaska u druga područja, kao što su sobe za osoblje. Kada se rukuje beta emiterima niže energije, rukavice trebaju biti dovoljno debele za zaštitu od vanjskog beta zračenja (14).

Druga pomagala za držanje distance od izvora su pincete kojima se nose pripravci te kontejneri za prijevoz radioaktivnih izvora i radioaktivnog otpada. Sve radnje koje uključuju hlapljive radiofarmaceutike, kao što su ^{131}I i ^{133}Xe te radioaktivne plinove ili aerosole trebale bi se izvoditi u dobro ventiliranom uređaju (digestoru) opremljenom odgovarajućim filterima i odgovarajućom ventilacijom kako bi se spriječila kontaminacija zrakom. Ispušni otvori trebaju biti smješteni dalje od ulaza zraka. Davanje aerosola pacijentima, kao što su

ventilacijske studije, treba provoditi pomoću nastavka za usta i kopče za nos ili maske za pacijenta. Postavljanje uređaja za izvlačenje blizu pacijenta moglo bi se smatrati poboljšanjem zaštite od zračenja (14).

9. RUKOVANJE S OTVORENIM IZVORIMA ZRAČENJA

Radni postupci trebaju biti formulirani tako da se minimalizira izloženost vanjskom zračenju i onečišćenju, da se spriječi izlijevanje i, u slučaju izlijevanja, smanji širenje kontaminacije (po površini i zrakom) (14). Sva pravila u Republici Hrvatskoj koja će spriječiti kontaminaciju i prekomjerno ozračenje propisana su Pravilnikom o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima objavljenim u Narodnim novinama. Poglavlje spomenutog pravilnika *XIV. Uvjeti za uporabu otvorenih radioaktivnih izvora* govori o rukovanju otvorenim izvorima zračenja i sprečavanju širenja radioaktivnih tvari s mjesta uporabe u okoliš. Potrebno je raditi u posebno označenom i prilagođenom području za rad s radionuklidima. Članak 79. govori o nužnosti obavljanja rada s otvorenim izvorima zračenja u digestorima kada se očekuje oslobađanje radioaktivnih aerosola. Kada se radi s radioaktivnim jodom potrebno je raditi u digestoru s ugrađenim apsolutnim filtrom. Radne plohe ili radni stolovi za rad s otvorenim izvorima moraju biti glatkog materijala bez površinskih oštećenja te dostupni zaštitni štitovi (olovni paravani) za zaštitu od ionizirajućeg zračenja profesionalnog osoblja koje rukuje otvorenim radioaktivnim izvorima, ali i ostalih radnika u prostoriji. Radna ploha stola, ovisno o vrsti radionuklida i najvećoj mjerenoj aktivnosti na površini stola, mora imati odgovarajuću zaštitu radnika za dijelove tijela ispod pojasa (34). Također, potrebno je održavati visoki stupanj čistoće na mjestu rada. Potrebno je uspostaviti program praćenja i čišćenja kako bi se osiguralo minimalno širenje kontaminacije. Čišćenje i dekontaminacija mogu se pojednostaviti prekrivanjem klupa i posuda za skupljanje tekućine materijalom za jednokratnu upotrebu kao što je upijajući papir s plastičnom podlogom (14).

Svi spremnici koji se koriste za radioaktivni materijal trebaju biti jasno označeni, pokazujući radionuklid, kemijski oblik i aktivnost na određeni datum i vrijeme. Treba dodati broj serije te datum i vrijeme isteka valjanosti prema potrebi. Sve takve spremnike potrebno

je adekvatno zatvoriti i zaštititi. Spremnici se ne smije rukovati izravno, ako je moguće, koristiti hvataljke ili pincete za nošenje bočica te olovne štitnike za štrcaljke zaštitne moći sukladne vrsti i aktivnosti radionuklida (14).



Slika 14. Šprica u olovnom štitu

Izvor: <https://hospitalnews.com/radiation-shielding-solutions-for-nuclear-medicine/>

Također, potrebno je voditi evidenciju o zalihama, administraciji i gospodarenju otpadom prije odlaganja. Zapečaćene bočice s radionuklidom ne otvarati na nezaštićenom mjestu. Prilikom rukovanja s otvorenim izvorima potrebno je nositi zaštitnu odjeću, zaštitne rukavice, olovnu pregaču. Nakon rada ili nakon napuštanja kontroliranog prostora, klasificiran kao takav zbog mogućnosti kontaminacije, treba, nakon skidanja zaštitne odjeće, oprati ruke i zatim nadgledati ruke, odjeću i tijelo zbog zaostale kontaminacije. Treba osigurati tekući sapun osim ako aseptička razmatranja ne zahtijevaju alternativno sredstvo za čišćenje. Neabrazivne četke za nokte treba koristiti samo ako se kontaminacija nastavi nakon jednostavnog pranja (14).

Prije samog početka rada i ulaska osoblja u prostor u kojemu se rukuje radioaktivnim materijalom, svaku posjekotinu ili ranu na koži treba prekriti vodootpornim zavojem (14).

U tim prostorima se ne smije jesti, piti, pušiti ili šminkati (1). Jedina dozvoljena hrana je ona koja je radioaktivno obilježena za studije na pacijentima, a hrana ili piće medicinskog osoblja se ne smije čuvati u hladnjaku koji se koristi za otvorene radioaktivne materijale (14).

9.1 PRIMJENA RADIOAKTIVNIH PRIPRAVAKA PACIJENTIMA

Prilikom apliciranja radiofarmaka brizgaljkom na dio tijela ispod apliciranja postavlja se podložak s upijajućim materijalom kako bi se onemogućilo radioaktivno onečišćenje ako se manja količina radioaktivnog pripravka prolije tijekom primjene. Nakon uporabe brizgaljke i igle se odlažu u posebne posude za radioaktivni otpad. (slika 15.)



Slika 15. Kontejner za odlaganje otpada

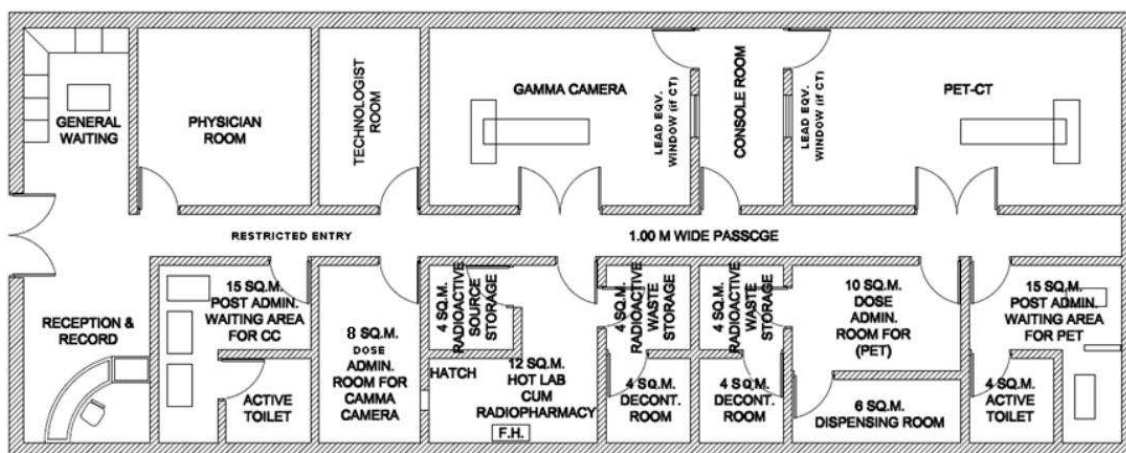
Izvor: Osobna arhiva

Osobe koje apliciraju radioaktivni pripravak također moraju nositi zaštitnu radnu odjeću i rukavice koje sprječavaju radioaktivno onečišćenje kože. Nakon apliciranja zaštitna odjeća, i rukavice se bacaju u posebne spremnike za odlaganje radioaktivnog otpada, a ruke, kao nakon svakog rukovanja sa radioaktivnim pripravkom, moraju se pažljivo oprati i provjeriti radioaktivno onečišćenje ruku (14).

Za oralnu primjenu radiofarmaka u terapiji, radioaktivni materijal treba staviti u zaštićeni spremnik kako bi se smanjila mogućnost prskanja tekućine. Pri rukovanju nezaštićenim radioaktivnim materijalima treba koristiti odgovarajuće alate s dugačkom drškom (11).

Izloženi radnici u terapiji radioaktivnim izotopima koji pristupaju pacijentima kojima je primijenjen radionuklid kako bi spriječili onečišćenje kože i odjeće moraju nositi rukavice i zaštitnu radnu odjeću, odnosno pregače, kape i navlake za obuću. Takvom pacijentu je potrebno ograničiti kretanje, a osoblje nakon apliciranja radionuklida vrši samo nužnu njegu bez dugog zadržavanja u pacijentovoj blizini i sa što veće udaljenosti (34). Osoblje koje vrši njegu takvih pacijenata mora biti upoznato sa mogućnostima kontaminacije putem izlučevina npr. putem mokraće kod primjene (najčešćih) urotropnih radioaktivnih pripravaka.

10. PROSTORNO UREĐENJE



Slika 16. Tlocrt prostornog uređenja zavoda nuklearne medicine

Izvor: <https://www.aerb.gov.in/images/PDF/NuclearMedicine/3.6.6-Typical-layout-diagram-for-Nuclear-Medicine-Facility.pdf>

Jedan tipični dijagnostički odjel nuklearne medicine zahtijeva posebno prostorno uređenje. Mora sadržavati prostor za skladištenje i pripremu radiofarmaka, prostor za apliciranje radiofarmaka pacijentima, čekaonice, područja snimanja („in vivo“), prostori za mjerenje uzoraka („in vitro“), prostore za presvlačenje i toalete, skladišta, prostor za odlaganje i dekontaminaciju radioaktivnog otpada te odvojeni odjel za pacijente koji su podvrgnuti terapiji otvorenim radionuklidima. Osim toga, postoje prostori u kojima se ne

očekuju nalazi radioaktivnih materijala, kao što je ured, sobe za osoblje, garderobe, tuševi i toaleti za osoblje (35).

Podovi u prostorima u kojima postoji velika mogućnost kontaminacije trebaju biti cjelovita neprekinuta površina bez prekida i pukotina, presvučeni nepropusnim i lakoperivim materijalom, otpornim na kemijske promjene, zakrivljenim prema zidovima, sa zabrtvljenim svim spojevima i zalijepljenim uza zid. Zidovi bi trebali biti završeni u glatku i perivu površinu (obojani perivom, neporoznom bojom). Površine prostorija u kojima se koriste ili skladište nezapečaćeni radioaktivni materijali, kao što su klupe, stolovi, sjedala i ručke na vratima i ladicama, trebaju biti glatke i neupijajuće, radi lakšeg čišćenja i dekontaminacije (14).

Prostorije u kojima se pohranjuje radioaktivna tvar i laboratoriji u kojima se proizvode radioaktivni aerosoli ili plinovi trebaju imati osim posebno zaštićenih zidova i odgovarajući sustav ventilacije koji uključuje digestore (slika 17.), komore s laminarnim⁵ protokom zraka.

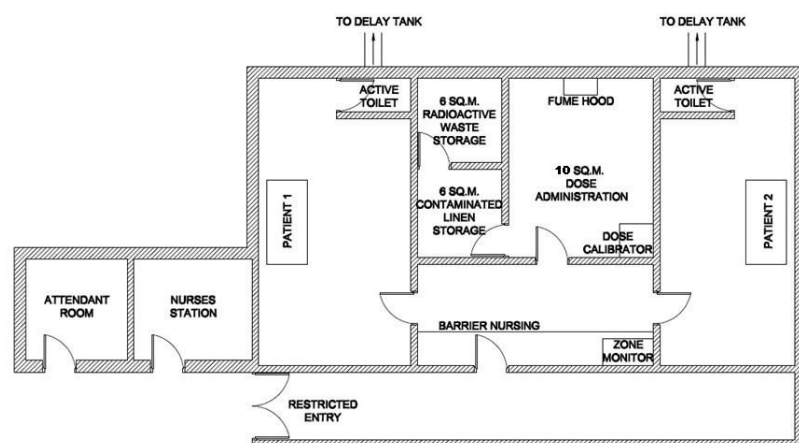


Slika 17. Digestor

Izvor: <https://www.medicalexpo.com/prod/comecer/product-104316-708612.html>

⁵ Mirno, jednolično strujanje u paralelnim slojevima

Digestor bi trebao biti izrađen od materijala koji je gladak, nepropustan, periv i otporan na kemikalije te sa negativnim protokom zraka. Ventilacijski sustav treba biti projektiran tako da je laboratorij pod negativnim tlakom u odnosu na okolna područja. Protok zraka treba ići iz područja s minimalnom vjerojatnošću kontaminacije do područja gdje je takva kontaminacija vjerojatna. Sobni zrak iz laboratorija trebao bi se odzračiti kroz sustav filtracije ili drugim mehanizmima za hvatanje radioaktivnih materijala u zraku i ne bi se trebao ponovno vraćati, niti izravno, u kombinaciji s dolaznim svježim zrakom u sustavu za miješanje, niti neizravno, kao rezultat blizine ispuha i dovoda svježeg zraka. Prostorije u kojima se vrši pranje laboratorijskog posuđa trebaju imati posebni odvod nečiste vode u septičku jamu za radioaktivni otpad kao i posebni sanitarni čvorovi i tuševi koje smiju koristiti samo pacijenti kojima je primijenjen radioaktivni pripravak (14).



Slika 18. Nacrt odjela nuklearne medicine za terapiju radionuklidima

Izvor: <https://aerb.gov.in/images/PDF/NuclearMedicine/3.6.6-Typical-layout-diagram-for-Nuclear-Medicine-Facility.pdf>

Osim toga, kako bi se zaštitilo profesionalno osoblje u prostorima u kojima su smješteni pacijenti kojima je u svrhu terapije apliciran radionuklid moraju biti zaštitni paravani zaštitnog učinka sukladnog aktivnosti i vrsti otvorenog radioaktivnog izvora (1). Toaleti i kupaonice namijenjene pacijentima koji su primili radiofarmak trebaju biti izrađeni od materijala koji se mogu lako dekontaminirati. Osoblje nuklearne medicine ne bi trebalo koristiti kupaonice za pacijente, jer je vjerojatno da će podovi, WC školjke i ručke slavine na

umivaoniku biti kontaminirani. Sobe namijenjene za pacijente koji su podvrgnuti terapiji radiofarmacima trebaju imati odvojene toalete i kupaonice. Preporuča se da svaka soba namijenjena pacijentu koji je primio radiofarmak u svrhu terapije ima vlastitu kupaonicu i toalet kako bi se izbjegao slučajan susret osoblja i radioaktivnog pacijenta. Toaleti bi trebali imati istaknuti znak koji od pacijenata traži da prilikom nužde sjede i barem dva puta isperu WC školjku (ukoliko ne postoji posebni odvod kontaminirane vode) kako bi se osiguralo odgovarajuće razrjeđivanje izlučenih radioaktivnih materijala i smanjila kontaminacija. Znak također mora upućivati i na obavezno pranje ruku nakon toaleta. Osim toga, kako bi se smanjila mogućnost kontaminacije moguće je na pod oko WC školjke postaviti upijajući papir s plastičnom podlogom. U fazi projektiranja ustanove ili odjela za nuklearnu medicinu treba uzeti u obzir protok pacijenata i posjetitelja u ustanovi tako da se njihov kontakt ili blizina svede na najmanju moguću mjeru, čime se smanjuje mogućnost vanjske izloženosti i širenja kontaminacije (14).

Laboratoriji u kojima se nalaze nezapečaćeni radioaktivni materijali koji su potrebni u pripremi radiofarmaka, trebaju imati sredstva za sprječavanje pristupa neovlaštenim osobama te odgovarajući skladišni prostor za potrebnu opremu dostupnu u svakom trenutku kako bi se smanjila mogućnost širenja kontaminacije na druga područja. Posebno zaštićeno skladište za radioaktivne izvore te zaštićena privremena skladišta za kruti i tekući radioaktivni otpad s posebnim spremnicima i mjesta određena za ovlašteno ispuštanje tekućeg radioaktivnog efluenta. Mora sadržavati ulazno područje gdje se može pohraniti zaštitna odjeća, oblačiti i skidati, opremljeno umivaonikom za pranje ruku i monitorom kontaminacije. Slavine i dozatori sapuna moraju se koristiti bez izravnog dodira rukama s jednokratnim ručnicima ili sušilom na vrući zrak. U blizini umivaonika za pranje ruku mora biti postavljeno i sredstvo za ispiranje očiju u hitnim slučajevima. Također, laboratorij treba imati posebnu zatvorenu radnu stanicu za laku dekontaminaciju i prostor za pranje kontaminiranih predmeta (stakleno suđe) te nužni tuš za dekontaminaciju osoba (14).

11. POSTUPCI U SLUČAJU KONTAMINACIJE

Kontaminacija nastaje kada se materijal koji emitira ionizirajuće zračenje taloži na osobu (koža, kosa, odjeća), ili bilo koje mjesto gdje to nije predviđeno. Tako razlikujemo vanjsku ili površinsku kontaminaciju i unutarnju kontaminaciju. Izvana kontaminirane osobe mogu postati interno kontaminirani ako radioaktivni materijal dospije u njihova tijela, uzrokujući tako opasnost od unutarnjeg zračenja. Unutarnja kontaminacija je moguća kada se radioaktivni materijal unese u organizam inhalacijom, ingestijom, apsorpcijom kroz oštećenu kožu ili pogrešnom aplikacijom radiofarmaka u organizam prilikom dijagnostike ili terapije. Svo osoblje koje radi s otvorenim izvorima treba biti obučeno tj. znati postupke za postupanje u slučaju neželjenih događaja i kontaminiranja osoba, a znanje obnavljati u odgovarajućim intervalima (36).

Osim kontaminiranja osoba moguće je kontaminirati i prostor. Onečišćenima se smatraju područja gdje se bilježe više od dvostruko veće razine od prethodno utvrđene pozadinske razine (36).

11.1 DEKONTAMINACIJA LJUDI

U slučaju detektiranja vanjske kontaminacije potrebno je spriječiti širenje radioaktivnog onečišćenja, ukloniti onečišćenu odjeću što je prije moguće pritom pazeći da se kontaminacija ne proširi. Pranjem ruku ukloniti radioaktivno onečišćenje ruku ili pranjem cijelog tijela ako je radioaktivni pripravak proliven po ostatku tijela. O neželjenom događaju potrebno je izvijestiti odgovornu osobu (34). Postupak dekontaminacije, koji osim skidanja odjeće i pranja obuhvaća i monitoriranje kontaminacije ručnim monitorom i uzimanje uzoraka, potrebno je ponavljati sve dok razina onečišćenja ne prestane padati. Posebno obratiti pozornost na ozljede koje eventualno ugrožavaju život. U slučaju postojanja takvih ozljeda, ako je moguće, istodobno s dekontaminacijom potrebno je zbrinjavati i ozljede. Potrebno je zaustaviti krvarenje, održavati prohodnost dišnih puteva, suzbijati bol i liječiti stanje šoka. Kod postojanja rana potrebno ih je isprati velikim količinama fiziološke otopine. Prema nekim autorima rane koje su kontaminirane potrebno je otvoriti i isprati vodom iz slavine, ali i poticati krvarenje do neke razumne mjere (1).

Ako je koža oštećena ili je nastala rana pod uvjetima u kojima postoji opasnost od radioaktivne kontaminacije, ozljedu treba čim prije isprati vodom. Čim se poduzmu prve mjere pomoći, osoba treba tražiti daljnje liječenje, uključujući dekontaminaciju ako je potrebno (14). Kod tricija i nekih spojeva koji sadrže jod, apsorpcija može biti i kroz neoštećenu kožu. Za adekvatnu dekontaminaciju potreban je i detaljan opis događaja kontaminacije. Potrebno je znati količinu aktivnosti i mjesto depozicije, vrstu i energiju zračenja, osjetljivost tkiva na zračenje zračenja te metabolizam pojedinih radionuklida. Najučinkovitija metoda dekontaminacije je blokiranje radionuklida na mjestu ulaska ili njegovo vezanje u krvi i izlazak prirodnom ekskrecijom (1). Progutani radioaktivni materijal potrebno je odmah ukloniti izazivanjem povraćanja ili ispiranjem neposredno nakon ingestije. Kod oralne kontaminacije indicirano je opetovano ispiranje usta fiziološkom otopinom ili razrijeđenim vodikovim peroksidom. Postupak je potrebno ponavljati dok razina kontaminacije mjerena ručnim monitorom ne prestane padati. Posebnu pozornost treba obratiti na dekontaminaciju lica kako bi se spriječio ulazak radioaktivnog materijala u oči, nos ili usta. Dekontaminacija očiju izvodi se usmjeravanjem mlaza vode ili fiziološke otopine lateralno, kako bi se izbjegla kontaminacija suznog kanala (37).

U slučajevima kontaminacije jodom koji nakuplja štitnjača moguće je blokirati organ, odnosno zasititi štitnjaču kalijevim jodidom (KI). U slučaju da je radionuklid već nakupljen u organima terapija je uglavnom neuspješna osim kod tricija koji se iz organizma može isprati velikom količinom vode (1).

Po završetku rada s otvorenim izvorima zračenja i po napuštanju područja koje je klasificirano kao kontrolirano zbog moguće kontaminacije, potrebno je oprati ruke. Ako mjerljiva kontaminacija ostane na rukama nakon jednostavnog pranja, upotrebljavaju se surfaktanti ili kelirajuća sredstva specifična za kemijski oblik kontaminirajućeg agensa. Set za dekontaminaciju i postupci za njegovu upotrebu moraju biti dostupni na radnom mjestu kao i smjernice za praćenje razine kontaminacije (14).

11.2 DEKONTAMINACIJA PROSTORA

Kod saniranja manjih kontaminacija prostora kao prolijevanje po podu, potrebno je nositi plastične rukavice, a papirnati ručnici mogu se koristiti za upijanje tekućine. Pri tome treba paziti da se kontaminacija ne proširi. Područje onečišćenja potrebno je odrediti monitoringom i označiti, te dobro oprati deterdžentom. Sve onečišćene papirnate ručnike, tupfere i četke treba staviti u polietilensku vrećicu. Potom, vrećicu označiti i skladištiti u skladište radioaktivnog otpada. Monitoriranje i čišćenje treba nastaviti dok aktivnost ne padne ispod prihvatljive razine. Tipične brojke za ^{99m}Tc su 300 Bq cm^{-2} u radiofarmaciji i 30 Bq cm^{-2} za područja dostupna javnosti. Nakon toga treba nadzirati sve osobe i opremu uključenu u čišćenje (11).

U slučaju većeg izlijevanja treba napustiti prostoriju, zatvoriti ju i postaviti znakove upozorenje, a postupanje s kontaminiranim osobljem treba započeti odmah. Ako je riječ o kratkoživućem nuklidu najjednostavnije je zatvoriti prostoriju, ograničiti pristup kontaminiranom prostoru i omogućiti fizičko raspadanje kako bi se smanjila aktivnost (11).

Ako je potrebno očistiti sobu, treba nositi navlake za obuću, rukavice i plastične pregače. Za procjenu vanjske opasnosti treba koristiti monitor doze, a u slučajevima visokih doza potrebno je nositi osobni dozimetar. Monitorom kontaminacije, zaštićenim plastičnom prevlakom, potrebno je provesti pregled prostorije te označiti sva mjesta kontaminacije flomasterom, tada je postupak kao kod manjeg izlijevanja, ali papirnatim ručnicima treba rukovati pincetom. Ukoliko nakon početnog čišćenja ne postoji vanjska opasnost od brzine apsorbirane doze, širenje kontaminacije može se spriječiti prekrivanjem zahvaćenog područja polietilenom. U slučaju da dugotrajna kontaminacija potraje, sredstva koja mogu poslužiti za čišćenje su: za boju – sredstvo za uklanjanje boje ili ugljikov tetraklorid; za plastiku – organska otapala; za drvo – čelična vuna ili brusni papir, prilikom čega je obvezno nošenje maske za lice i osigurati dobru ventilaciju (11).

12. ZAKLJUČAK

Cilj zaštite od zračenja u nuklearnoj medicini je osigurati postizanje očekivanog medicinskog ishoda za pacijenta i optimizaciju postupka uz ograničenje rizika od zračenja za pacijente, medicinsko osoblje i javnost. U slučaju kontaminacije radioaktivnim pripravkom bilo prostorije ili osobe, dekontaminaciju vrše posebno opremljene i osposobljene osobe uz oprez da se kontaminacija ne proširi na njih te na okoliš. Pojavnost kontaminacije ili nezgoda prilikom rukovanja radioaktivnim pripravcima moguće je izbjeći pridržavanjem svih zakonom propisanih pravila, ali i cjeloživotnom edukacijom djelatnika nuklearne medicine. Također, učinkovito smanjenje doze za profesionalno osoblje i pacijenta moguće je postići automatskim dozatorima i injektorima, ali i korištenjem mobilnih štitova. Osim toga, pacijenta je moguće zaštititi od prekomjernog ozračenja korištenjem osjetljive opreme koja daje mogućnost primjene radiofarmaka manje aktivnosti. Ako je nedostupna takva oprema moguće je aplicirati manju aktivnost te produljiti vrijeme snimanja kako bi se osigurala kvaliteta dijagnostičkog postupka. Osnovni sigurnosni standardi IAEA-e zahtijevaju mjere za smanjenje vjerojatnosti nenamjernog ili slučajnog medicinskog izlaganja i prijavu bilo kakvog incidenta zračenjem. Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost Republike Hrvatske na temelju sigurnosnih standarada IAEA-e donio je zakone i propise koji se odnose na rukovanje radioaktivnim izvorima. Relativna složenost prakse nuklearne medicine predstavlja mnoge mogućnosti za pogreške, stoga je važno da se sve aktivnosti izvode u skladu s dobro utvrđenim postupcima te da su sve radnje podržane redovitim postupcima osiguranja kvalitete.

13. LITERATURA

1. Dodig D, Kusić Z. Klinička nuklearna medicina. Zagreb: Medicinska naklada; 2011.
2. Kubelka D, Radiobiologija i zaštita od ionizirajućeg zračenja. (nastavni materijal-skripta).
3. Ministarstvo unutarnjih poslova. Izvješće o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i nuklearnoj sigurnosti u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 1. siječnja 2021. do 31. prosinca 2022. godine. Studeni 2023. [Prisupljeno: 10. srpanj 2024] Dostupno na: <https://civilnazastita.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Radioloska%20i%20nuklearna%20sigurnost/Nacionalna%20izvjesca/Izvje%C5%A1%C4%87e%20o%20za%C5%A1titi%20od%20ion%20zra%C4%8Denja%20za%20razdoblje%20od%201.1.%202021.-31.12.2022..pdf>
4. Obaldo JM, Hertz BE. The early years of nuclear medicine: A Retelling. Asia Oceania Journal of Nuclear Medicine and Biology [Mrežno]. 2021;9(2) str.207-219. Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8255519/>
5. Gasinska A. The contribution of women to radiobiology: Marie Curie and beyond. Reports of Practical Oncology & Radiotherapy [Mrežno]. 2016 May;21(3):250-258. [Prisupljeno: 21. svibanj 2024] Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5002019/>
6. Open MedScience. History of Nuclear Medicine: A Century of Innovation and Impact [Mrežno]. Open MedScience. ©2024 Dostupno na: <https://openmedscience.com/history-of-nuclear-medicine-a-century-of-innovation-and-impact/>. [Prisupljeno: 21. svibanja 2024.
7. Primc C. Povijest nuklearne medicine. Glasnik pulske bolnice [Mrežno]. 2007 [pristupljeno 21. svibnja 2024.];4(suppl.1):137-140. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/23906>
8. Eterović D. Fizika slikovne dijagnostike za medicinare. 2011. [Prisupljeno 21. svibanj 2024.] Dostupno na: https://neuron.mefst.hr/docs/katedre/fizika_biofizika/Nastavni_materijali/Fizika%20slikovne%20dijagnostike%202011.pdf

9. Hrvatska enciklopedija. Radiobiologija. [Mrežno] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. [Pristupljeno: 12. ožujak. 2024.] Dostupno na:
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/radiobiologija>
10. Klanfar Z. i sur. Radiološka tehnologija u praksi. Zagreb: Zdravstveno veleučilište Zagreb; Naklada slap, 2009.,173.-181.
11. Sharp PF, Gemmell HG, Murray AD. Practical Nuclear Medicine. 3.izd. Springer: London, 2005. [Pristupljeno: 20. travanj 2024.] Dostupno na:
https://neuron.mefst.hr/docs/katedre/nuklearna_medicina/english/Sharp%20PF.%20Practical%20Nuclear%20Medicine.pdf
12. Leide-Svegborn S. Radiation Protection in Nuclear Medicine: Best Practice. IAEA International Atomic Energy Agency. [Mrežno] 15. Ožujak 2022. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na:
https://www.iaea.org/sites/default/files/22/04/iaea_webinar_radiation_protection_nm_si_grid_leide-svegborn_for_publication.pdf
13. International Atomic Energy Agency, Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, Vienna: IAEA, 2018. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1785_web.pdf
14. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation: Specific Safety Guide No. SSG-46. Vienna: IAEA, 2018. [Pristupljeno: 15. svibanj 2024.] Dostupno na: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1775_web.pdf
15. Mihić SM, Prlić I. Osobna dozimetrija ionizirajućeg zračenja. Priroda. Svibanj 2017., br.1057. ISSN 0351-0662, 18.-21.[Prestupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://www.imi.hr/wp-content/uploads/2018/04/Priroda-5-6-2017.pdf>
16. Linda Hall Library. [Mrežno] Kansas City, Missouri: Linda Hall Library ©2024 [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na:
<https://www.lindahall.org/experience/digital-exhibitions/the-atomic-age/02-it-s-a-question-of-physics/e-what-is-a-geiger-counter-and-what-makes-it-tick/>
17. International Atomic Energy Agency. Radiation protection of patients in therapeutic nuclear medicine. [Mrežno] IAEA © 1998–2024 [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.]

- Dostupno na: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/nuclear-medicine/therapeutic-nuclear-medicine/patients>
18. International Atomic Energy Agency. Radiation protection of pregnant women in nuclear medicine. [Mrežno] IAEA © 1998–2024 [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/nuclear-medicine/pregnant-women>
 19. The International Commission on Radiological Protection. 1992. Radiological Protection in Biomedical Research. ICRP Publication 62. Ann. ICRP 22 (3). [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_22_3
 20. The International Commission on Radiological. 2001. Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31 (1-3). [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_31_1-3
 21. Yoon I, Slesinger TL. Radiation Exposure In Pregnancy. [Ažurirano 1. svibnja 2023.]. StatPearls [Mrežno]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; siječanj 2024. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551690/>
 22. The International Commission on Radiological. 2000. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30 (1). [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_30_1
 23. Pahade JK, Litmanovich D, Pedrosa I, Romero J, Bankier AA, Boiselle PM. Quality initiatives: imaging pregnant patients with suspected pulmonary embolism: what the radiologist needs to know. Radiographics. 2009 May-Jun;29(3):639-54. doi: 10.1148/rg.293085226. Epub 2009 Mar 30. PMID: 19270072.). [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19270072/>
 24. International Atomic Energy Agency. Radiation protection of pregnant women in therapeutic nuclear medicine. [Mrežno] IAEA © 1998–2024 [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/nuclear-medicine/therapeutic-nuclear-medicine/pregnant-women>

25. International Atomic Energy Agency. Release of Patients After Radionuclide Therapy, Safety Reports Series No. 63, IAEA: Vienna, 2009. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.]
Dostupno na: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/pub1417_web.pdf
26. Leide-Svegborn S, Ahlgren L, Johansson L, Mattsson S. Excretion of radionuclides in human breast milk after nuclear medicine examinations. Biokinetic and dosimetric data and recommendations on breastfeeding interruption. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging* vol. 43,5 (2016): 808-821. doi:10.1007/s00259-015-3286-0
27. Mitchell KB, Fleming MM, Anderson PO, Giesbrandt JG, Young M, Noble L, i sur. ABM Clinical Protocol #31: Radiology and Nuclear Medicine Studies in Lactating Women. *Breastfeeding Medicine* [Internet]. ©Mary Ann Liebert 2019 Jun;14(5):290–4. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.] Dostupno na:
<https://www.bfmed.org/assets/31%20Radiology%20and%20Nuclear%20Medicine%20Studies%20in%20Lactating%20Women.pdf>
28. Treves ST, Baker A, Fahey FH, Cao X, Davis RT, Drubach LA, Grant FD, Zukotynski K. Nuclear medicine in the first year of life. *J Nucl Med.* 2011;52(6):905-925. doi:10.2967/jnumed.110.084202. PMID: 21622894. [Pristupljeno: 21. svibanj 2024.]
Dostupno na: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21622894/>
29. Verganelakis DA, Lyra-Georgosopoulou M. Nuclear Medicine Dosimetry in Paediatric Population [Mrežno]. *Dosimetry.* IntechOpen; 2022 [Pristupljeno 9. srpanj 2024.]
Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105346>
30. Treves ST, Fahey FH. Radiation Dose to Pediatric Patients From Radiopharmaceuticals. *Seminars in Nuclear Medicine.* 2022 Mar;52(2):149-156. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2021.11.007. Epub 2021 Dec 13. PMID: 34916043. [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34916043/>
31. Barrington SF, O'Doherty MJ, Kettle AG, Thomson WH, Mountford PJ, Burrell DN, i sur. Radiation exposure of the families of outpatients treated with radioiodine (iodine-131) for hyperthyroidism. *Eur J Nucl Med.* 1999. Jul;26(7):686-92. doi: 10.1007/s002590050438. PMID: 10398815 [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10398815/>

32. Mathieu I, Caussin J, Smeesters P, Wambersie A, Beckers C. Recommended restrictions after ¹³¹I therapy: measured doses in family members. *Health Phys.* 1999 Feb;76(2):129-36. doi: 10.1097/00004032-199902000-00004. PMID: 9929123. [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9929123/>
33. Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja. [Internet]. NN 42/2018 [Pristupljeno: 20. travanj 2024.] Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_42_813.html
34. Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja. [Internet]. NN 53/2018 [Pristupljeno: 20. travanj 2024.] Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_06_53_1062.html
35. International Atomic Energy Agency. Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine, Safety Reports Series No. 40, IAEA: Vienna, 2005. [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: <https://www.iaea.org/publications/7116/applying-radiation-safety-standards-in-nuclear-medicine>
36. Domínguez-Gadea L, Cerezo L. Decontamination of radioisotopes. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy.* 2011 Jul;16(4):147–52 [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2011.05.002>
37. Bushberg, TJ. Izloženost zračenju i kontaminacija. [Mrežno] HeMED.hr - [Pristupljeno 22. svibanj 2024.] Dostupno na: <https://hemed.hr/Default.aspx?sid=13084#toc-vanjska-dekontaminacija>
38. Tandon P, Prakash D, Subhash Chand Kheruka, Bhat NN. Planning and Design of High-Dose Therapy Facility. *Radiation Safety Guide for Nuclear Medicine Professionals.* Springer Nature; 2022. [Pristupljeno 9. srpanj 2024.] Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4518-2_9

14. ŽIVOTOPIS

Martina Paragi

Datum i mjesto rođenja: 19.06.1996., Zagreb

Obrazovanje:

2021.- Sveučilište u Splitu, diplomski studij radiološke tehnologije

2015–2018. Zdravstveno veleučilište Zagreb, Zagreb (Hrvatska)
Stručna prvostupnica (baccalaurea) radiološke tehnologije

2011.- 2015. Opća gimnazija Pakrac

2003.- 2011. Osnovna škola braće Radića Pakrac

Radno iskustvo:

2018.-2019. Pripravnički staž: Opća županijska bolnica Pakrac i bolnica hrvatskih veterana, Pakrac

2020.- KBC Sestre Milosrdnice - Klinika za Tumore; Zavod za radioterapiju i internističku onkologiju

Projekti : Provođenje programa kontrole i osiguranja kvalitete električnih uređaja koji proizvode ionizirajuće zračenje i procjena medicinskog ozračenja pacijenata na Zavodu za radiologiju i ultrazvuk Klinike za infektivne bolesti „ Dr. Fran Mihaljević” u Zagrebu; Projekt pod vodstvom prim. dr. sc. Klaudije Višković i financiran sredstvima ZVU 2017./2018.

Publikacija: „Naša iskustva u provođenju programa kontrole kvalitete uređaja za kompjutoriziranu tomografiju –multidisciplinarni pristup“ - Journal of Applied Health Sciences, Časopis za primijenjene zdravstvene znanosti, Volume: 5; Number: 2; October 2019

Vještine: **Strani jezici:** Engleski B2
Njemački A2
Rad na računalu: Osnovno poznavanje MS Office-a