

Radijacijska izloženost radiološkog tehnologa u PET/CT dijagnostici

Miličević, Goran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:176:650846>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**



Sveučilišni odjel zdravstvenih studija
SVEUČILIŠTE U SPLITU

Repository / Repozitorij:

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

SVEUČILIŠTE U SPLITU
Podružnica
SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA
DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
RADIOLOŠKA TEHNOLOGIJA

Goran Miličević

**RADIJACIJSKA IZLOŽENOST RADIOLOŠKOG
TEHNOLOGA U PET/CT DIJAGNOSTICI**

Diplomski rad

Split, 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
Podružnica
SVEUČILIŠNI ODJEL ZDRAVSTVENIH STUDIJA
DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
RADIOLOŠKA TEHNOLOGIJA

Goran Miličević

**RADIJACIJSKA IZLOŽENOST RADIOLOŠKOG
TEHNOLOGA U PET/CT DIJAGNOSTICI
TECHNOLOGIST RADIATION EXPOSURE IN PET/CT
DIAGNOSTICS**

Diplomski rad / Master's Thesis

Mentor:
prof.dr.sc. Ante Punda

Split, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
1.1. PET/CT	3
1.1.1. Povijest	3
1.1.2. Princip rada.....	6
1.1.3. Dohvaćanje i prikaz slike	10
1.1.4. Spajanje PET i CT slika	12
1.2. Ionizirajuće zračenje	14
1.2.1. Vrste i nastanak ionizirajućeg zračenja	15
1.2.2. Vrste radioaktivnog raspada	17
1.2.3. Ionizacija – međudjelovanje zračenja s materijom.....	18
1.2.4. Vrste izvora ionizirajućeg zračenja	20
1.2.5. Načini zaštite od ionizirajućeg zračenja	21
1.2.6. Vrste ozračenja: vanjsko i unutarnje	22
1.2.7. Fizikalne veličine i mjerne jedinice.....	22
1.3. Radiobiologija.....	24
1.3.1. Uvod	24
1.3.2. Čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma	25
1.3.3. Stohastički i deterministički učinci ionizirajućeg zračenja	26
1.4. Učinci ionizirajućeg zračenja na čovjeka i zdravstveni nadzor izloženih radnika	28
1.4.1. Posljedice izlaganja ionizirajućem zračenju.....	28
1.4.2. Patogeneza radijacijskih ozljeda.....	29
1.4.3. Akutna radijacijska bolest	30
1.4.4. Kasni učinci zračenja.....	31
1.4.5. Ostali učinci zračenja.....	32
1.5. Načela zaštite od ionizirajućeg zračenja: opravdanost, optimizacija i ograničenje ozračenja	32
1.5.1. Medicinsko ozračenje, profesionalno ozračenje i ozračenje stanovništva	36
1.5.2. Propisi kojima je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja	37

1.5.3.	Dozimetrijski nadzor izloženih radnika.....	40
1.6.	Osobna dozimetrija	44
1.6.1.	TL dozimetri – građa i princip rada.....	47
1.6.2.	Mjerenje Hp(0,07) prsten dozimetrima	50
2.	CILJ RADA.....	56
3.	IZVORI PODATAKA I METODE	57
3.1.	Opis radnog mjesta	58
3.1.1.	Radiološki tehnolog u HOT laboratoriju	58
3.1.2.	Radiološki tehnolog za PET/CT uređajem u radu s pacijentima.....	61
4.	REZULTATI.....	63
5.	RASPRAVA	69
6.	ZAKLJUČAK	71
7.	SAŽETAK.....	72
8.	SUMMARY	73
9.	LITERATURA.....	74
10.	ŽIVOTOPIS	76

1. UVOD

PET/CT kao metoda oslikavanja daje vrlo vrijednu dijagnostičku informaciju o fiziološkim i patološkim metaboličkim zbivanjima u tijelu pacijenta. Pomoću CT uređaja pravimo atenuacijsku mapu za korekciju prigušenja, fuzijom PET i CT slike dobivamo anatomske detalje, tj. metabolizam u morfološkoj promjeni što čini PET/CT kao metodu superiornijom u odnosu na ostale slične metode. (1)

Korištenje PET/CT kao pretrage je u sve većem porastu u Republici Hrvatskoj. Ovim radom smo htjeli pokazati ukupnu radijacijsku izloženost radiološkog tehnologa u PET/CT dijagnostici, kao i svrhu uvođenja prsten dozimetrije kao zakonske obveze za djelatnike koji rade s otvorenim izvorom zračenja.

Namjera ovog rada je detaljno istražiti postupke, protokole rada na PET/CT-u i radna mjesta radioloških tehnologa u PET/CT dijagnostici sa svrhom davanja smjernica za što manje zračenje radiološkog tehnologa.

1.1. PET/CT

1.1.1. Povijest

Pozitron emisijska tomografija (PET) je najspecifičniji i najosjetljiviji način za prikaz molekularnih interakcija i puteva u ljudskom tijelu. Za razliku od klasične nuklearnomedicinske dijagnostike koristi pozitrone kao obilježivače određenog farmaka kojim se promatra određeni metabolički proces. (1) Pri tom treba voditi računa o efektima samog tijela koje dovodi do raspršenja i gušenja razine radijacije. Svladavanje ova dva efekta i njihov ispravan prikaz je razlog zbog kojeg je George de Hevesy dobio Nobelovu nagradu za kemiju 1943. godine. (2)

Proteklih 60-tak godina koincencijska detekcija pozitron emitirajućih radionuklida je uznapredovala od jednog para detektora za planarni prikaz do današnjih PET skenera s

poljem detektorskih elemenata koji pokrivaju 25 ili više cm po uzdužnoj osi i sadrže otprilike 35.000 detektorskih elemenata.

Od 2001. godine gotovo svi PET uređaji se kombiniraju s CT-om, a od 2010. godine s MR uređajem. Kombinacija PET/CT uređaja povećava prostornu rezoluciju i kvalitetu PET snimke. Povijesno, razvoj kliničkih PET/CT uređaja krenuo je 90-ih godina 20.st., u vrijeme kad je tek počeo razvoj predkliničkih PET/MR uređaja. (2)

Sistemska napredak PET/CT uređaja kroz povijest omogućio je 40 puta veću rezoluciju danas u odnosu na prvobitne uređaje.

Prvi klinički PET uređaj razvili su dr. Brownell i dr. Aronow iz Opće bolnice Massachusetts (MGH) 1953. godine. Unaprijeđeni uređaj je dr. Brownell s timom stavio u funkciju 1969. godine.

Chesler je rotirajući MGH pozitronsku kameru omogućio snimanje više pogleda, koji jednom kad su se filtrirali dali transaksijalnu tomografsku snimku. To je omogućilo smanjenje distorzija i kvantitativna mjerenja gustoće radioizotopa u tkivu.

Daljnji napredak je bio 1974. godine kad su Ter-Pogossian, Phelps, Hoffman i Mullani radili na fizičkim karakteristikama pozitronske tomografije kako bi omogućili bolje mjerenje regionalne koncentracije uzorka u tkivu. Svoj sustav nazvali su PETT (Pozitron Emisijska Transaksijalna Tomografija). Jedan od većih problema prvih uređaja bilo je raspršenje zbog čega snimke nisu bile precizne. Nakon što su se pridružili Kuhlu u Philadelphii, Phelps i Hoffman su surađivali s Douglass i Williams u EG&G ORTEC, kompaniji iz Oak Ridge, Tennessee, i proizveli komercijalni PET skener naziva ECAT I, koji se sastojao od heksagonalnog polja detektora. Prva verzija postavljena je na UCLA u Los Angelesu. Drugu verziju, ECAT II, su kupili brojni centri su Europi, Americi i Japanu. Hoffman je na UCLA objavio niz radova na temu PET skenera. Daljnjim radom, došli su do razvoja ECAT III koji je koristio tri prstena detektora prvenstveno za kardiološka snimanja.

Kako bi povećali rezoluciju, a da pritom ne povećavaju značajno cijenu uređaja, Casey i Nutt su razvili blok detektor. Prvi komercijalni blok-detektor PET skener s 10cm uzdužnog i 15cm poprečnog isčitanja pribavila je Hammersmith grupa u Londonu. Daljnjim razvojem omogućili su pored 2D načina rada i visokoosjetljivi 3D način rada. Prvi takav 3D uređaj

postavljen je u Hammersmith ciklotron jedinici 1991. godine kao uređaj isključivo za snimanje mozga. (2)

Danas gotovo svi PET skeneri prikupljaju podatke u visokoosjetljivom 3D modu. Da bi snimke bile upotrebljive, tijekom godina su se razvile tehnike za korekciju raspršenja. Kvalitetnije snimke i kompjuterska obrada znatno su pridonijeli prihvaćanju PET uređaja. Kombinacija PET i MRI snimki uvelike je olakšala interpretaciju anatomskih funkcija mozga.

Koliko god PET/CT predstavlja revoluciju u dijagnostici, ima i svoja ograničenja. Jedno od najvećih je radijacijsko opterećenje, što posebno dolazi do izražaja u dječjoj populaciji. Osim toga, prednosti oslikavanja magnetnom rezonancijom u odnosu na kompjutoriziranu tomografiju osobito su značajne u oslikavanju mekih tkiva, uz različite mogućnosti koje daju tehnike magnetne rezonancije kao što su spektroskopija, tehnike funkcionalnog magnetnog oslikavanja, itd., te pružaju dodatne dijagnostičke mogućnosti, posebno u oslikavanju mozga i živčanog tkiva.

No, kombinacija pozitronske emisijske tomografije i magnetne rezonancije u jedinstvenom modalitetu postavlja iznimne tehničke zahtjeve. Jedno od njih je rad osjetljivih PET detektora i elektronike (fotomultiplikatorskih cijevi) u jakom magnetnom polju. Drugo je degradacija homogenosti magnetnog polja uzrokovana radom PET elektronike. Stvaranje korekcijskih mapa na osnovi MR signala se značajno razlikuje od korekcijskih atenuacijskih mapa dobivenih apsorpcijom x zraka. (1)

Kako je uzdužno pokrivanje PET skenera 16 do 25cm tako je bilo potrebno osmisлити uzdužno pomicanje pacijenta duž osi PET skenera za snimanje čitavog tijela. Osim snimki čitavog tijela, postoje i PET skeneri specifičnih organa poput mozga, grudi, prostate. Unatoč prednostima tih specifičnih PET skenera, medicinski centri ipak preferiraju PET skenere koji snimaju čitavo tijelo.

Tijekom 90-ih godina 20.st. pa čak i unatrag do 60-ih, postojao je interes da se kombiniraju snimke različitih uređaja kako bi se dobila potpunija slika bolesti. Međutim, kako su tadašnji uređaji bili zasebni, a često i međusobno se nalazili na različitim odjelima, njihova kombinacija bila je moguća isključivo softverskim algoritmima za spajanje. Takvi algoritmi su bili adekvatni za snimke mozga, PET i CT, PET i MR, s obzirom da je mozak u fiksnom

položaju unutar lubanje i ima jako ograničene stupnjeve slobode. Međutim, zbog velikog broja stupnjeva slobode i pokreta kako organa tako i udova, softversko spajanje bilo je znatno zahtjevnije. (2)

Ovaj problem je prepoznao pionir multimodalnog snimanja, Bruce Hasegawa sa sveučilišta UCSF koji je prvi primjenio hardversko spajanje fizičkim kombiniranjem dva uređaja, SPECT i CT-a 1991. godine. Neovisno o njemu, također 1991. godine, Townsend i Nutt su predložili kombiniranje PET i CT uređaja iako im je tada bilo nepoznato da je istu ideju razvio prof. Nagai sa sveučilišta Gunma u Japanu 7 godina ranije, 1984. godine, razvojem PET/CT uređaja. Sustav se sastojao od PET i CT skenera postavljenih jedno do drugog i jednog kreveta koji se kretao na platformi po aksijalnoj osi skenera. Krevet se pokretao kroz otvore PET, a zatim CT skenera i pritom obavljao obje snimke bez da se pacijent mora premještati s kreveta. To je omogućilo snimke u kojima se pacijent minimalno pomicao tijekom obje snimke nastale u vrlo kratkom razmaku što je dalo sasvim novu razinu preciznosti kombiniranim snimkama. Osnovni problem je točno preklapanje za koje su potrebne najmanje tri fiskne točke u različitim ravninama da bi preklapanje bilo uspješno. Rezultati tih prvih PET/CT snimki su potakli General Electric i Siemens da razviju komercijalne varijante PET/CT uređaja koji su se pojavili na tržištu 2001. godine, i to unutar par mjeseci neovisno jedan od drugog.

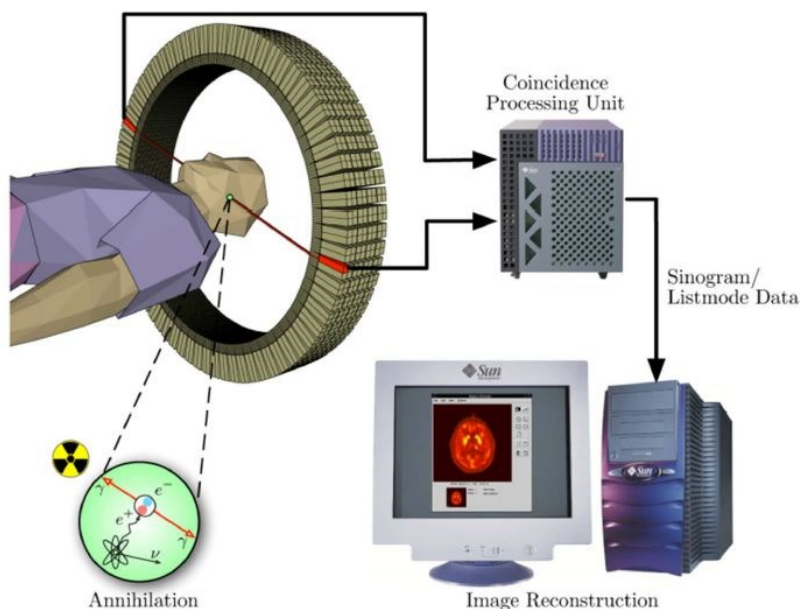
Prednosti kombiniranog PET/CT uređaja nad odvojenim PET i CT uređajima dokumentirane su brojnim radovima, i sada je u funkciji više od 5000 PET/CT uređaja diljem svijeta.

1.1.2. Princip rada

PET je molekularna slikovna tehnika koja uživo mjeri vrlo malu količinu radioaktivne tvari. Radioaktivni element, koji je sastavni dio radiofarmaka, emitira pozitrone. Emitirani pozitron stupa u interakciju sa elektronima u tkivu pri čemu nastaju dva fotona energije 511 keV koji se razilaze u suprotnim smjerovima. (3, 4)

PET prikaz se temelji na istovremenoj detekciji ovih dvaju fotona parom nasuprot postavljenih i koincidentno povezanih detektora u detektorskom prstenu postavljenom oko

pacijenta. Prilikom PET skeniranja prikupljaju se podaci milijuna slučajnih detekcija, čime se dobiva informacija o raspodjeli radiofarmaka u tkivu. Princip rada prikazan je na slici 1.

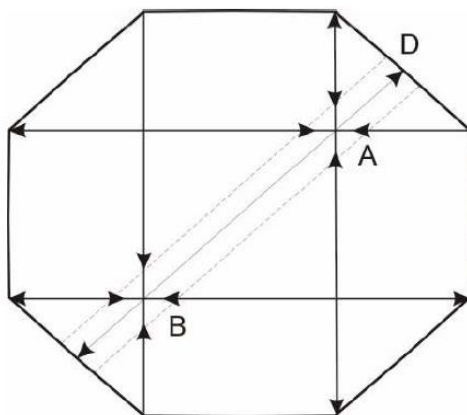


Slika 1. Princip rada PET-a

(Izvor: Modronja M.) (3)

Iz podataka o paru detektora koji je registrirao zračenje dobivamo liniju odgovora LOR (Line Of Response) koja spaja nasuprotne detektore koji su praktički istovremeno registrirali upadne fotone vidljivo na slici 2.

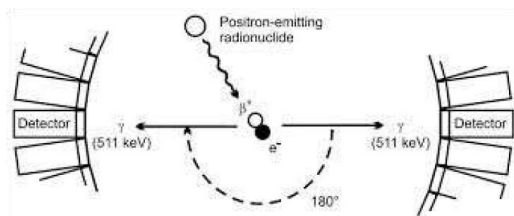
Scintilacijski detektori u PET-u imaju vremenski odziv na anihilacijsko zračenje od 6 do 12 ns, što omogućava brzinu akvizicije od 500 tisuća impulsa u sekundi. (3)



Slika 2. Određivanje položaja pozitronskih izvora (A, B) i LOR

(Izvor: Modronja M.) (3)

Elektronika kamere radi u režimu koincidentne detekcije, gdje se registriraju samo praktički simultani (nekoliko nanosekundi razmaka) parovi događaja. Pošto fotoni iz drugih dijelova tijela nemaju svog koincidentnog para, nije potrebno apsorbirati ih u kolimatoru (Slika 3).



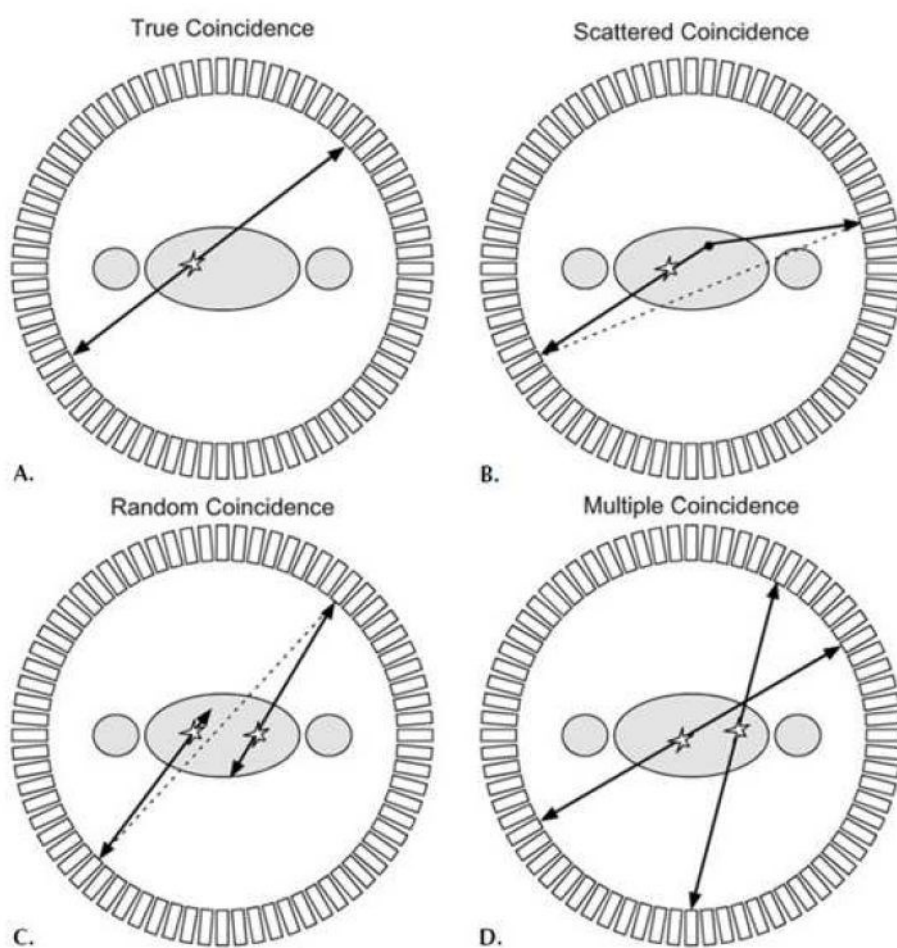
Slika 3. Koincidenzijska detekcija nasuprotnih detektora

(Izvor: Modronja M.) (3)

Prednosti nekorištenja kolimatora:

- znatno bolju rezoluciju (poput ultrazvuka)
- znatno veća osjetljivost detekcije zračenja

Ipak, neće sve koincidencije pridonijeti pravom 3D prikazu radiofarmaka. Moguća je detekcija pozadinskog šuma zbog rasipanja fotona prije detekcije ili zbog slučajne detekcije dva nevezana fotona, tzv. “random coincidences” (Slika 4).



Slika 4. Prikaz koincidencija: a) istinita “true” koincidencija; b) raspršena koincidencija; c) slučajna koincidencija; d) višestruka koincidencija

(Izvor: Modronja M.) (3)

Istinita ili prava (true) koincidencija nastaje simultanom detekcijom dva anihilacijska fotona nastala jednom pozitronskom emisijom. U idealnom slučaju, samo bi takve fotone detektirali. Ipak, više od 50% emitiranih fotona se rasprši prije izlaska iz pacijenta, što dovodi do promjene položaja detektirane koincidencije. Također, kada se dva fotona različitih pozitronskih emisija slučajno detektiraju u isto vrijeme, PET kamera će prikazati slučajnu koincidenciju. Zbog interakcije fotona s tkivom, moguće je da se registriraju po jedan foton iz dvije pozitronske emisije kao simultani par ili dva para koincidentnih fotona.

U slučaju rasipanja fotona odnosno njihovog skretanja u tijelu pri čemu gube energiju, ti fotoni neće biti u liniji izvora anihilacije, već će se činiti kao da dolaze iz drugih dijelova tijela. Ta pojava naziva se raspršena koincidencija ili “scatter coincidence”.

Kada prilikom pozitronske emisije dva para fotona, samo po jedan foton iz svake emisije dođe do nasuprotnih detektora, a drugi foton od svake emisije se apsorbira ili rasprši, istovremeno mogu biti detektirani fotoni koji nisu nastali istom pozitronskom emisijom, pa samim time to nisu pravi koincidentni fotoni. Takva pojava naziva se slučajna koincidencija ili “random coincidence”.

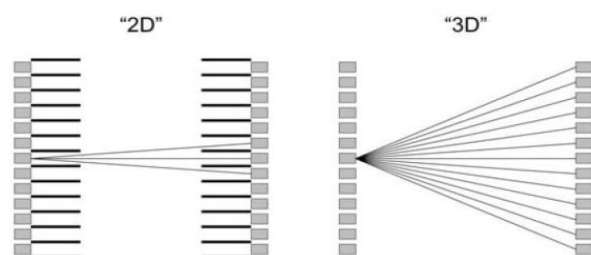
I kod raspršene i slučajne koincidencije dolazi do krivog prikaza položaja detektiranih fotona. Kako bi se utjecaj takvih grešaka smanjio potrebno je koristiti brze i osjetljive detektore koji omogućavaju postavljanje uskih vremenskih intervala detekcije (ns) i omogućuju visoku energetska rezoluciju primljenih fotona, odnosno uski energetski prozor.

Višestruke koincidencije se obično odbacuju. Zbog atenuacije fotona u tijelu pacijenta, veliki dio emitiranih fotona nije detektiran. Kako PET atenuacija ne ovisi o mjestu pozitronske emisije, tako je efekte atenuacije moguće korigirati. Ipak, sama korekcija je otežana zbog pokreta pacijenta.

1.1.3. Dohvaćanje i prikaz slike

Kružna detektorska glava PET kamere sadrži od nekoliko tisuća do nekoliko desetaka tisuća malih detektora. PET kamere mogu raditi u 2D i 3D načinu rada (Slika 5). (3, 4)

Kod 2D načina rada, kolimatori omogućavaju koincidentnu detekciju samo onih parova fotona koji padaju okomito na površinu kristala u jednoj ili nekoliko susjednih ravnina, dok kamere u 3D načinu rada ne koriste kolimatore, tako da je kristal u koincidentnom odnosu sa svim ravninama, odnosno s više ravnina kod kružne glave detektora.



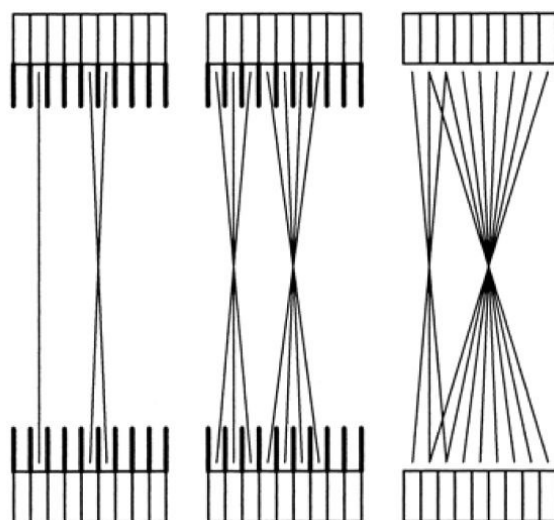
Slika 5. PET kamera u 2D i 3D načinu rada

(Izvor: Modronja M.) (3)

PET može raditi u oba načina koincidentne detekcije zbog gotovo istovremenog dolaska anihilacijskih fotona na kristale detektora, mjerenom u nanosekundama. Iz tog razloga, nije potrebno fizički apsorbirati fotone iz drugih dijelova tijela u kolimatoru jer takvi fotoni nemaju svoj koincidentni par. 3D način rada ima i do 5 puta veću osjetljivost, što omogućava brže snimanje, međutim zahtjeva kompleksnije rekonstrukcijske algoritme.

Iako je PET zapravo 3D način snimanja, u prošlosti su mnogi PET i PET-CT uređaji bili opremljeni septom (pregradom) napravljenom od olovnog ili volframovog kružnog štita pozicioniranog unutar vidnog polja. Te pregrade su štitile detektore od emitiranih ili raspršenih fotona izvan okomite ravnine (Slika 6). Time se kod 2D snimanja smanjuje šum zbog slučajnih, raspršenih ili koincidencija fotona izvan okomite osi. (3)

Moderni PET i PET-CT uređaji više nisu opremljeni septom, i jedino je moguće 3D snimanje također zahvaljujući osjetljivijim detektorima te jačim i bržim računalima.



Slika 6. Prikaz 2D snimanja (sa septom) i 3D snimanja (bez septe)

(Izvor: Modronja M.) (3)

Korekcija atenuacije kod PET-a je jednostavnija nego kod SPECT-a. Fotoni iz dubljih dijelova tijela bolesnika se više atenuiraju nego fotoni iz površinskih dijelova tijela, pa se u SPECT-u treba napraviti korekcija takve atenuacije. Kod PET-a je ukupna atenuacija oba anihilacijska fotona u jednom LOR-u ista, bez obzira na kojem dijelu LOR-a je nastala anihilacija. Atenuacija kod PET-a ovisi samo o debljini tkiva za pojedini LOR. Za korekciju atenuacije kod PET kamera koriste se transmisijски izvori od 511 keV-a koji kruže oko bolesnika te se na taj način dobije transmisijска korekcijsка mapa.

Rekonstrukcija slika vrši se pomoću “filtered back projection”, projekcijom filtriranih podataka ili iterativnom metodom, npr. “ordered subset expectation maximization” OSEM. Dobri PET uređaji imaju nazivnu rezoluciju od 4 do 6 mm, a u praksi od 7 do 10 mm.

1.1.4. Spajanje PET i CT slika

Korištenjem raznih radiofarmaka mogu se prikazati mnogi procesi na staničnoj i molekularnoj razini. Problem PET-a je što ne omogućava prikaz anatomskog položaja tih

procesa u tkivima i organima. Zbog toga se PET kombinira s dijagnostičkim uređajima koji daju anatomske prikaze struktura u organizmu, odnosno s CT i MR uređajima. Tako je moguće proizvesti kombinirane slike kojima je moguće točno utvrditi mjesto odnosno lokaciju pojačanog nakupljanja radiofarmaka. Korištenjem CT-a moguće je izraditi i transmisijske mape za korekciju prigušenja pozitronskog emisijskog zračenja. CT omogućava bržu izradu transmisijske mape u odnosu na izradu mape pozitronskim izvorom, pa je samim time i trajanje pretrage kraće. Činjenica da se danas ne proizvode samo PET kamere, najviše govori o prednostima kombiniranja PET i CT-a. (3, 4)

PET i SPECT su „molecular imaging methods“, odnosno prikazuju neke molekularne biološke procese, dok su CT i MR „anatomic imaging methods“, odnosno prikazuju anatomske, morfološke promjene u pojedinim tkivima ili organima. Fuzija slika omogućava precizno anatomske lociranje PET-om prikazanih bioloških procesa na molekularnom nivou. U odnosu na pojedinačne dijagnostičke doprinose PET-a i CT-a, fuzija PET-a i CT-a rezultira:

1. boljom detekcijom lezija
2. preciznijim lociranjem akumulacije radiofarmaka, što rezultira boljim razlikovanjem fiziološke od patološke akumulacije
3. preciznijim lokaliziranjem nakupljanja na mjestima dodira određenih tkiva i organa, npr. kost vs. meko tkivo, jetra vs. crijeva ili susjedni limfni čvorovi.
4. funkcionalnu odnosno metaboličku evaluaciju morfoloških/strukturalnih promjena

Osim slikovnog prikaza raspodjele radiofarmaka i kvalitativne procijene intenziteta akumulacije, intenzitet patološkog nakupljanja se može kvantificirati te usporediti s nakupljanjem radiofarmaka u ostalim dijelovima tijela. Aktivnost pojedine lezije se izračunava tako da se aktivnost u voxelu (voxel – volumetrijski pixel, volumetrijski element slike, jedinični matrični volumen) izražena u kBq/cm^3 , podijeli s injiciranom aktivnošću (dozom) normaliziranom na gram tjelesne mase, također izraženom u kBq/cm^3 . Tako dobiven indeks se zove SUV indeks (Standardised Uptake Value). SUV indeksi se standardno navode u nalazima, a značajni su za praćenje odgovora bolesti na liječenje. Smanjivanje SUV indeksa neke lezije nakon liječenja ukazuje na povoljan učinak istog.

1.2. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje i radioaktivne tvari su prirodna i stalna pojava u okolišu te u brojnim djelatnostima ljudi. Štoviše, uporaba umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja sve je raširenija. Izvori ionizirajućeg zračenja danas nemaju adekvatne alternative u medicini za dijagnostiku, terapiju te sterilizaciju medicinskog pribora i opreme. 17 % električne energije u svijetu proizvodi se u nuklearnim postrojenjima. Ionizirajuće zračenje se rabi za konzerviranje namirnica i hrane, uništavanje insekata i nametnika. Radiografski postupci u industriji već su rutinska tehnika u kontroli bez razaranja kojom se otkrivaju oštećenja i pukotine u brojnim cjevovodima, posudama, inženjerskim postrojenjima i građevinama. Primjena radioaktivnih tvari u gospodarstvu, poljodjelstvu, znanosti, istraživanjima i mnogim drugim ljudskim djelatnostima milijunima ljudi doprinosi ne samo poboljšanju kvalitete življenja, već osigurava i brojna radna mjesta u tim djelatnostima.

Kao i svaka djelatnost, uz korisnu stranu primjena ionizirajućeg zračenja donosi i opasnost po život i zdravlje ljudi te štetne posljedice po okoliš. Riziku ne podliježu samo oni koji rade s izvorima ionizirajućeg zračenja, već i svekoliko pučanstvo, tako da nedovoljno kontrolirana primjena tih izvora može dovesti do prave nacionalne nesreće, a mogu biti ugroženi i žitelji drugih država. Brojna iskustva iz prošlosti koja su rezultirala ozračenjem pojedinaca i potonje rizike po život i zdravlje ljudi te zagađenje okoliša ukazala su na potrebu sustavne i organizirane provedbe mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja. Društveno prihvaćanje rizika u svezi s uporabom ionizirajućeg zračenja uvjetovano je efektivnom koristi koju takva uporaba donosi. Opasnost kojom je popraćeno izlaganje ionizirajućem zračenju ne može se ukloniti u potpunosti, ali ipak, rizik se mora ograničavati i smanjivati administrativnim, organizacijskim i tehnološkim mjerama. To je razlog koji nalaže svakoj državnoj zajednici obvezu izgradnje sustavnog, kvalitetnog i uređenog sustava zaštite od ionizirajućeg zračenja na svim razinama društvenog ustrojstva. Takva sustavna organizacija mjera zaštite obuhvaćena je jednim imenom: zaštita od ionizirajućeg zračenja.

Zaštita od ionizirajućeg zračenja odnosi se na sve ljude koji mogu biti izloženi ionizirajućem zračenju ili posljedicama izlaganja pa se tako vodi računa i o budućim naraštajima koji mogu trpjeti posljedice dosadašnjeg i današnjeg izlaganja ionizirajućem zračenju.

1.2.1. Vrste i nastanak ionizirajućeg zračenja

Na planeti Zemlji nalazimo 90 prirodnih kemijskih elemenata. Ti elementi u smjesama, kemijskim spojevima ili u elementarnom stanju grade sve tvari, žive i nežive na Zemlji. Ti elementi različito su zastupljeni u toj građi, nekih je više neki su vrlo rijetki. Najsitniji dio nekog elementa koji još uvijek ima kemijska svojstva tog elementa nazivamo atom. Naziv dolazi od grčkog jezika: atomos = nedjeljiv; što ipak nije točno. I sam atom je sagrađen od sastavnih, još sitnijih čestica. To su: proton, neutron i elektron. Proton i neutron nalaze se u jezgri atoma (nukleus), a elektron se nalazi u omotaču koji obavlja jezgru.

Proton ima pozitivni naboj, a elektron negativni naboj: istog iznosa, ali suprotnog predznaka, dok je neutron bez ikakvog naboja. Proton i neutron imaju gotovo jednaku masu, a elektron 1800 puta manju masu. U prirodi je atom kao cjelina električki neutralan, jer se naboji protona i elektrona međusobno kompenziraju. Dakle, u jednom atomu u normalnom stanju imamo uvijek jednak broj protona i elektrona. Označava se slovom Z , dok se broj neutrona označava s N . Zbroj $Z + N$ daje broj A koji nazivamo atomskim brojem mase; to je ukupni broj neutrona i protona u jezgri.

Različiti kemijski elementi imaju atome s različitim brojem protona (elektrona), tj. brojem Z . Dakle, broj protona određuje vrstu elementa: npr. je li to vodik ili kisik ili uran. Tako npr. vodik ima 1 proton, kisik ima 8 protona, a uran čak 92. Broj neutrona ne utječe na kemijsku vrstu elementa.

Atomi jedne te iste vrste kemijskog elementa mogu imati različiti broj neutrona, tada se zovu izotopi, npr. vodik ima tri izotopa: obični vodik, teški vodik (deuterij) i radioaktivni vodik (tricij).

Kemijski se oni ne razlikuju jer imaju ista svojstva glede boje mirisa i okusa kao i afiniteta za izgradnju molekula s drugim elementima, ali se razlikuju po broju neutrona: prvi nema niti jedan, drugi ima jedan, a tricij ima čak dva. Tricij je nestabilan, tj. radioaktivan; nakon određenog vremena se raspada uz oslobađanje energije. Očito je prisutnost neutrona u jezgri tu jezgru destabilizirala. Slično je i za druge kemijske elemente od kojih mnogi imaju puno više izotopa.

Svi su elementi razvrstani u posebnu tablicu – periodički sustav, po kemijskim svojstvima. Elementi su razvrstani u osam karakterističnih skupina koje imaju slična kemijska svojstva. Elementi su poredani po rastućem broju protona/elektrona od $Z=1$ do $Z=92$ pa nadalje preko umjetno proizvedenih elemenata do $Z=107$.

Naziv izotop potječe od grčkog jezika izotopos=na istom mjestu, jer se ti atomi nalaze svi na istom mjestu u periodnom sustavu, predstavljaju istu vrstu elementa. Svi elementi iznad broja $Z=82$ (olovo) su radioaktivni.

Radioaktivne tvari jesu tvari koje sadrže, osim ostalih, i atome s nestabilnim jezgrama koje svojim raspadom proizvode ionizirajuće zračenje. Atomi s nestabilnim jezgrama su atomi čija je jezgra (nukleus) nestabilna, tj. kad-tad u budućnosti ona će se spontano raspasti pri čemu će emitirati energiju – bilo u obliku fotona (elektromagnetskog zračenja) ili u obliku emisije čestica koje odnose i energiju. (7, 8)

Radioaktivnost je svojstvo nekih atoma da im se jezgre spontano mijenjaju i pri tome emitiraju elektromagnetsko zračenje ili čestice.

Spontano mijenjanje jezgre atoma pri čemu se emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice naziva se radioaktivni raspad. Za pojedinu jezgru se ne može reći kad će se raspasti, ali se može odrediti koliko će se jezgri raspasti nakon određenog vremena t koje protekne od trenutka kad počnemo mjeriti. Nikakvim fizikalnim ili kemijskim postupcima ne može se utjecati na taj spontani raspad radioaktivne jezgre.

Neka u trenutku t_0 , kad počnemo mjeriti, imamo N_0 jezgri koje su nestabilne. Nakon proteka vremena t , raspadne se N jezgri. Nakon nekog vremena $t=T_{1/2}$, od početnog broja nestabilnih jezgri preostat će samo polovica, tj. $N=N_0/2$. Vrijeme $T_{1/2}$ zove se vrijeme poluraspada. Dakle, to je vrijeme za koje se polovica nestabilnih jezgri raspadne. To je karakteristika svakog radioaktivnog izotopa. Svaki izotop ima svoje karakteristično vrijeme poluraspada. Npr. za tricij je to 12 godina, za ^{137}Cs vrijeme poluraspada je 30 godina, za ^{192}Ir je 74 dana, itd.

Za potrebe zaštite od ionizirajućeg zračenja potrebno je odrediti broj raspada u jedinici vremena i to izražavati kao fizikalnu veličinu. Broj raspada u jedinici vremena neke vrste jezgre naziva se aktivnost. (7, 8)

Aktivnost izvora ionizirajućeg zračenja, dakle je broj raspada u jedinici vremena koji se događa u masi tog uzorka. Jedinica kojom se izražava aktivnost je 1 becquerel (čitaj: bekerel), oznake 1Bq.

To je malena jedinica pa se upotrebljavaju veće jedinice:

$$1 \text{ kBq} = 1000 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ MBq} = 1\,000\,000 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ GBq} = 1\,000\,000\,000 \text{ Bq} \dots$$

1.2.2. Vrste radioaktivnog raspada

Kako je ranije bilo rečeno, spontano mijenjanje jezgre atoma pri čemu se emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice naziva se radioaktivni raspad. Čestice, koje imaju masu, a nastale na ovaj način nazivaju se čestično zračenje. Fotoni nemaju masu, već predstavljaju male pakete energije koje se u prostoru šire brzinom svjetlosti i imaju osobine elektromagnetskih valova: valnu duljinu ili frekvenciju. Fotoni ili kvanti koji nastaju raspadom radioaktivne jezgre nazivaju se “gama” fotoni, a zračenje gama zračenje.

Fotoni koji nastaju u električnim uređajima, npr. rendgenskim uređajima, imaju iste osobine kao i gama fotoni, ali zbog podrijetla, tj. mjesta nastanka nazivaju se rendgenske zrake.

Dakle, ukratko, raspadom radioaktivne jezgre (radionuklida) nastaje zračenje koje može biti čestično ili elektromagnetski val frekvencije f sastavljen od fotona.

Čestice koje nastaju raspadom radionuklida imaju masu, a mogu biti “alfa” ili “beta” čestice, dakle imamo α -raspad i β -raspad.

Ako raspadom nastaju fotoni elektromagnetsko zračenje, tada se takav raspad naziva γ -raspadom.

U stvarnosti se često prilikom raspada istovremeno događa i emitiranje čestica i fotona, iako raspad može biti i samo jedne vrste, npr. u slučaju tricija događa se čisti β -raspad.

1.2.3. Ionizacija – međudjelovanje zračenja s materijom

U prirodi se atomi nalaze u neutralnom stanju, svaki atom treba imati jednak broj protona i jednak broj elektrona (Z). Dakle, njihovi naboji se međusobno poništavaju pa nemamo nikakav naboj atoma kao cjeline. Zbog djelovanja izvana, može se izbaciti elektron iz elektronskog omotača u atomu pri čemu jedan proton ostaje bez kompenzacije naboja u omotaču pa se ukupno atom pokazuje kao nabijen s pozitivnim nabojem $+1$. Takav atom, česticu, zovemo ion, a proces stvaranja nabijenih čestica iz neutralnih čestica ionizacija.

Zračenje koje može izazvati ionizaciju zovemo ionizirajućim zračenjem. Svako zračenje ne izaziva ionizaciju, npr. vidljiva svjetlost TV i radio valovi, mikrovalovi i sl. te se zovu neionizirajuće zračenje. X-zrake, rendgenske zrake, gama zrake, alfa i beta čestice, protoni te neizravno i neutroni mogu izazvati ionizaciju pa ih se ubraja u ionizirajuće zračenje. Ionizacija u materiji ne znači nužno i štetu za materiju, ali kod živih organizama, ionizacija može značiti i kemijske promjene u spojevima koji čine stanice i tkiva. Te kemijske promjene mogu izazvati biološke promjene u tkivima, a te promjene mogu izazvati promjene u funkciji tkiva što to znači da je nastupila bolest organa ili organizma, npr. tumor. (7, 8)

Ako dođe u stanicama do promjene gena (DNK u kromosomima) mogu se ako se radi o spolnim stanicama prenijeti promjene na potomke, pa imamo genetske posljedice. To su najveće opasnosti koje predstavlja ionizirajuće zračenje za živi organizam te je potrebno provoditi zaštitu da se takve posljedice ne dogode.

Prolazom ionizirajućeg zračenja kroz materiju dolazi do ionizacije pri čemu se energija ionizirajućeg zračenja prenosi na elektrone u atomima materije čime se zračenje guši, ono slabi, dok ne nestane ili mu prodorna moć potpuno oslabi da više nije štetno. Pri tome, naravno, dolazi do ionizacije u materiji kojom ionizirajuće zračenje prolazi.

Ako imamo čestično zračenje: alfa i beta čestice, one imaju masu te se prolazom između atoma „sudaraju“ s njima i pri tim „sudarima“ elektronima predaju dio svoje kinetičke energije. Njihova energija se smanjuje, a broj ioniziranih atoma se povećava. Kad predaju svu svoju energiju, čestice se zaustave i utope u materiji. Što je veća čestica, veću energiju preda materiji i kraći je njen put. Tako već i list papira, koža ili sloj zraka zaustavi alfa česticu. Beta čestica-elektron ima manju masu te se rjeđe „sudari“ s elektronima atoma materije zbog

čega joj treba dulji put da „sudarima“ preda svu svoju kinetičku energiju prije nego se zaustavi (nekoliko metara u zraku). Duljina puta do zaustavljanja u materiji ovisi o početnoj energiji čestice.

Kad se govori o ionizirajućem zračenju koje je sastavljeno od fotona, elektromagnetski val frekvencije f , nema čestica koje imaju masu već pakete energije. Fotoni s materijom ne međudjeluju „sudarima“ kao što to rade čestice. U slučaju fotona, radi se o tri važna, iako ne jedina, mehanizma interakcije s materijom:

1. Fotoelektrični efekt,
2. Comptonov efekt
3. Tvorba para elektron-pozitron.

Kod fotoelektričnog efekta, foton se sudara s elektronom u omotaču, predaje mu svu svoju energiju, koja ako je veća od energije vezanja elektrona za atom, taj elektron oslobađa iz atoma i on ode, ostavljajući atom s jednim $+1$ nabojem. Dakle, imamo ionizaciju, a foton je nestao. To se događa samo ako je energija fotona ispod određene granice. Ako je energija veća, događa se drugi proces, tzv. Comptonov efekt.

Kod Comptonovog efekta, foton se sudara s elektronom u omotaču, predaje mu dio svoje energije, izbaci ga iz omotača i tako ionizira atom, ali odlazi raspršivši se pod nekim kutom dalje s umanjenom energijom. Time je energija fotona samo smanjena, ali foton nije nestao. Tako se dobijemo raspršeno zračenje koje je veliki problem u zaštiti od ionizirajućeg zračenja.

Treći efekt, tvorba para elektron-pozitron, događa se kad je energija fotona veća od određenog praga određenog Einsteinovom formulom. Prolazom takvog fotona visoke energije u blizini jezgre foton jednostavno nestane, a pojavi se par elektron-pozitron koji putuju u suprotnom smjeru odnoseći preostalu energiju u obliku kinetičke energije koju „sudarima“ prenose na druge elektrone.

Svim ovim procesima se energija upadnog ionizirajućeg zračenja smanjuje jer se prenosi na materiju, pri čemu dolazi do ionizacije i ostalih posljedica koje ta ionizacija izaziva.

1.2.4. Vrste izvora ionizirajućeg zračenja

Izvor ionizirajućeg zračenja jest svaki uređaj, postrojenje ili tvar koja proizvodi ili odašilje ionizirajuće zračenje, a koji nisu isključeni od primjene zakona kojim je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja, uključivo i nuklearni materijal.

Prema načinu nastanka, izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na prirodne i umjetno stvorene. Prirodnim izvorima ionizirajućeg zračenja pripadaju svemirska zračenja i prirodna zračenja radioaktivnih tvari. Svemirska zračenja čine oko 13% ukupnog prirodnog zračenja, a dijeli se na primarno svemirsko zračenje (dolazi sa Sunca i izvan Sunčevog sustava, čine ga čestice vrlo velikih energija) i sekundarno svemirsko zračenje (produkti reakcije atmosfere s primarnim svemirskim zračenjem). Pod prirodnim zračenjima radioaktivnih tvari smatraju se sve one radioaktivne tvari koje su prisutne svuda u prirodi, u tlu, stijenama, vodi, zraku i vegetaciji.

Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja su oni izvori ionizirajućeg zračenja koje je stvorio čovjek. Obzirom na način nastanka ionizirajućeg zračenja u njima, izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na radioaktivne izvore i električne uređaje koji proizvode ionizirajuće zračenje (npr. rendgenski uređaj i akcelerator).

Radioaktivni izvor je radioaktivna tvar koja nije izuzeta (u smislu primjene svih odredbi zakona kojim je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja).

Prema izvedbi, radioaktivni izvor može biti zatvoreni radioaktivni izvor i otvoreni radioaktivni izvor. Zatvoreni radioaktivni izvor jest radioaktivni izvor zatvoren u nepropusnoj ovojnici od neradioaktivne tvari tako da radioaktivna tvar ne može doći u dodir s okolišem. Otvoreni radioaktivni izvor jest radioaktivni izvor koji nije zatvoreni radioaktivni izvor, a može biti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju.

Radioaktivnim izvorom ne smatra se ona radioaktivna tvar koja sadrži radionuklide aktivnosti ili koncentracije aktivnosti manje od graničnih vrijednosti utvrđenih Pravilnikom o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima (NN 41/13).

Zakon kojim je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja ne odnosi se na prirodnu razinu

ionizirajućeg zračenja podrijetlom iz svemira, Zemljine kore ili ljudi ako nije promijenjena ljudskom djelatnošću, osim u slučaju radnih aktivnosti. Radne aktivnosti su ljudske aktivnosti koje se ne ubrajaju u djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, a pri kojima može doći do povećanja ozračenja radnika i stanovnika od prirodnih izvora ionizirajućeg zračenja.

1.2.5. Načini zaštite od ionizirajućeg zračenja

Osobina ionizirajućeg zračenja važna za zaštitu od ionizirajućeg zračenja jest ta da intenzitet ionizirajućeg zračenja opada s kvadratom udaljenosti. Poveća li se udaljenost od izvora ionizirajućeg zračenja dva puta, intenzitet, a posljedično tome i ozračenje pojedinca, smanjit će se četiri puta.

Ozračenje pojedinca ovisi i o vremenu izlaganja ionizirajućem zračenju. Ozračenje je proporcionalno vremenu izlaganja – koliko puta duže je netko izložen ionizirajućem zračenju, toliko puta će veće biti i njegovo ozračenje, i obrnuto.

Kako je ranije bilo objašnjeno, prolazeći kroz materiju ionizirajuće zračenje slabi. Iz tog razloga umetanjem štita između izvora ionizirajućeg zračenja i osobe koja je izložena tom zračenju, može se bitno smanjiti doza te osobe. Vrsta materijala od kojeg je napravljen štit, kao i njegova debljina ovise ponajprije o vrsti ionizirajućeg zračenja, kao i o načinu korištenja štita – to može biti betonski zid, sloj olova, zaštitni paravani, zaštitne pregače, naočale,...

Drugim riječima, tri su osnovna načina kojima se od ionizirajućeg zračenja štiti:

- biti na dovoljnoj udaljenosti,
- što je moguće kraće biti izložen ionizirajućem zračenju,
- koristiti štit.

1.2.6. Vrste ozračenja: vanjsko i unutarnje

Ovisno o tome nalazi li se izvor ionizirajućeg zračenja izvan našeg tijela ili smo ga na neki način (udisanjem, gutanjem,...) unijeli u naše tijelo, ozračenje može biti vanjsko ili unutarnje. Primjer vanjskog ozračenja je ozračenje u slučaju rada rendgenske cijevi ili akceleratora, kao i slučaju teleterapije, odnosno industrijske radiografije.

Primjer unutarnjeg ozračenja je ozračenje u slučaju unošenja radioaktivnih tvari u organizam kao dio dijagnostičkih postupaka na odjelima nuklearne medicine. Bitno je naglasiti da osoba u čije tijelo je unesen radionuklid za svoju okolinu predstavlja vanjski izvor ionizirajućeg zračenja.

1.2.7. Fizikalne veličine i mjerne jedinice

Ono što je u zaštiti od ionizirajućeg zračenja važno jest kolika je energija koja se prolazom ionizirajućeg zračenja kroz materiju predaje toj materiji. Energija se u našem svijetu mjeri u Joule, oznaka J. To je preglomazna jedinica za potrebe u međuatomskom svijetu. Zato se koriste puno manje jedinice kao $1 \text{ eV} = 1 \text{ elektron volt}$, tj. energija koju dobije jedan elektron ubrzanjem u električnom polju kad pređe razliku napona od 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Izvedene jedinice su :

$$1 \text{ keV} = 1\,000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1\,000\,000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 1\,000\,000\,000 \text{ eV}.$$

Pretpostavimo da imamo materiju mase m kroz koju prolazi ionizirajuće zračenje i pri prolazu po svakom kg mase preda energiju E_{predano} (joula). Omjer te energije i mase m naziva se apsorbirana doza, D .

Jedinica za mjerenje apsorbirane doze je 1J po 1 kg, a naziva se 1 gray, oznaka 1 Gy.

U svrhu zaštite od ionizirajućeg zračenja koriste se izvedene jedinice:

$$1 \text{ miliGy} = 1 \text{ mGy} = 0,001 \text{ Gy}$$

$1 \text{ mikroGy} = 0,001 \text{ mGy} = 0,000001 \text{ Gy}$.

Ako se apsorbirana doza podjeli s vremenom u kojem je primljena dobijemo veličinu koja se zove brzina apsorbirane doze, a mjeri se u Gy/sat ili mGy/sat ili slično.

Sva tkiva nisu jednako osjetljiva na zračenje, neka su više osjetljiva, a neka manje. Kod ocjene štetnosti određene vrste ionizirajućeg zračenja treba uzeti u obzir i tu osjetljivost. Naime, nije svejedno radi li se o alfa, beta ili gama zračenju. Iskustvo nam kaže da ako imamo recimo alfa izvor zračenja blizu, nećemo osjetiti nikakve posljedice, jer se ionizacija dogodila u zraku između izvora i naše kože te nema apsorpcije energije u tijelu, već izvan tijela. Ako imamo gama izvor blizu tijela, ionizirajućeg zračenje (fotoni) se slabo apsorbira u zraku koji ima manju gustoću od tkiva, već se uglavnom jednim od navedenih načina apsorbira u tkivu i organima. Ionizirajuće zračenje (fotoni) oslabljeno za apsorbiranu energiju (dozu) izlazi čak iz tijela i odlazi dalje.

Napominjemo da je sasvim druga situacija ako progutamo ili udahnemo alfa ili beta, dakle čestični izvor, u odnosu ako progutamo ili udahnemo čisti gama izvor. Tad imamo unutarnje ozračenje.

Energija koju odašilje alfa izvor u potpunosti se apsorbira u blizini samog izvora, imamo intenzivnu ionizaciju na malom volumenu i na tom istom volumenu oslobođenu svu energiju ionizirajućeg zračenja. Velika energija, mali volumen, mala masa i imamo veliku apsorbiranu dozu. Dakle, i štetnost takvog ionizirajućeg zračenja je velika. Ako smo progutali gama izvor, on emitira fotone koji izlaze iz tijela te se samo mali dio energije zadrži u tijelu (ozrači ga) pa je i doza manja: manje energije na veću masu, omjer je manji.

To je razlog zašto se uvode kod vanjskog ozračenja koeficijenti modifikacije koji ovise o vrsti zračenja.

Oni se nazivaju težinski koeficijenti zračenja i označavaju se s W_R .

Apsorbirana doza D , pomnožena s koeficijentom za pojedinu vrstu tkiva T daje ekvivalentnu dozu, H .

Jedinica je i dalje $1 \text{ J po } 1 \text{ kg}$, ali sad se zbog koeficijenta numerički razlikuje od 1 Gy i ima novi naziv: 1 sievert (čitaj: sivert), oznake 1 Sv .

Izvedene manje jedinice koje se koriste su:

$1 \text{ miliSv} = 1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$

$1 \text{ mikroSv} = 0,001 \text{ mSv} = 0,000001 \text{ Sv}$

Ekvivalentna doza odnosi se na pojedino tkivo ili organ.

Nadalje, nije svako tkivo jednako osjetljivo na ionizirajuće zračenje. Osjetljivost tkiva izražava se uvođenjem još jednog koeficijenta, W_T , težinski koeficijent tkiva T.

Zbroj umnožaka težinskog tkiva i ekvivalentne doze tog tkiva naziva se efektivna doza. Jedinica za efektivnu dozu opet je 1 Sv. Efektivna doza dana je za cijelo tijelo. Efektivna i ekvivalentna doza se izračunavaju, a apsorbirana doza se mjeri.

1.3. Radiobiologija

1.3.1. Uvod

Radiobiologija (radijacijska biologija) je grana biofizike koja proučava djelovanje različitih vrsta zračenja na žive sustave, od stanične razine sve do cijelog organizma ili populacije. Dostignuća radiobiologije omogućila su organiziranje zaštite od zračenja i razvoj medicinske primjene zračenja.

Biološki nadzor (biomonitoring) važan je dio zdravstvenog nadzora osoba koje su profesionalno izložene različitim fizikalnim (zračenje) i kemijskim mutagenima ili kancerogenima. Zasniva se na mjerenju različitih bioloških pokazatelja koji upućuju na najranije, još popravljive biološke učinke, koji prethode pojavi zloćudnih i drugih bolesti. Primjenom biljega izloženosti, učinka i sklonosti na razini proučavanih populacija možemo utvrditi kakve su razine izloženosti štetnostima na radnim mjestima, je li izloženost rezultirala mjerljivim učinkom (oštećenjem molekule DNA) te otkriti ispitanike s većom osjetljivošću genoma koji su pod povećanim rizikom.

1.3.2. Čimbenici koji utječu na stupanj oštećenja organizma

Stupanj oštećenja organizma zbog izloženosti ionizirajućem zračenju ovisi o nekoliko čimbenika.

Energija koja se prolazom zračenja kroz materiju predaje toj materiji jest 1 eV (elektron volt). Omjer te energije i mase nazivamo apsorbiranom dozom. Apsorbirana doza jest količina energije predana jediničnoj masi tvari tijekom prolaska zračenja kroz nju. Što je apsorbirana doza veća, to će biološki učinak biti veći. Fizikalna jedinica kojom se izražava apsorbirana doza jest grej (Gy). Efektivna doza jest proračunom modificirana apsorbirana doza kojom se izražava rizik izlaganja ionizirajućem zračenju uzimajući u obzir različitu biološku učinkovitost različitih vrsta ionizirajućeg zračenja i različitu osjetljivost tkiva i organa ljudskog tijela s obzirom na ionizirajuće zračenje. Fizikalna jedinica kojom se izražava efektivna doza jest jedan svert (Sv). U terminu efektivne doze dane su sve granice koje se propisuju u zaštiti od zračenja za cijelo tijelo. Efektivna doza za cijelo tijelo dobije se zbrajanjem efektivnih doza za sva tkiva. Efektivna doza se izračunava, a apsorbirana doza se mjeri dozimetrima. Jednaka apsorbirana doza različitih vrsta zračenja uzrokuje u istom tkivu različite učinke. Zbog toga, da bi dobili mjeru koja uvažava različiti učinak pojedinih vrsta zračenja, apsorbiranu dozu množimo faktorom karakterističnim za tu vrstu zračenja. Tako dobivenu veličinu zovemo ekvivalentna doza.

U biološkim sustavima zračenje ovisi o količini apsorbirane energije i o njenoj prostornoj raspodjeli.

Osjetljivost pojedine vrste tkiva ovisi o diobi stanica u tom tkivu. Stanice koje grade mišićna, živčana i koštana tkiva vrlo se rijetko, gotovo nikad ne dijele, te su stoga slabo osjetljive na izloženost zračenju.

Nasuprot njima, na ionizirajuće zračenje su puno osjetljivije nediferencirane stanice, odnosno matične stanice koje susrećemo u krvotvornom tkivu i spolnim žlijezdama, odnosno stanice kože i sluznica koje se neprekidno dijele. Zbog toga rizik od izloženosti zračenju za sve dijelove ljudskog tijela nije isti. On varira od organa do organa. To je izraženo kroz veličinu koju nazivamo težinski koeficijent za pojedino tkivo ili organ. Veličina koja uvažava sve

navedene čimbenike naziva se efektivna doza. Izračunava se tako da se zbroje umnošci ekvivalentnih doza i težinskih koeficijenata za ozračena tkiva i organe. (9, 10)

Brzina primanja doze je također jedan od čimbenika koji utječu na stupanj oštećenja organizma. Ako je brzina doze dovoljno mala ili je primljena u dijelovima između kojih su razmaci dovoljno dugi, tkivo će biti u mogućnosti normalnom mitozom nadomjestiti izgubljene stanice. Zbog toga, doza koja bi primljena odjednom imala letalni učinak, primljena kroz duže vremensko razdoblje neće nužno imati za posljedicu smrt. Relativno velike doze primljene kroz duže vremensko razdoblje mogu ostaviti male ili nikakve vidljive posljedice.

Oštećenja u znatnoj mjeri ovise o veličini dijela tijela koje je ozračeno (raspodjela doze). Učinak zračenja na tijelo će biti to manji što je ozračeni dio manji.

Na stupanj oštećenja tijela utječe i Linearni prijenos energije (LET). Visoko LET zračenje za istu ukupnu dozu je letalnije od niskog LET zračenja. Jako LET zračenje deponira veće količine energije po jedinici tvari kroz koju prođe te je mogućnost višestrukih lezija u blizini u kratkom vremenu vrlo visoka.

Stupanj oštećenja organizma ovisi i o životnoj dobi i spolu osobe: mlađe osobe su u pravilu osjetljivije na zračenje od starijih (fetus je daleko najosjetljiviji), žene su nešto manje osjetljive na zračenje u odnosu na muškarce.

1.3.3. Stohastički i deterministički učinci ionizirajućeg zračenja

Biološke učinke zračenja možemo podijeliti u dvije grupe. Jedni su deterministički (nestohastički), a drugi su stohastički učinci. Deterministički su učinci posljedica gubitka velikog broja stanica, nastaju primjenom velikih doza zračenja (jačina im je ovisna o efektivnoj dozi) i vidljivi su brzo nakon ozračenja. Da bi učinak bio vidljiv potrebna je određena količina ("prag") zračenja.

Gubitak stanica ne predstavlja velik problem za čovječji organizam u kojem svakodnevno umire preko milijun stanica. Smrću stanice onemogućuje se prijenos izmijenjene genetičke informacije na stanicu kćerku. Ukoliko je postotak uništenih stanica u nekom organu ili tkivu

velik, tada funkcija organa ili tkiva može biti oslabljena, a u pojedinim slučajevima gubitak stanica dovest će i do smrti organizma.

Greške u popravku važnih DNA regija kod preživjelih stanica mogu rezultirati stabilnim genetskim promjenama. Stohastički učinci, kao što su mutacije, nasljedne promjene, te tumori vidljivi su tek nakon određenog vremena latencije, za njih nema praga, tj. može ih izazvati i veoma mala doza zračenja. Stoga ih se niti ne može predvidjeti, kao što se to može učiniti za točno određeni – determinirani učinak, nego ih se može samo statistički predvidjeti. Stohastički učinci mogu nastati u somatskim, ali i u spolnim stanicama, pa se promjene mogu prenijeti na potomstvo (nasljedne promjene, indukcija leukemija, mentalna retardacija, malformacije, smrt ploda). Ako se takove stanice nastave dijeliti, nastat će klonovi izmijenjenih stanica. Većina ovako izmijenjenih stanica ne napreduje do karcinoma jer gotovo ni jedna ne ostaje sposobna za život nakon nekoliko dijeljenja. (9, 10)

One koje su sposobne za više dijeljenja često se diferenciraju u funkcionalne stanice koje se dalje ne dijele, može izostati slijed događaja iz okruženja stanice potreban za poticanje stanične diobe ili dolazi do programirane stanične smrti (apoptoza).

Zračenje može izazvati čitav spektar nasljednih promjena koje mogu biti veoma male, poput promjene u pojedinom genu, veće, poput onih nastalih lomovima kromosoma i spajanjem preostalih dijelova, do veoma opsežnih kada se mijenja i broj kromosoma. Jasno je da će i biološke posljedice biti to teže što su promjene genoma opsežnije, a veoma velike promjene, uslijed odumiranja stanica, tkiva, te organa, nespojive su sa životom jedinke.

Mada vrlo djelotvorni, opisani mehanizmi ne mogu u svim slučajevima spriječiti daljnju diobu stanica čiji genetski zapis ne odgovara stanici od koje su nastale. Takve stanice može potaknuti na daljnju diobu i agens čiji je karcinogenetski potencijal vrlo nizak. Koncentracija agensa ili doza potrebna za poticaj diobe kod kronične izloženosti ne mora biti tako visoka kao za nastanak osnovne promjene.

Promjene u organizmu čiji nastanak povezujemo s promjenama u genetskom materijalu pojedinih stanica mogu se, ali i ne moraju dogoditi pa se može govoriti samo o vjerojatnosti njihova nastanka i zato ih nazivamo stohastičkim. Vjerojatnost nastanka tih promjena u organizmu ovisna je o efektivnoj dozi. Što je doza manja i vjerojatnost nastanka promjena je

to manja, ali ne postoji tako mala doza za koju bi vjerojatnost nastanka promjena bila jednaka nuli.

Cilj zaštite od ionizirajućeg zračenja je spriječiti nastanak determinističkih učinaka koji su posljedica izlaganja zračenju i ograničiti pojavu stohastičkih učinaka na najmanju moguću mjeru te osigurati da pri obavljanju djelatnosti kod kojih dolazi do izlaganja ionizirajućem zračenju to izlaganje bude opravdano, odnosno da korist od tog izlaganja uvijek bude veća od štete.

1.4. Učinci ionizirajućeg zračenja na čovjeka i zdravstveni nadzor izloženih radnika

1.4.1. Posljedice izlaganja ionizirajućem zračenju

Zbog odlaganja energije ionizirajuće zračenje u tkivu može uzrokovati oštećenje ili smrt stanica. Zračenje može direktno djelovati na ozračenu osobu i na potomke ozračene osobe, prijenosom genetskog materijala. Biološki učinci zračenja ovise o djelotvornosti pojedinih vrsta zračenja i osjetljivosti pojedinih tkiva na zračenje. Kad stanica apsorbira zračenje, moguća je nekoliko ishoda.

Stanica može biti toliko oštećena da prestane normalno funkcionirati i odumre, može izgubiti sposobnost reprodukcije i dalje živjeti, genetski materijal unutar stanice (DNA) može biti oštećen tako da su buduće kopije stanice promijenjene. Ako je promijenjena stanica tkiva ili organa, daljnjim razmnožavanjem može takva stanica biti inicijator raka ako su ozračenjem izazvane mutacije DNK reproduktivnih stanica, mutacija se može, ali ne mora očitovati kao nasljedni učinak zračenja kod potomstva izložene osobe. Mutacije se obično ne vide u prvim potomaka, jer svaka osoba ima za isto svojstvo dva gena, svaki od jednog roditelja, a mutirani gen je u pravilu recesivan. Štetna posljedica mutacija nastaje ako se slučajno za isto svojstvo nađu oba gena mutirana. Većinu oštećenja stanice poprave zato što je sustav za sprječavanje promjena u genomu vrlo djelotvoran i u većini slučajeva stanica popravljiva nastala oštećenja. Od 1000 oštećenja popravi se njih 999. Od 1000 oštećenih stanica, koje stanica nije uspjela

popraviti, njih 999 umire, tako da u konačnici tek jedna od 100 000 oštećenih stanica s promijenjenim genetskim kodom preživi. Još nije posve razjašnjeno na koji se način mutirana stanica brani od daljnje tijeka prema razvoju karcinoma. Pretpostavlja se da je to uloga i imunološkog aparata, ali i neimunoloških mehanizama otklanjem preneoplastičnih stanica. Ostali mehanizmi koji štite organizam od začetka i stvaranja tumora, uključuju popravak DNK, apoptozu (programiranu smrt stanice), terminalnu diferencijaciju i fenotipsku supresiju. Svi ti mehanizmi zajedno umanjuju vjerojatnost razvoja oštećene stanice u tumorsku, ali je vrlo teško procjenjivati kolika je točno uloga pojedinog od navedenih mehanizma. Na kraju se može dogoditi da zračenje uopće nije uzrokovalo oštećenje stanice. Da li će stanica biti oštećena ili ne ovisi i o razini i o brzini zračenja. O dozi koja ne izazove više od jednog kritičnog oštećenja po stanici u vremenu u kojem su mehanizmi popravka stanice učinkoviti, govorimo kao o maloj dozi (procjenjuje se da je gornja granica male doze 200 mSv ukupnog ozračenja odnosno 0,1 mSv po minuti za brzinu doze). Po nekim autorima, osim negativnog učinka na stanice, ionizirajuće zračenje može imati i koristan učinak (hormeza). Neke studije pokazuju da niske doze zračenja na neki način mogu stabilizirati stanicu te postaje otpornija na zračenje. Taj je adaptivni mehanizam ograničenog trajanja i vjerojatno je posljedica stimuliranja staničnih mehanizama popravka kod opetovanih izlaganja.

Nisu sva tkiva jednako osjetljiva na zračenje te kod ocjene štetnosti određene vrste zračenja treba uzeti u obzir i tu osjetljivost. Osim toga bitan je i način ozračenja; bitno je da li se radi o ozračenju izvana ili o unutarnjem ozračenju, dakle onom koje nastaje kada je izvor tračenja progutan, udahnut ili je izvor zračenja implantiran u tijelo.

1.4.2. Patogeneza radijacijskih ozljeda

Stupanj oštećenja ionizirajućim zračenjem ovisi o vrsti ionizirajućeg zračenja, brzini zračenja, apsorbiranoj dozi, dakle bitna je količina energije i vrijeme u kojem i kojom brzinom prima jedinična masa neke tvari energiju zračenja. Učinak zračenja na stanicu ovisi o vrsti i mjestu oštećenja, vrsti i funkciji ozračene stanice i broju oštećenih stanica. Kada je

brzina primanja doze mala ili je doza primana tako da su razmaci između primljenih pojedinačnih doza dovoljno dugi, tkivo normalnom mitozom nadomješta izgubljene stanice. Visoke lokalne doze zračenja mogu zbog strukturnog oštećenja stanične membrane ili citoplazme izazvati izravnu smrt stanice. Kada je genetski kod stanice oštećen, a stanica preživjela, budući potomci tj. “kopije stanice” su tako promijenjene da se to može očitovati neoplastičnim rastom, kromosomskim aberacijama, aktivacijom onkogeni (podloga za nastanak leukemije ili limfomi), ili gubitkom supresorskih gena što dovodi do pojave solidnih tumora. Na tim mjestima nastaje tkivna hipoplazija ili se stanice tkiva zamijene fibrozim odnosno manje vrijednim tkivom. Relativno velike doze primljene kroz duže vremensko razdoblje mogu ostaviti male ili nikakve vidljive posljedice. Učinak zračenja na tijelo će biti to manji što je ozračeni dio tijela manji bez obzira na veličinu primljene doze.

Izloženost ionizirajućem zračenju može biti kronična i akutna. Kronična izloženost predstavlja kontinuiranu izloženost niskim dozama zračenja kroz dugi vremenski period, a učinci se mogu vidjeti nakon niza godina. Ti učinci uključuju genetske promjene, razvoj malignih i benignih tumora, razvoj katarakte i oštećenja kože.

1.4.3. Akutna radijacijska bolest

Akutna radijacijska bolest je oštećenje tkiva ili organa prekomjernom dozom ionizirajućeg zračenja u vrlo kratkom vremenskom periodu (sekunde ili minute). Ova bolest u početku liči prehladi i ima sva obilježja akutne febrilne bolesti. Uzrokovana je ozračenjem cijelog tijela (ili većeg dijela tijela) visokom dozom zračenja u vrlo kratkom vremenskom razdoblju tj. obično nekoliko minuta. Javlja se obično kod svih izloženih kada je akutna apsorbirana doza oko 1 Gy. Ovisno o razini ozračenja, tijek je predvidiv, a traje od nekoliko sati do nekoliko tjedana. Nema specifičnog liječenja, već se poduzimaju mjere za prevladavanje oštećenja pojedinih sustava, nadoknada tekućine i krvnih preparata, antibakterijske, gljivične i antivirusne zaštite od infekcije bakterijama, gljivama i virusima i potpore oporavka oštećenih organskih sustava. Ova bolest je u pravilu posljedica zračenja iz vanjskih izvora, a iznimno je posljedica ozračenja radionuklidima inkorporiranim u tijelu. Od apsorbirane doze ovisi i

klinička slika bolesti. Akutna radijacijska bolest je vrlo rijetka bolest koja obično u profesionalnoj ekspoziciji nastaje nakon nuklearnih nesreća na radu.

1.4.4. Kasni učinci zračenja

Javljaju se kliničkim simptomima mjesecima i godinama nakon izloženosti zračenju. Glavni su kasni učinci zamućenje i katarakta leće, kronični radiodermatitis, sterilitet, deformacije novorođenčadi ranije izloženih roditelja, usporenje rasta i fizičkog ili psihičkog razvoja djece, genetske promjene uključujući i fiksirane kromosomske aberacije te povećana incidencija pojedinih malignih bolesti.

Leća je vrlo osjetljiva na zračenje. Koagulacija proteina (opaciteti) se javlja već pri jednokratnoj apsorbiranoj dozi višoj od 2 Gy, iako su opisani i opaciteti kod jednokratne izloženosti od 0.5 Gy.

Opaciteti su zabilježeni i kod osoba koji su kronično bili izloženi dozi višoj od 0.1 Sv/godišnje kroz duži niz godina. Počinje kao plak u subkapsularnom stražnjem polu leće i širi se prema prednjem dijelu korteksa. Slične se promjene vide kod dijabetesa i infracrvenog zračenja. Dvije odvojene studije objavljene u 2010. godini utvrdile su da interventni kardiolozi imaju povećan relativni rizik od razvoja katarakte, a kumulativna efektivna doza bila je oko 6.0 Sv. Kod ostalih zdravstvenih radnika izloženih kumulativnoj efektivnoj dozi od 1.5 zabilježena je katarakta. Na temelju tih podataka, u 2011. godini Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) smanjila je prag za jednokratnu absorbiranu dozu za kataraktu sa 5,0 Gy na 0,50 Gy. Latentno razdoblje za nastanak promjena na leći iznosi više od 10 godina. Kronični radiodermatitis nastaje nakon radijacijske opekline. Karakterizira ga atrofična, suha koža, bez dlaka i kose, teleangiektazije i pigmentacije. Promjene uzrokuje akutna lokalna doza viša od 10 Gy ili prolongirana izloženost ukupnoj dozi višoj od 20 Gy. Kromosomske aberacije koje mogu perzistirati desetljećima posljedica su dijagnostičkih postupaka, akcidentalnih situacija i u linearnoj su ovisnosti s apsorbiranom dozom. U uvjetima profesionalne izloženosti, uz primjenu mjera zaštite na radu ne očekuju se kromosomske aberacije.

1.4.5. Ostali učinci zračenja

Do deformacija fetusa ili embrija može doći ako je u ranoj trudnoći zračena zdjelica majke. Kod visokih doza nerijetko se javljaju nakaznosti djece. Zaostali razvoj koštanog sustava zabilježen je kod djece izložene terapijskom zračenju ili kod one djece čije su majke bile u području izvođenja nuklearnih pokusa. To je vrlo bitno znati jer kod ozračenja embrija u ranom preembrionalnom razdoblju (0. do 3. tjedan) odnosno embrionalnom razdoblju (od 4. do 8. tjedna trudnoće) ili u fetalnom razdoblju (od 9. tjedna trudnoće do kraja trudnoće) može doći do malformacija djeteta. Iznimno, pri ozračenju u preembrionalnoj i embrionalnoj fazi može uništavanje nekih stanica u vrijeme razvoja pojedinih organa, ako embrij, a kasnije fetus preživi, izazvati teške kliničke slike kod novorođenčeta, a i kasnije u životu. Zato se učinci ozračenja embrija promatraju kao izdvojena kategorija. Ozračenje ploda u maternici može uzrokovati smrt djeteta, tjelesne deformacije, mentalnu zaostalost i pojavu raka. Ozračenje fetusa u periodu između 8. i 15. tjedna trudnoće dovodi do snižene inteligencije djece čije su majke bile ozračene u tom periodu. Teratogeni učinci opisani su već iznad praga od 0.01 Sv, ako je fetus bio ozračen u prvih 12 tjedana od začeća. Nacionalno vijeće za zaštitu od zračenja i mjerenja (NCRP) preporuča da fetus profesionalno izloženih majki ne dobije dozu veću od 5,0 mSv tijekom cijele trudnoće, da dnevna granica izlaganja ne prelazi 0.025 mSv, a da mjesečna ozračenost bude niža od 0,5 mSv. International Commission on Radiological Protection) – ICRP preporuča da 1,0 mSv bude ukupna fetalna izloženost tijekom cijele trudnoće. U cjelini, prema preporukama ICRP granice su ostvarive uz odgovarajuće mjere zaštite na radnom mjestu. (11)

1.5. Načela zaštite od ionizirajućeg zračenja: opravdanost, optimizacija i ograničenje ozračenja

Tri su osnovna načela zaštite od ionizirajućeg zračenja: opravdanost, optimizacija i ograničenje ozračenja. Svi koji koriste izvore ionizirajućeg zračenja obvezni su mjerama

radiološke sigurnosti osigurati provedbu načela opravdanosti, optimizacije i ograničenja ozračenja.

Načelo opravdanosti u odnosu na djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, odnosno nuklearnih djelatnosti ostvaruje se ako djelatnost koja uključuje ozračenje ljudi daje korist izloženim pojedincima ili društvu koja je u svim okolnostima veća od štetnosti zbog izlaganja ionizirajućem zračenju, uvažavajući gospodarske, socijalne i druge čimbenike. Načelo opravdanosti u odnosu na intervencije postiže se tako da svaka intervencija mora ublažiti posljedice izvanrednoga događaja, a posebno smanjiti izlaganje ljudi ionizirajućem zračenju zbog izvanrednog događaja.

Načelo optimizacije zaštite od ionizirajućeg zračenja u odnosu na djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, odnosno nuklearnih djelatnosti ostvaruje se provedbom mjera zaštite kojima se izlaganje radnika i drugih osoba ionizirajućem zračenju od svih djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearnih djelatnosti i svih izvora ionizirajućeg zračenja smanjuje toliko nisko koliko je razumno moguće unutar propisanih granica, uvažavajući tehničke, organizacijske, gospodarske, zdravstvene i socijalne čimbenike. Načelo optimizacije u odnosu na intervencije ostvaruje se tako da provedba, opseg i trajanje svake intervencije mora postići najveći razumno moguć pozitivan učinak.

Načelo ograničenja ozračenja provodi se tako da izloženost pojedinca od djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, odnosno nuklearne djelatnosti mora biti ograničena, a primijenjene mjere radiološke i nuklearne sigurnosti moraju osigurati da izlaganje osoba ionizirajućem zračenju neće prijeći utvrđene granice.

Granice ozračenja propisane su Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja NN 38/2018: (12)

Granice ozračenja za izložene radnike

Članak 4.

(1) Efektivna doza izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini.

(2) Uz uvjet iz stavka 1. ovoga članka primjenjuju se sljedeće granice za ekvivalentnu dozu izloženih radnika:

- 1. ekvivalentna doza za leću oka izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini ili od 100 mSv u bilo kojih pet uzastopnih godina pri čemu maksimalna ekvivalentna doza za leću oka u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja ne smije biti viša od 50 mSv*
- 2. ekvivalentna doza za kožu izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini usrednjena preko 1 cm² površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena*
- 3. ekvivalentna doza za ekstremitete izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini.*
- (3) Granice ozračenja za izložene radnike primjenjuje se na zbroj godišnjih profesionalnih ozračenja od svih djelatnosti i aktivnosti za koje je ishodeno odobrenje za obavljanje djelatnosti ili rješenje o registraciji, profesionalnog ozračenja radnom na radnim mjestima koje zahtijeva obavijest o namjeri i drugim profesionalnim ozračenjem u situacijama postojećeg ozračenja koje podliježu uvjetima postojećeg ozračenja.*
- (4) U posebnim okolnostima ili u određenim situacijama ozračenja navedenim u članku 7. stavku 8. ovoga Pravilnika, ministar unutarnjih poslova (u daljnjem tekstu: ministar) može odobriti višu granicu ozračenja za efektivnu dozu od one navedene u stavku 1. ovoga članka, a koja će u godini dana iznositi najviše 50 mSv pod uvjetom da prosječno godišnje ozračenje tijekom pet uzastopnih godina, uključujući i godine u kojoj je granica ozračenja navedena u stavku 1. ovoga članka prekoračena, ne bude više od 20 mSv.*
- (5) U planiranim ozračenjima ukupna godišnja vrijednost efektivne ili ekvivalentnih doza izloženog radnika iz stavka 1. i stavka 2. ovoga članka ne smije prijeći vrijednosti propisane u stavku 1. i stavku 2. ovoga članka.*

Propisane granice vidljive iz pravilnika su sljedeće:

Za izložene radnike:

- efektivna doza izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima tijekom rada biti veća od 100mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, uz uvjet da niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza ne smije biti veća od 50 mSv
- ekvivalentna doza za očne leće izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima rada biti veća od 150 mSv u jednoj godini

- ekvivalentna doza za podlaktice, šake, stopala ili kožu izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima rada biti veća od 500 mSv u jednoj godini, usrednjena preko 1cm² površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o dijelu kože koji je ozračen

Za osobe mlađe od 18 godina, ali starije od 16 godina, koje se obučavaju ili obrazuju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja tijekom obučavanja ili obrazovanja:

- efektivna doza do 6 mSv u jednoj godini,
- ekvivalentna doza za očne leće do 50 mSv u jednoj godini,
- ekvivalentna doza za podlaktice, šake, gležnjeve, stopala i kožu, usrednjena preko 1cm² površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena, do 150 mSv u jednoj godini

Za pojedinog stanovnika:

- Efektivna doza u jednoj godini ne smije biti veća od 1 mSv od svih izvora ionizirajućeg zračenja koji su uključeni u djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (u posebnim okolnostima, efektivna doza pojedinog stanovnika u jednoj godini smije biti do 5 mSv u jednoj godini s tim da u pet uzastopnih godina prosječna efektivna doza ne smije biti veća od 1 mSv godišnje)
- ekvivalentna doza za očne leće ne smije biti veća od 15 mSv u jednoj godini
- ekvivalentna doza za kožu ne smije biti veća od 50 mSv u jednoj godini, usrednjena preko 1cm² površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena

Pojedina djelatnost s izvorima ionizirajućeg zračenja mora biti optimizirana tako da efektivna doza pojedinog stanovnika od te djelatnosti u godini dana ne bude veća od 0.3 mSv (ovo je preporučena granica ozračenja za pojedinog stanovnika, enlg. dose constraint).

Granice ozračenja ne odnose se na medicinsko ozračenje!

Nakon što izložena radnica ili osoba koja se obučava ili obrazuje za rad u području izloženosti nositelja odobrenja, odnosno korisnika obavijesti o svojoj trudnoći, isti je obvezan izloženoj radnici osigurati uvjete rada takve da ekvivalentna doza za plod bude toliko niska koliko je to razumno moguće postići, s minimalnom vjerojatnosti da ekvivalentna doza do kraja trudnoće dosegne 1 mSv.

1.5.1. Medicinsko ozračenje, profesionalno ozračenje i ozračenje stanovništva

Ozračenje, definirano kao izlaganje ionizirajućem zračenju, osim na unutarnje i vanjsko, dijeli se i na medicinsko ozračenje, profesionalno ozračenje i ozračenje stanovništva.

Pod profesionalnim ozračenjem smatra se ozračenje radnika koji su izloženi radnici, u okviru njihovog radnog mjesta.

Izloženi radnik jest osoba za koju postoji vjerojatnost da tijekom obavljanja djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja ili nuklearne djelatnosti bude ozračena iznad granica ozračenja propisanih za pojedinog stanovnika, odnosno za koju postoji vjerojatnost da zbog prirode svoga posla u godini dana primi dozu veću od 1 mSv.

Medicinskim ozračenjem smatra se ozračenje sljedećih osoba:

- osoba izloženih ionizirajućem zračenju tijekom primjene izvora ionizirajućeg zračenja u dijagnostičke ili terapijske svrhe,
- osoba ozračenih u sklopu zdravstvenog pregleda za radno mjesto,
- osoba ozračenih u sklopu sustavnog pregleda (tzv. screeninga),
- osoba koje dragovoljno sudjeluju u medicinskim i biomedicinskim, dijagnostičkim ili terapijskim, istraživačkim programima koji uključuju uporabu izvora ionizirajućeg zračenja,
- osoba ozračenih u sklopu medicinsko-pravnih postupaka te osoba koje svjesno i dragovoljno pridržavaju i pomažu pacijentima tijekom dijagnostičkih ili intervencijskih pregleda ili postupaka u medicini i dentalnoj medicini uporabom izvora ionizirajućeg zračenja.

Ozračenje izloženog radnika u trenutku kad postaje jedna od gore navedenih osoba, iz profesionalnog prelazi u medicinsko ozračenje. Izloženi radnik u okviru svog radnog mjesta ne smije pridržavati nepokretne pacijente tijekom provedbe dijagnostičkog pregleda ili postupka uporabom rendgenskog uređaja.

Ozračenje pojedinca, odnosno pojedinog stanovnika smatra se svako ono ozračenje koje nije profesionalno ili medicinsko kao posljedica obavljanja raznih djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja.

1.5.2. Propisi kojima je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja

Zaštita od ionizirajućeg zračenja u Republici Hrvatskoj počiva na sljedećim važnim zakonima: (13)

1. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti ("Narodne novine" broj 141/13, 39/15, 130/17, 118/18)

2. Zakon o prijevozu opasnih tvari ("Narodne novine" broj 79/07)

Prema odredbama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti ("Narodne novine" broj 141/13, 39/15) (dalje u tekstu: Zakon), tijelo državne uprave nadležno za poslove zaštite od ionizirajućeg zračenja, nuklearnu sigurnost i inspekcijski nadzor nad provedbom odredbi Zakona i propisa donesenih temeljem njega jest Ministarstvo unutarnjih poslova, Ravnateljstvo civilne zaštite.

Zakon je izrađen u skladu sa sljedećim EU direktivama:

- Direktivom Vijeća br. 89/618/Euratom od 27. studenoga 1989. o obavješćivanju stanovništva o mjerama zdravstvene zaštite koje treba primijeniti i koracima koje treba poduzeti u slučaju radiološke opasnosti (SL L 357, 7.12.1989.),
- Direktivom Vijeća br. 90/641/Euratom od 4. prosinca 1990. o operativnoj zaštiti vanjskih radnika, koji su tijekom svoga djelovanja u područjima pod nadzorom izloženi opasnosti od ionizirajućeg zračenja (SL L 349, 13.12.1990.),
- Direktivom Vijeća br. 96/29/Euratom od 13. svibnja 1996. o utvrđivanju osnovnih sigurnosnih normi za zaštitu zdravlja radnika i stanovništva od opasnosti od ionizirajućeg zračenja (SL L 159, 29.6.1996.),
- Direktivom Vijeća br. 97/43/Euratom od 30. lipnja 1997. o zdravstvenoj zaštiti pojedinaca od opasnosti od ionizirajućeg zračenja u odnosu na medicinska izlaganja, kojom se ukida Direktiva 84/466/Euratom (SL L 180, 9.7.1997.),
- Direktivom Vijeća br. 2003/122/Euratom od 22. prosinca 2003. o kontroli visokoaktivnih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora bez posjednika (SL L 346, 31.12.2003.),

- Direktivom Vijeća br. 2006/117/Euratom od 20. studenoga 2006. o nadzoru i kontroli pošiljaka radioaktivnog otpada i istrošenog goriva (SL L 337, 5.12.2006.),
- Direktivom Vijeća br. 2009/71/Euratom od 25. lipnja 2009. o uspostavi okvira Zajednice za nuklearnu sigurnost nuklearnih postrojenja (SL L 172, 2.7.2009.),
- Direktivom Vijeća br. 2011/70/Euratom od 19. srpnja 2011. o uspostavi okvira Zajednice za odgovorno i sigurno zbrinjavanje istrošenog goriva i radioaktivnog otpada (SL L 199, 2.8.2011.) te standardom Safety Standards Series No. GSR Part 3, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards kojeg je izdala Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA).

Osim Zakonom, zaštita od ionizirajućeg zračenja regulirana je i sljedećim podzakonskim aktima donesenim na temelju tog zakona:

- Pravilnik o službenoj iskaznici i znački inspektora za radiološku i nuklearnu sigurnost (NN 28/11)
- Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja i primjenu mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja (NN 97/15)
- Pravilnik o ovlašćivanju stručnih tehničkih servisa za obavljanje stručnih poslova zaštite od ionizirajućeg zračenja (NN 72/11)
- Pravilnik o fizičkom osiguranju radioaktivnih izvora, nuklearnog materijala i nuklearnih objekata (NN 38/12)
- Pravilnik o mjerenju osobnog ozračenja, ispitivanju izvora ionizirajućeg zračenja i uvjeta rada te o izvješćima i očevidnicima (NN 41/12, 89/13)
- Pravilnik o odobrenjima i dozvolama za uporabu i promet izvora ionizirajućeg zračenja (NN 71/12, 89/13)
- Pravilnik o opsegu i sadržaju plana i programa mjera za slučaj izvanrednog događaja te izvješćivanja javnosti i nadležnih tijela (123/12)
- Pravilnik o nadzoru i kontroli prekograničnog prijevoza radioaktivnog otpada i istrošenog goriva (NN 11/13)
- Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima (NN 41/13)

- Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s električnim uređajima koji proizvode ionizirajuće zračenje (NN 41/13)
- Pravilnik o uvjetima i načinu izdavanja i oduzimanja odobrenja za ambalažu za prijevoz radioaktivnih i nuklearnih materijala (42/13)
- Pravilnik o granicama ozračenja (NN 59/13)
- Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 80/13)
- Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u medicini i dentalnoj medicini (NN 89/13)
- Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu (NN 121/13)
- Pravilnik o načinu i postupku nadzora prilikom uvoza ili izvoza materijala za koji postoji opravdana sumnja da je onečišćen radionuklidima ili sadrži radioaktivne izvore (NN 114/07)
- Pravilnik o načinu uklanjanja radioaktivnog onečišćenja, zbrinjavanja radioaktivnog izvora, odnosno poduzimanja svih drugih prijeko potrebnih mjera radi smanjenja štete za ljude i okoliš ili uklanjanja daljnjih rizika, opasnosti ili šteta (NN 53/08)
- Pravilnik o uvjetima za projektiranje, gradnju te uklanjanje građevina u kojima su smješteni izvori ionizirajućeg zračenja ili se obavljaju djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN99/08)
- Pravilnik o visini naknada, vrstama i visini dodatnih troškova te načinu plaćanja za poslove koje obavlja državni zavod za zaštitu od zračenja (NN 89/09)
- Uredba o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja koji se ne namjeravaju dalje koristiti (NN44/08)
- Uredba o mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja te intervencija u slučaju izvanrednog događaja (NN 102/12).

1.5.3. Dozimetrijski nadzor izloženih radnika

Pod dozimetrijskim nadzorom podrazumijeva se mjerenje osobnog ozračenja, odnosno procjenjivanje efektivne doze. Stupanj osobnog ozračenja mjeri se osobnim dozimetrima za mjerenje vanjskog ozračenja (obvezno filmdozimetrima ili termoluminiscentnim dozimetrima (TLD), a po potrebi i drugim dodatnim osobnim dozimetrima uz izravno ili odgođeno očitavanje primljene doze) te provjerom razine zračenja na radnim mjestima i stupnja radioaktivnog onečišćenja osoba ili radnog okoliša i drugim ispitivanjima.

Na temelju rezultata mjerenja dobivenih osobnim dozimetrom procjenjuje se efektivna doza za cijelo tijelo i upisuje se u osobni dozimetrijski karton za svakog izloženog radnika koji se vodi u Ministarstvu unutarnjih poslova, Ravnateljstvu civilne zaštite.

Stupanj izloženosti vanjskom ozračenju izloženih radnika obvezno se mjeri osobnim dozimetrima u dvanaest mjernih razdoblja godišnje. (14)

Pod dozimetrijskim nadzorom moraju biti:

- izloženi radnici i
- osobe koje se obučavaju ili obrazuju za rad u području izloženosti.

Osobe koje rukuju izvorima ionizirajućeg zračenja, a ne smatraju se izloženim radnicima ne moraju biti pod dozimetrijskim nadzorom. Nositelj odobrenja je u tom slučaju obavezan od ovlaštenog stručnog tehničkog servisa ishoditi mišljenje da radno mjesto radnika nije u području izloženosti.

Kategorizacija izloženih radnika (12)

Članak 19.

(1) Nositelj odobrenja ili vanjski izvođač mora osigurati provođenje kategorizacije svojih izloženih radnika, u cilju praćenja i nadzora, prema slijedećem kriteriju:

1. izloženi radnici kategorije A su radnici koji bi mogli u jednoj godini primiti:

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

2. izloženi radnici kategorije B su radnici koji nisu klasificirani kao radnici kategorije A.

Procjena efektivne i ekvivalentne doze (12)

Članak 12.

(1) Za procjenu efektivne i ekvivalentne doze moraju se koristiti odgovarajuće standardne vrijednosti i odnosi.

(2) U posebnim slučajevima fizikalno-kemijskih svojstava radionuklida ili drugih obilježja situacije izlaganja ili izloženog pojedinca može se odobriti korištenje posebnih metoda.

(3) Za procjenu izloženosti od vanjskog ozračenja moraju se koristiti operativne dozne veličine:

1. za nadzor prostora:

– ambijentalni dozni ekvivalent $H^(10)$ za procjenu efektivne doze*

– dozni ekvivalent smjera $H'(0,07,\Omega)$ za procjenu ekvivalentne doze za kožu i ekstremitete

– dozni ekvivalent smjera $H'(3, \Omega)$ za procjenu ekvivalentne doze za leću oka

2. za osobni nadzor:

– osobni dozni ekvivalent $H_p(10)$ za procjenu efektivne doze

– osobni dozni ekvivalent $H_p(0,07)$ za procjenu ekvivalentne doze za kožu i ekstremitete

– osobni dozni ekvivalent $H_p(3)$ za procjenu ekvivalentne doze za leću oka.

(4) Vrijednosti težinskih koeficijenata w_R za pojedinu vrstu ionizirajućeg zračenja sadržane su u Tablici 1. A. Priloga I. koji je sastavni dio ovoga Pravilnika.

(5) Vrijednosti težinskog koeficijenta w_T tkiva ili organa T sadržane su u Tablici 1. B. Priloga I. koji je sastavni dio ovoga Pravilnika.

Obvezno mjerenje osobnih doza provode stručni tehnički servisi koji su ovlašteni za mjerenje osobnog vanjskog ozračenja izloženih radnika ili osoba koje se obučavaju ili obrazuju za rad u području izloženosti.

Prijava za dozimetrijski nadzor vrši se putem popunjenog i ovjerenog obrasca DOZ koji se dostavlja Ministarstvu unutarnjih poslova, Ravnateljstvu civilne zaštite.

Obrascu DOZ potrebno je priložiti:

- dokaz o posjedovanju posebnog stručnog obrazovanja o primjeni mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja,

- dokaz o posjedovanju posebnog stručnog obrazovanja za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja,
- presliku ocjene zdravstvene sposobnosti.

U slučaju da se za dozimetrijski nadzor prijavljuje radnik koji će prevoziti radioaktivne izvore, obrascu se uz navedeno prilaže i potvrda o stručnoj osposobljenosti za prijevoz radioaktivnih izvora. Potvrdu o stručnoj osposobljenosti za prijevoz radioaktivnih izvora radnici dobivaju po završenom programu stručne obuke od strane ustanove koju je za to ovlastilo ministarstvo nadležno za obrazovanje, prema Zakonu o prijevozu opasnih tvari.

Dokazom o tome da radnik udovoljava posebnim zdravstvenim uvjetima za rad u području izloženosti smatra se svjedodžba o zdravstvenoj sposobnosti izdana od strane zdravstvene ustanove koja obavlja djelatnost medicine rada, trgovačkog društva koje obavlja djelatnost medicine rada ili privatne ordinacije medicine rada koju je za provjeru zdravstvene sposobnosti izloženih radnika ovlastio ministar nadležan za zdravstvo. Svjedodžba o zdravstvenoj sposobnosti ne smije biti starija od godine dana za izložene radnike koji rade u području posebnog nadgledanja, odnosno dvije godine za izložene radnike koji rade u području nadgledanja.

U slučaju da obrazac DOZ nije popunjen ili nije ovjeren žigom i potpisom ili ako nedostaje neki od dokumenata koje je obrascu potrebno priložiti, upis radnika u središnji registar neće biti izvršen, odnosno radnik neće biti prijavljen za dozimetrijski nadzor.

Osobni dozimetar za utvrđivanje efektivne doze za cijelo tijelo, bez obzira na vrstu, obvezno se nosi na lijevoj strani prsiju, a ako se nosi zaštitna pregača, ispod zaštitne pregače.

Ako izloženi radnik uz obvezne osobne dozimetre nosi i dodatne dozimetre zbog naravi posla koji obavlja: iznad zaštitne odjeće, sa stražnje strane tijela, na ruci, blizu očiju i slično, podaci o primljenim dozama na tim mjestima mjerenja, unose se u osobni karton primljenih doza uz napomenu na kojem mjestu su nošeni.

Dozimetrijski karton sadrži podatke o osobnom ozračenju svakog radnika.

Zahtjev za uvid u dozimetrijski karton izloženog radnika, odnosno za davanje izvoda iz dozimetrijskog kartona može podnijeti izloženi radnik osobno ili osoba odgovorna za zaštitu od ionizirajućeg zračenja u nositelju odobrenja koji je poslodavac tog izloženog radnika.

Nošene dozimetre osoba odgovorna za zaštitu od ionizirajućeg zračenja (koju je sukladno Zakonu imenovao nositelj odobrenja) mora dostaviti ovlaštenom stručnom tehničkom servisu koji provodi osobnu dozimetriju najkasnije petnaest dana poslije isteka prethodnog mjernog razdoblja (tj. do 15. u mjesecu).

Ako izloženi radnik kod istog poslodavca radi na više radnih mjesta koja su u području izloženosti, na svim radnim mjestima koja su u području izloženosti obvezan je nositi isti osobni dozimeter.

Ako izloženi radnik radi u području izloženosti dva ili više poslodavca, svaki od njih mora mu osigurati poseban osobni dozimeter. U središnjem registru osigurava se zbrajanje primljenih doza za tog radnika za određeno vremensko razdoblje.

Ako izloženi radnik izgubi ili ošteti osobni dozimeter ili se i nakon tri mjeseca od isteka roka za povrat dozimeter ne vrati ovlaštenom stručnom tehničkom servisu za osobnu dozimetriju, za predmetno razdoblje mjerenja u osobni karton primljenih doza upisat će se da nije bilo moguće procijeniti efektivnu dozu.

U slučaju da se dozimeter izgubi ili ošteti, potrebno je o tome u pisanom obliku obavijestiti ovlašteni stručni tehnički servis.

Odjava s dozimetrijskog nadzora vrši se putem popunjenog i ovjerenog obrasca DOZ. Radnika se s dozimetrijskog nadzora može odjaviti i putem dopisa u kojem se uz ime i prezime radnika i njegovog radnog mjesta obvezno navodi i radnikov OIB.

U slučaju da obrazac DOZ nije popunjen ili nije ovjeren žigom i potpisom, odnosno ako dopis ne sadrži sve potrebne podatke ili nije ovjeren žigom i potpisom, radnik neće biti objavljen s dozimetrijskog nadzora.

Stupanj izloženosti unutarnjem ozračenju kod izloženih radnika koji rade s otvorenim radioaktivnim izvorima, određuje se jednom godišnje izravnim mjerenjem radioaktivnosti u cijelom tijelu ili u kritičnim organima, neizravnim procjenom temeljem mjerenja koncentracije radionuklida u biološkim uzorcima ili proračunom očekivane efektivne doze od unošenja radionuklida u organizam iz radnog okoliša u kojem je mjerenjem utvrđena koncentracija radionuklida i na drugi način kojim se mogu osigurati vjerodostojni rezultati. Stupanj izloženosti unutarnjem ozračenju određuje se proračunom efektivne doze i upisuje u osobni karton primljenih doza izloženog radnika koji radi s otvorenim radioaktivnim

izvorima uz napomenu da se radi o unutarnjem ozračenju i načinu na koji je doza procijenjena.

Stupanj izloženosti unutarnjem ozračenju provode stručni tehnički servisi ovlašteni za mjerenje osobnog unutarnjeg ozračenja izloženih radnika ili osoba koje se obučavaju ili obrazuju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja.

1.6. Osobna dozimetrija

Sastavni dio programa zaštite od ionizirajućeg zračenja je osobni dozimetrijski nadzor profesionalno izloženih osoba. Osobni dozimetrijski nadzor podrazumijeva procjenu efektivne doze ili ekvivalentne doze za leću oka, kožu ili ekstremitete koju je primio pojedinac – izloženi radnik od ionizirajućeg zračenja, a na temelju individualnih mjerenja pomoću uređaja koji taj pojedinac nosi na svom tijelu. Ti uređaji nazivaju se osobni dozimetri. Ciljevi provedbe osobne dozimetrije su:

- kontrola profesionalne izloženosti kako bi se mogli osigurati sigurni i zadovoljavajući radni uvjeti,
- primjena ALARA načela te potvrđivanje usklađenosti s granicama doze,
- obavješćavanje radnika o njihovoj izloženosti zračenju,
- provođenje kontrole i analize raspodjele doza unutar grupa izloženih radnika,
- epidemiološka istraživanja utjecaja ionizirajućeg zračenja,
- potvrda provođenja načela zaštite od zračenja.

Osobni dozimetri su uređaji kojima se mjeri apsorbirana doza primljena od strane pojedinca koji nosi taj mjerni uređaj na svom tijelu. Pomoću izmjerenih vrijednosti procjenjuju se ekvivalentna i efektivna doza. Postoje aktivni i pasivni osobni dozimetri.

Aktivni su oni koji u sebi imaju baterijsko napajanje i mjere brzinu doze, dok pasivni mjere kumulativnu efektivnu dozu u određenom vremenskom razdoblju. Ovoj skupini dozimetara pripadaju npr. film-dozimetri, termoluminiscentni dozimetri (TLD) te dozimetri na bazi optički stimulirane luminiscencije (OSL). Aktivni dozimetri prikazani su na slici 7, a pasivni dozimetri na slikama 8, 9 i 10. (5, 6)



Slika 7. Aktivni elektronički dozimetri
(Izvor: Glavak L.) (5)



Slika 8. Film dozimetar
(Izvor: Glavak L.) (5)



Slika 9. Termoluminiscentni dozimetar

(Izvor: Glavak L.) (5)



Slika 10. Dozimetar na bazi optički stimulirane luminiscencije

(Izvor: Glavak L.) (5)

Nakon provedbe mjerenja provodi se procjena efektivne ili ekvivalentne doze primjenom prikladnih matematičkih modela ovisno o načinu izloženosti i korištenim zaštitnim sredstvima.



Slika 11. Način nošenja TLD dozimetra Hp 10 i elektronskog dozimetra Hp 7

(Izvor: Miličević G.)

1.6.1. TL dozimetri – građa i princip rada

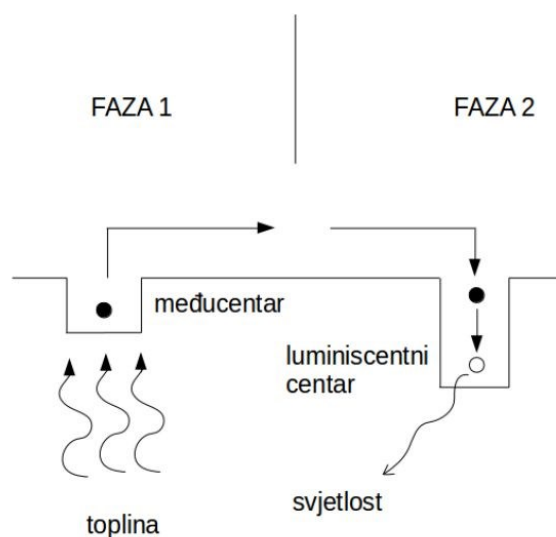
Za zakonsku rutinsku osobnu dozimetriju u Republici Hrvatskoj trenutno se koriste termoluminiscentni dozimetri, TLD. Princip rada TL dozimetara zasniva se na termoluminiscenciji.

Luminiscencija je svaka produkcija svjetlosti uvjetovana prethodnim pobuđenjem atoma ili molekula. Javlja se kod izolatora i poluvodiča koji sadrže nečistoće i defekte. Kod čistih izolatora valentna vrpca je gotovo puna, a vodljiva vrpca je gotovo prazna. Prostor koji razdvaja te dvije vrpce se naziva zabranjen prostor odnosno gap. U tom prostoru nema dopuštenih elektronskih energetske nivoa, ali elektroni mogu prelaziti iz valentne u vodljivu vrpce. Prelaskom elektrona iz vodljive u valentnu vrpce nastaju slobodni elektroni te se ostavljaju slobodne šupljine. (5)

Prisustvo defekata i nečistoća u materijalu u zabranjenom prostoru između valentne i vodljive vrpce može prouzrokovati stvaranje novih, lokaliziranih energetske nivoa.

Priroda defekata i matične rešetke određuje položaj tih lokaliziranih energetske nivoa. Neki od tih nivoa mogu postati međuentri uhvata elektrona ili šupljina odnosno traps (eng.). To se događa ukoliko neki od tih nivoa uhvate elektron ili šupljinu.

Osim međuentara uhvata postoje još i luminiscentni centri. Prilikom izlaganja takvog materijala ionizirajućem zračenju dolazi do redistribucije naboja u materijalu. Apsorbirana energija u kristalnoj rešetki se pohranjuje u obliku elektrona i šupljina uhvaćenih u međuentre uhvata i luminiscentne centre. Ukoliko je luminiscencija izazvana grijanjem odnosno termalnim pobuđenjem onda se radi o termoluminiscenciji (TL). Na slici 12 prikazan je shematski prikaz luminiscencije. (5)



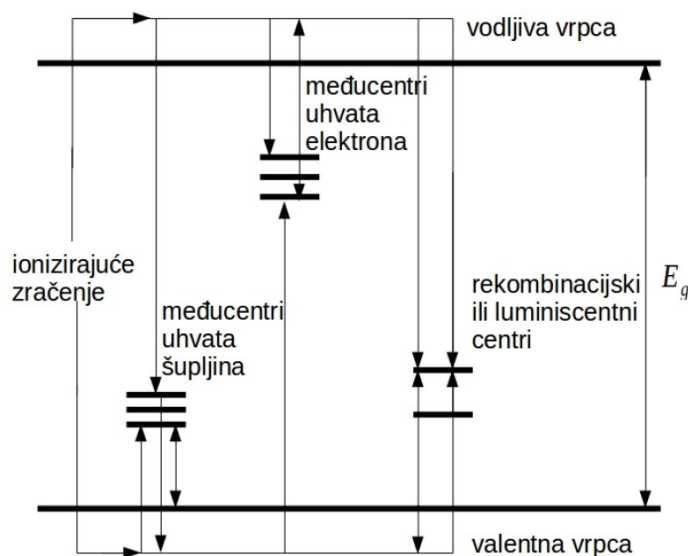
Slika 12. Shematski prikaz luminiscencije

(Izvor: Glavak L.) (5)

Ovakvi materijali su pogodni za dozimetriju jer je količina uhvaćenih elektrona proporcionalna apsorbiranom zračenju. U slučaju termoluminiscencije, vanjska stimulacija za oslobađanje elektrona je zagrijavanje. TL dozimetri su izrađeni od materijala koji se prilikom izlaganja zračenju zagrijava te emitira svjetlost. Ta svjetlost se može mjeriti i detektirati pomoću specijalnog čitača. Prilikom apsorpcije zračenja dolazi do pobuđivanja elektrona u atomu. Zatim dolazi do zagrijavanja te se tada atomi vraćaju u prvobitno stanje

(relaksacija). Ovaj proces je popraćen emisijom vidljive svjetlosti. Rekombinacijom elektrona i šupljina oslobada se energija u obliku svjetlosti. (5)

Materijal je nakon ovog procesa vraćen u prvobitno stanje u kakvom je bio prije primanja ionizirajućeg zračenja jer sada sadrži manje nesparenih elektrona i šupljina u centrima. Proces termoluminiscencije je prikazan na slici 13.



Slika 13. Shematski prikaz termoluminiscencije

(Izvor: Glavak L.) (5)

Tijekom očitavanja TL dozimetara, materijal se zagrijava kontrolirano s konstantnim prirastom temperature koji je proporcionalan vremenu proteklom od početka zagrijavanja. Pomoću fotomultiplikatora se tijekom mjerenja prima, bilježi i pojačava svaki nastali svjetlosni signal odnosno termoluminiscencija. Grafički prikaz zabilježenog TL intenziteta u ovisnosti o vremenu ujedno je i prikaz ovisnosti TL intenziteta o temperaturi zagrijavanja. To se naziva krivulja isijanja (glow curve). Oblik krivulje isijanja ovisi o vrsti i količini nečistoća i defekata kristalne rešetke koji su prisutni u materijalu te o tretiranju materijala i termalnoj povijesti. Površina ispod krivulje isijanja je mjera primljene doze. Postupkom umjeravanja TLD čitača dobiva se odnos između te površine i primljene doze.

Upotreba TL dozimetara je raširena te se trenutno smatraju jednim od najpouzdanijih osobnih dozimetara na tržištu. Osnovne prednosti TL dozimetara su:

- pasivni su (za korištenje nije potrebna baterija)
- očitana doza načelno ne ovisi o energiji zračenja (isti dozimetar može mjeriti doze od zračenja niskih do zračenja visokih energija)
- tkivno su ekvivalentni (efektivni maseni broj materijala je približan efektivnom masenom broju tkiva)
- imaju relativno nizak prag očitavanja doze

Međutim, postoje i nedostaci TL dozimetara poput visoke cijene dozimetara i čitača te osjetljivosti na temperaturu. TL dozimetri se koriste za mjerenje fotonskog ili fotonsko/elektronskog zračenja za određivanje HP (10) i HP (0,07). Također, osim podataka o HP (10), ovi dozimetri mogu dati indicaciju o energiji zračenja te o prisutnosti drugih tipova zračenja osim fotonskog.

Termoluminiscentni dozimetri s jednim elementom uobičajeno se koriste kod dozimetrije ekstremiteta, najčešće ruku. Stavljaju se na prst koji je najizloženiji zračenju u smjeru prema izvoru zračenja.

1.6.2. Mjerenje Hp(0,07) prsten dozimetrima

Mjerenje Hp(0,07) prsten dozimetrima provedeno je prema metodi ME-608-003. Metoda određivanja Hp(0,07) korištenjem termoluminiscentnih dozimetara koja se koristi u Jedinici za dozimetriju zračenja i radiobiologiju Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb.

Za provedbu osobne dozimetrije koriste se TL dozimetri tipa Panasonic UD-807ATN koji sadrže 1 element. Serijski broj TL elementa ugraviran je s njegove prednje strane kao što se vidi na slici 14.



Slika 14. Prsten dozimetar

(Izvor: Glavak L.) (5)

Ovisno o načinu rada i potrebama korisnik odlučuje se o položaju nošenja prsten dozimetra (izbor prsta, ruke i orijentacija dozimetra) te se isto u formi dopisa preporučuje korisniku.

TL dozimetri su osjetljivi na izlaganje znatno promijenjenim uvjetima okoliša.

Stoga je potrebno spriječiti izlaganje dozimetara sunčevoj svjetlosti, prekomjernoj vlazi te grijačim i rasvjetnim tijelima.

Osim kad su u procesu obrade, u cilju smanjenja izlaganja atmosferskim uvjetima i prašini, dozimetri su pohranjeni u spremnicima u ladicama radnog stola TLD čitača. U laboratoriju za TL dozimetriju uvjeti smještaja, s obzirom na temperaturu i vlagu, TL dozimetara

zadovoljavaju zahtjeve proizvođača tako da nije potrebno provoditi dodatna praćenja uvjeta vlage i temperature. (5)

Unatoč trudu proizvođača da svi TL elementi budu uniformno jednake kvalitete uz jednaku osjetljivost, to je često nemoguće postići. Metoda korištenjem Element Correction Factors (ECFs) osigurava da će ECF-ovi osobnih dozimetara biti normalizirani na osjetljivost referentnih dozimetara te se izbjegava utjecaj promjena u kalibraciji TLD čitača.

Prije početka korištenja TL dozimetara potrebno je odrediti njihove ECF-ove. Tek nakon određivanja ECF-ova za svaki pojedini dozimetar oni se mogu koristiti kao osobni dozimetri i slati korisniku. Za sve dozimetre korištene u ovom radu određeni su ECF-ovi te korišteni pri izračunu $H_p(0,07)$.

TL dozimetrima tipa Panasonic UD-807ATN rukuje se pomoću pincete s kojom se TL element vadi iz kutijice i umeće u prsten. Po povratku dozimetara od kupca skida se zaštitna kapica s prstena te se pomoću pincete TL element umeće u posebni nosač UD-807HA2 za očitavanje u TLD čitaču. Isti nosač se koristi za ozračivanje dozimetara za potrebe relativne kalibracije u TL iradijatoru. Iznimno je važno da se u slučaju vađenja TL elementa prstima ne dodiruje površina TL elemenata jer je u protivnom moguće unijeti nečistoće i eventualno mehanički oštetiti TL element. (5)

Čitač TL dozimetara je u Sekundarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju (SSDL) umjeren za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$ pa za mjerenje $H_p(0,07)$ treba primijeniti kalibracijski faktor dobiven umjeravanjem u SSDL-u. Broj referentnih dozimetara za mjerenje $H_p(0,07)$ (5 kom) se ozračuje u referentnim uvjetima u SSDL-u na "rod" fantomu.

Dozimetri se očitavaju nakon 24h, a za umjeravanje se koristi srednja vrijednost ECF korigiranog očitavanja dozimetara.

Umjeravanje se provodi računanjem kalibracijskog faktora k za TLD čitač za $H_p(0,07)$ kojim se množi doza očitana na TLD čitaču (a koji je umjeren za $H_p(10)$).

Dozimetri se šalju korisniku pakirani u plastične zaštitne vrećice s oznakom imena i perioda nošenja kako bi se smanjila mogućnost zamjene dozimetra odnosno dodjeljivanje pojedinog dozimetra krivoj osobi.

Mjerni period je jedan kalendarski mjesec. Nadalje, svaki mjesec boja prsten nosača je drugačija čime se izbjegava vraćanje upravo pristiglog dozimetra, umjesto nošenog, u dozimetrijski servis.

Po povratku dozimetara provodi se provjera radioaktivnog onečišćenja dozimetara kako bi se spriječilo radioaktivno onečišćenje laboratorija, osobe koja rukuje dozimetrima te onečišćenje TL čitača. U slučaju da se pronađe radioaktivno onečišćeni dozimetar, takav dozimetar prolazi proces identifikacije izvora radioaktivne kontaminacije, uklanjanja kontaminacije, no ne očitava se jer radioaktivna kontaminacija utječe na vrijednost doze koja je zabilježena na dozimetru, a koja ne odgovara stvarnoj dozi koju ju osoba koja nosi dozimetar primila.

Po provedenoj provjeri radioaktivnog onečišćenja provodi se očitavanje dozimetara te izračun vrijednosti $H_p(0,07)$ pojedinog dozimetra uporabom dozimetrijskog računalnog programa. Izračunata vrijednost $H_p(0,07)$ koristi se za procjenu ekvivalentne doze za šake i kožu uporabom modela predloženog kao rezultat ORAMED projekta.

Medicinsko osoblje u intervencijskoj radiologiji i nuklearnoj medicini nalazi se u neposrednoj blizini pacijenta i izvora zračenja. Iako medicinsko osoblje nosi zaštitne olovne pregače te koristi druga zaštitna sredstva, njihove ruke, noge i oči najčešće nisu zaštićene. Stoga ovi dijelovi tijela mogu primiti značajno visoke doze.

ORAMED projekt bio je usmjeren na poboljšanje znanja o izloženosti ekstremiteta i leće oka ionizirajućem zračenju u kombinaciji s optimizacijom u korištenju aktivnih osobnih dozimetara. (5)

Postojalo je vrlo malo podataka o raspodjeli izloženosti duž šake osobe koja rukuje otvorenim radioaktivnim izvorima u nuklearnoj medicini. Iz tog je razloga napravljen veliki broj mjerenja s dozimetrima postavljenim na različita mjesta na šaci osoba koji rade u nuklearnoj medicini. Rezultati mjerenja su obrađivani korištenjem statističkih modela i Monte Carlo simulacija te su određeni faktori za izračun ekvivalentne doze ovisno o položaju nošenja dozimetra.

Takoder je istraživao utjecaj različitih zaštitnih sredstava te identificirana dobra i loša praksa. Analizom i tumačenjem dobivenih podataka, kao i iz simulacija, izvedene su sljedeće preporuke:

- Nadzor ekstremiteta u nuklearnoj medicini je neophodan;
- Za određivanje položaja za rutinsko praćenje, najizloženije mjesto na ruci za svakog radnika treba pronaći individualnim mjerenjima.
- Bilo koji alat koji povećava udaljenost (npr. pinceta, automatski injektor) između ruke / prsta i izvora je vrlo učinkovit za smanjenje doze;
- Obuka i obrazovanje o dobrim profesionalnim praksama (npr. planiranje postupaka, ponavljanje postupaka pomoću neradioaktivnih izvora, procjena doza) su relevantniji parametri od razine iskustva zdravstvenih radnika;
- Nije dovoljno brzo raditi, korištenje štitova i alata za povećanje udaljenosti je učinkovitije od brzog rada.

Zdravstveni radnici u nuklearnoj medicini su obično uključeni u više dijagnostičkih postupaka. Osoblje može biti izloženo i visokim dozama te prekoračiti godišnje dozno ograničenje za kožu od 500mSv. Stoga su iznimno bitne odgovarajuće sigurnosne mjere uključujući ekstremno praćenje osoblja.

Jako je bitno da se dozimetar nosi na točno propisanom mjestu na ruci.

Položaj nošenja osobnog dozimetra (12)

Članak 26.

(1) Osobni dozimeter za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$ za procjenu efektivne doze obvezno se nosi na lijevoj strani prsišta.

(2) Ako izloženi radnik nosi zaštitnu pregaču, osobni dozimeter za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$ obvezno se nosi na lijevoj strani prsišta ispod zaštitne pregače, a prema potrebi, sukladno savjetu stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja, drugi osobni dozimeter se nosi u razini ovratnika, iznad zaštitne pregače.

(3) Izloženi radnici kategorije A kod kojih je procijenjena ekvivalentna doza za kožu ili ekstremitete iznad 150 mSv u jednoj godini moraju nositi osobni dozimeter za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(0,07)$ na bazi srednjaka ruke ispod zaštitnih rukavica okrenut prema izvoru ionizirajućeg zračenja ili na drugom prikladnom mjestu sukladno savjetu stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja.

(4) Osobni dozimeter za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(3)$ za procjenu ekvivalentne doze za leću oka nosi se na nosaču u blizini oka, sukladno savjetu stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja.

2. CILJ RADA

Cilj ovog rada je ispitati i prikazati ukupnu radijacijsku izloženost radiološkog tehnologa u PET/CT dijagnostici. Utvrditi opravdanost uvođenja prsten dozimetrije kod osoba koje rade s otvorenim izvorom zračenja, objasniti PET/CT tehnologiju kroz povijest kao dijagnostičke metode. Također detaljno opisati radno mjesto radiološkog tehnologa u PET/CT dijagnostici. Proučiti uređaje za mjerenje zračenja, te sve vrste dostupnih dozimetara. Analizirati i usporediti dobivena mjerenja različitim dozimetrima. Ispitati utjecaj radnog mjesta na ukupno radijacijsko opterećenje radiološkog tehnologa. Iz dobivenih rezultata utvrditi rizične faktore i pokušati dati smjernice za što bolju zaštitu od zračenja u svakodnevnom radu radioloških tehnologa u PET/CT dijagnostici.

3. IZVORI PODATAKA I METODE

Istraživanje je provedeno na zaposlenicima PET/CT centra poliklinike Medikol, podružnica Split u razdoblju od 1.1.2019. do 30.6.2019. Radiološki tehnolozi su na dnevnoj bazi zapisivali doze zračenja koje očitava elektronski dozimetar, a preostala dva termoluminiscentna dozimetra (TLD) očitavala je ovlaštena tvrtka EKOTEH iz Zagreba.

U radu su korišteni podaci dozimetra: TLD dozimetar koji mjeri Hp 10, prsten dozimetar koji mjeri Hp 0,07 i elektronski (ED) dozimetar.

U istraživanju smo proučavali dva radna mjesta: radiološki tehnolog u HOT laboratoriju i radiološki tehnolog koji radi na PET/CT uređaju. U HOT laboratoriju se koristi sustav za automatsko doziranje μ -DDS-A Tema Sinergie, a sam PET/CT uređaj je Philips Brilliance Gemini TF64.

Prilikom pregleda pacijenata korišten je radiofarmak ^{18}F -FDG.

PET/CT snimanje se može vršiti kao PET cijelog tijela ili određene regije s istovremenim snimanjem niskoenergijskog CT-a (tzv. “low dose” CT) cijelog tijela ili određene regije.

Za ozračenje radiološkog tehnologa bitna su dva sljedeća protokola:

1. PET/CT low dose
2. PET/CT + dijagnostički CT

Ovisno o odabranom protokolu mijenja se i vrijeme izloženosti radiološkog tehnologa (RT) zračenju od strane pacijenta.

Pacijent se na šalteru administrativno zaprimi, nakon čega se javlja medicinskoj sestri koja postavlja IV braunilu i vrši ostale pripremne radnje (visina, težina, GUK, nalazi...). Nakon toga s pacijentom razgovara liječnik specijalist nuklearne medicine koji određuje protokol, parametre, te ostale bitne stvari potrebne za snimanje. Pacijent se zatim upućuje na apliciranje radiofarmaka, nakon čega boravi u sobi za “uptake” sljedećih 60 minuta. Potom se upućuje na snimanje. Po obavljenom snimanju i procjeni uspješnosti snimanja, vadi se braunila i otpušta se iz PET/CT centra uz upute o pravilnom ponašanju s obzirom na primljenu dozu radiofarmaka (piti što više tekućine taj dan i ne približavati se trudnicama i maloj djeci).

3.1. Opis radnog mjesta

3.1.1. Radiološki tehnolog u HOT laboratoriju

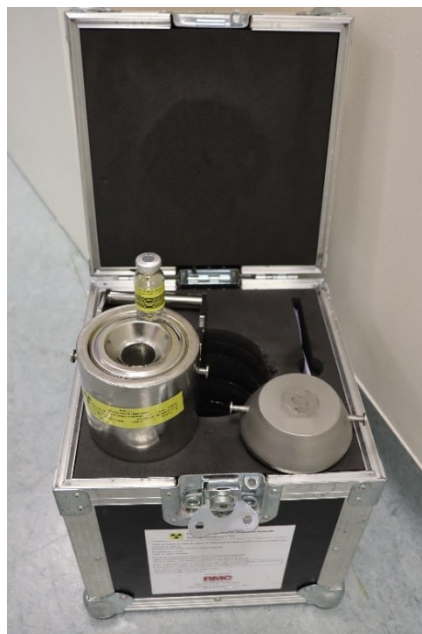


Slika 15. Hot laboratorij

(Izvor: Miličević G.)

Radiološki tehnolog u HOT laboratoriju PET/CT centra Poliklinike Medikol podružnica Split – Opis radnog mjesta:

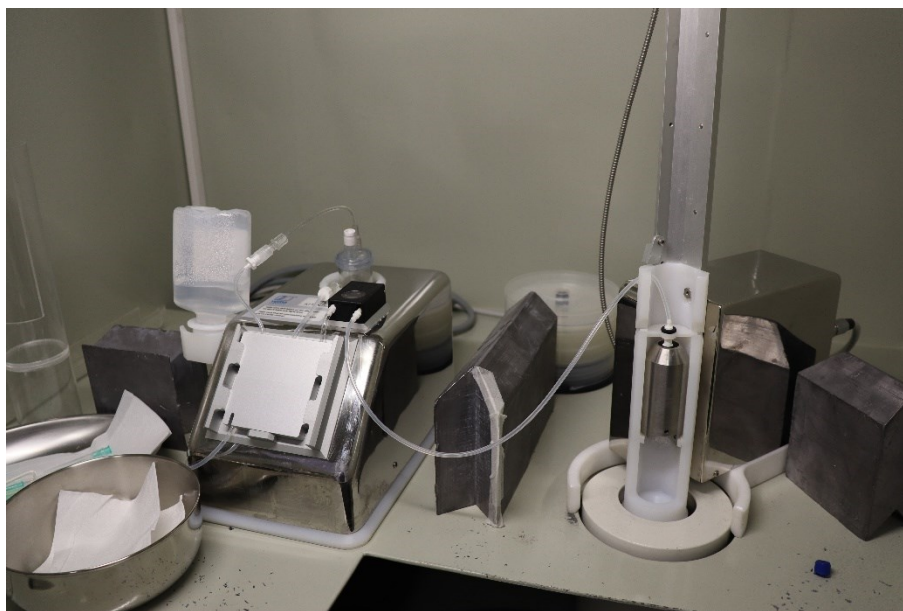
- Vršiti potrebne kalibracije i testiranja sustava za automatsko doziranje radiofarmaka F-18 fluordeoksiglukoza (FDG).
- Izvršava sve ostale potrebne radnje u smislu pripreme hot laboratorija za prihvata radiofarmaka FDG-a.
- Provodi mjere zaštite od zračenja osoblja i pacijenata u smislu poštivanja načela i principa zaštite od zračenja.
- Zaprima ukupnu dozu radiofarmaka u sustav za automatsko doziranje μ -DDS-A Tema Sinergie.
- Odrađuje administrativne poslove u smislu vođenja evidencije o zaprimljenoj dozi vremenu dolaska i ukupne aktivnosti radiofarmaka.



Slika 16. Zaprimanje doze radiofarmaka

(Izvor: Miličević G.)

- Za svakog pojedinog pacijenta uz pomoć navedenog sustava za automatsko navlačenje “navlači” točno određenu dozu dogovorenu s specijalistom nuklearne medicine.
- Izmjerenu dozu u šprici stavlja u olovni omotač, a zatim i u olovni kovčeg kojeg daje medicinskoj sestri koja putem ranije postavljene braunile inicira pacijentu dozu.
- Nakon aplikacije mjeri ostatnu dozu u šprici, te istu nakon mjerenja odlaže u za to predviđen olovni kontejner.
- U osobni karton pacijenta upisuje navučenu dozu, ostatnu dozu, apliciranu dozu i vrijeme aplikacije.
- U slučaju potrebe pomaže kolegi radiološkom tehnologu koji radi za PET/CT uređajem (na konzoli) kod teško pokretnih ili nepokretnih pacijenata.
- Nakon zadnje aplikacije zatvara ciklus navlačenja u sustavu HOT laboratorija te na siguran način ostavlja eventualni ostatni radiofarmak unutar sustava.
- Obavlja završne sumarne administrativne poslove za kraj radnog dana.



Slika 17. Automatic dose fractionator unit mod. μ -DDS-A firme Tema Sinergie
(Izvor: Miličević G.)



Slika 18. Pripremljena doza FDG-a za iniciranje pacijentu
(Izvor: Miličević G.)

3.1.2. Radiološki tehnolog za PET/CT uređajem u radu s pacijentima



Slika 19. Philips Gemini TF 64 PET/CT uređaj

(Izvor: Miličević G.)

Radiološki tehnolog za PET/CT uređajem (na konzoli) Poliklinika Medikol podružnica

Split – Opis radnog mjesta:

- Obavlja sve potrebne kalibracije i testiranja PET/CT uređaja u smislu osiguranja kvalitete svih postupaka, procedura i aktivnosti planiranih za taj dan.
- Izvršava ostale potrebne radnje priprema same snimaone, uređaja i ostalog dijela radnog mjesta za što kvalitetniji i sigurniji rad s pacijentom.
- Provodi mjere zaštite od zračenja osoblja i pacijenata u smislu poštivanja načela i principa zaštite od zračenja.

- Preko video-audio sustava monitorira pacijente koji se nakon aplikacije nalaze u tkz. “uptake sobi” čekajući distribuciju radiofarmaka u tijelu i poziv za snimanje.
- Preko spomenutog sustava poziva pacijenta u snimaonu.
- Po potrebi namješta pacijenta u optimalan položaj koji osigurava s jedne strane najbolju kvalitetu slike, a s druge strane udoban i ugodan položaj za pacijenta s obzirom na vremensko trajanje samog snimanja koje ovisno o određenom protokolu može trajati od 10-35 minuta.
- Izvršava aktivnosti u smislu obavljanja samog snimanja, nadzora pacijenta i svega potrebnog u cilju izvršavanja zadanog protokola pregleda.



Slika 20. Kontrolna soba PET/CT

(Izvor: Miličević G.)

- Nakon snimanja otpušta pacijenta u prostor predviđen za vađenje braunile.
- Po dobivanju prvih rezultata snimanja analizira, procjenjuje kvalitetu učinjenog pregleda te se, po potrebi, u vezi s tim i konzultira s specijalistom nuklearne medicine.
- Nakon evaluacije pregleda, poziva medicinsku sestru da izvadi pacijentu braunilu te ga otpušta iz PET/CT centra.

4. REZULTATI

Tablica 1. Rezultati mjerenja zračenja za radno mjesto radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju

Mjesec		Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Ukupno (6.mj.)	Godišnja procjena (12.mj.)
Broj pacijenata u mjesecu prema protokolu snimanja	PET/CT low dose	80	138	106	85	92	64	565	1130
	PET/CT + dg.CT	45	62	72	73	78	67	397	794
	Ukupno	125	200	178	158	170	131	962	1924
Vrsta dozimetra Izmjereno zračenje (mSv)	Prsten osobni dozni ekvivalent Hp 0,07mSv	10,2	14,1	11,4	10,9	11,1	10,5	68,2	136,4
	TLD osobni dozni ekvivalent Hp 10mSv	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,48	<0,96
	Elektronski dozimetar Hp 7mSv	0,13	0,19	0,16	0,15	0,17	0,14	0,94	1,88

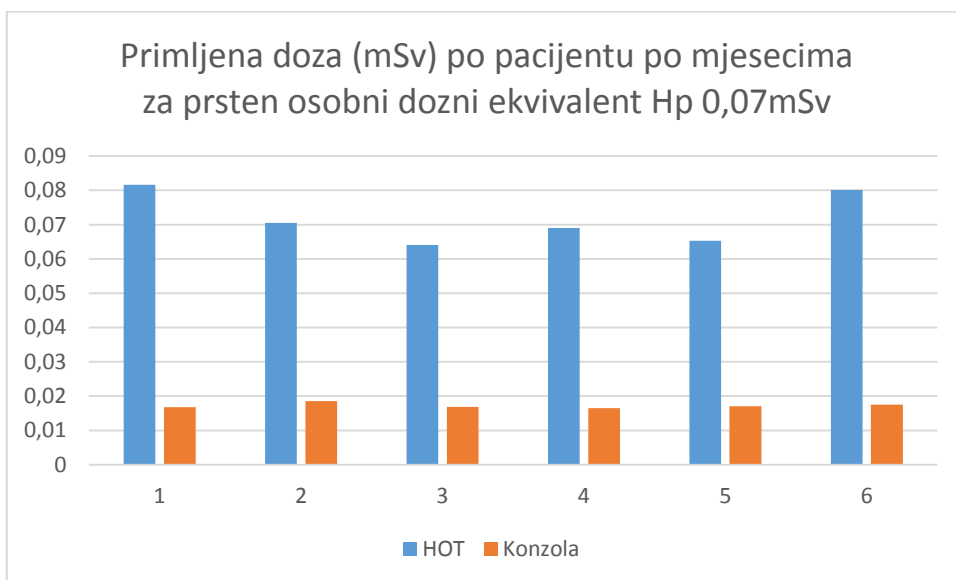
Iz tablice 1 vidljivi su prikupljeni podaci o izmjerenim dozama zračenja za radno mjesto radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju u kojima je vidljivo da tijekom 6 mjeseci nisu zabilježene doze zračenja koje bi prelazile zakonski dopuštene razine.

Tablica 2. Rezultati mjerenja zračenja za radno mjesto radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja

Mjesec		Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Ukupno (6.mj.)	Godišnja procjena (12.mj.)
Broj pacijenata u mjesecu prema protokolu snimanja	PET/CT low dose	80	138	106	85	92	64	565	1130
	PET/CT + dg.CT	45	62	72	73	78	67	397	794
	Ukupno	125	200	178	158	170	131	962	1924
Vrsta dozimetra Izmjereno zračenje (mSv)	Prsten osobni dozni ekvivalent Hp 0,07mSv	2,1	3,7	3	2,6	2,9	2,3	16,6	33,2
	TLD osobni dozni ekvivalent Hp 10mSv	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,48	<0,96
	Elektronski dozimetar Hp 7mSv	0,31	0,49	0,37	0,33	0,35	0,32	2,17	4,34

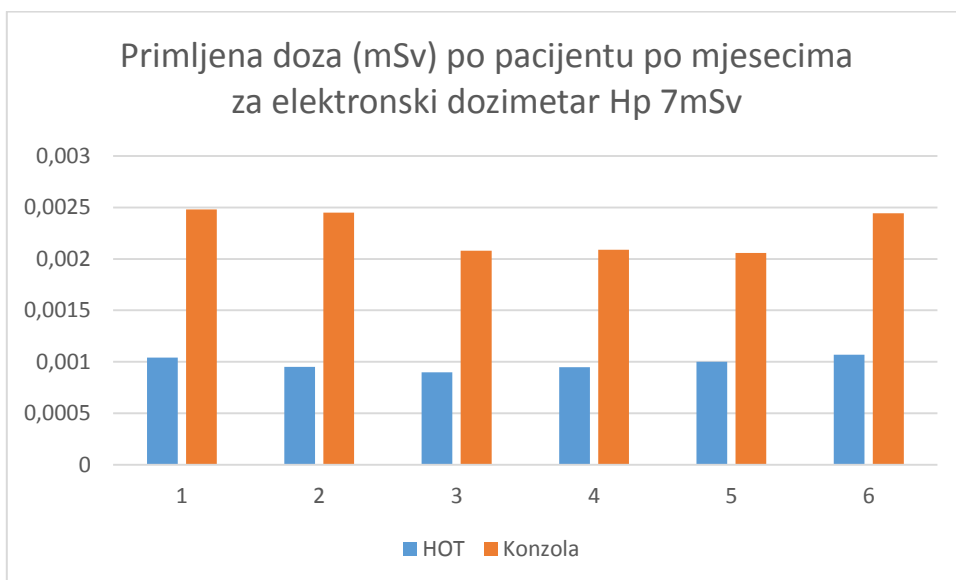
Iz tablice 2 vidljivi su prikupljeni podaci o izmjerenim dozama zračenja za radno mjesto radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja u kojima je vidljivo da tijekom 6 mjeseci nisu zabilježene doze zračenja koje bi prelazile zakonski dopuštene razine.

Grafikon 1. Usporedba primljene doze po jednom pacijentu za radna mjesta radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja mjereno prsten dozimetrom Hp 0,07mSv



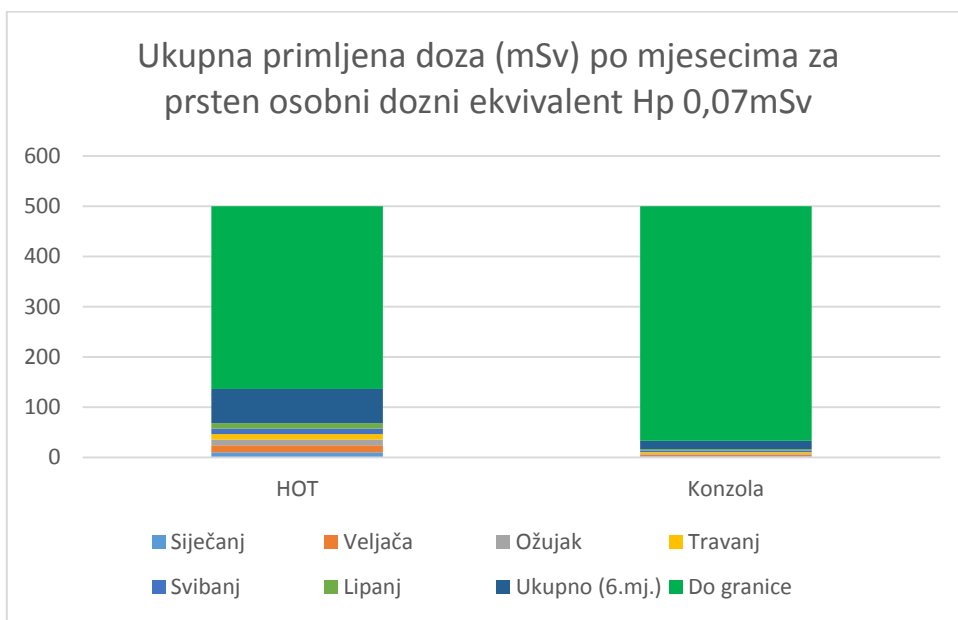
Iz grafikona 1 vidljivo je da za radna mjesta radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja postoji značajna razlika u primljenoj dozi zračenja mjereno prsten dozimetrom Hp 0,07 mSv, čime je opravdana primjena prsten dozimetra u svakodnevnom radu sa otvorenim izvorom zračenja.

Grafikon 2. Usporedba primljene doze po jednom pacijentu za radna mjesta radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja mjereno elektronskim dozimetrom Hp 7mSv



Iz grafikona 2 vidljivo je da za radna mjesta radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i radiološkog tehnologa za konzolom PET/CT uređaja postoji značajna razlika u primljenoj dozi zračenja mjereno elektronskim dozimetrom Hp 7 mSv, ali ujedno i pokazuje kako postoje značajne razlike u dijelovima tijela koji su izloženi, pa tako vidimo da je u HOT laboratoriju značajnije izložena šaka odnosno ruka, dok je za konzolom primjetno veće izlaganje čitavog tijela.

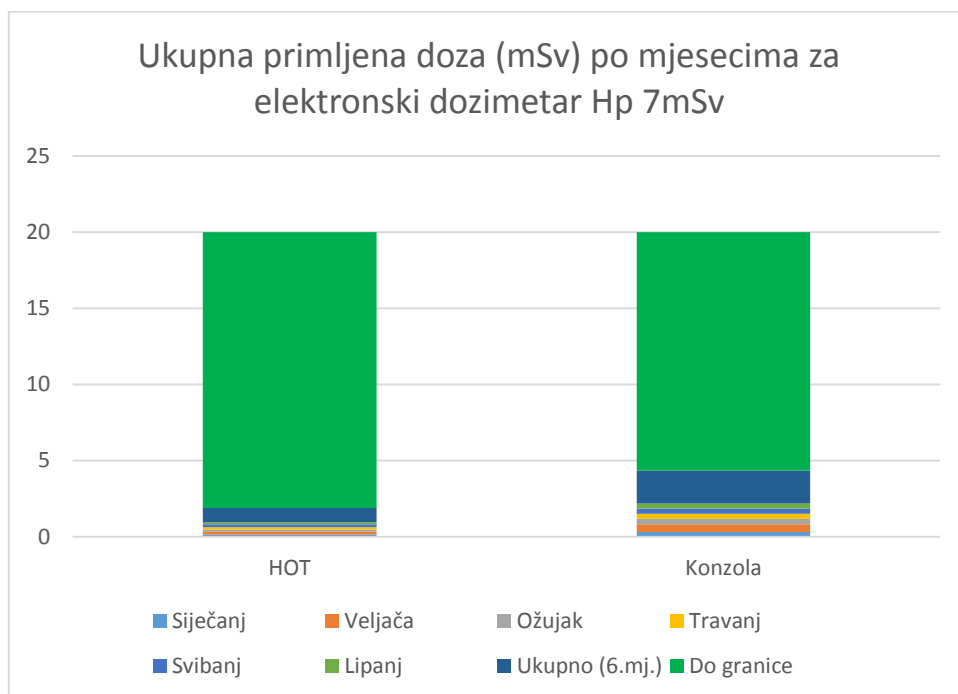
Grafikon 3. Prikaz ukupno primljene doze zračenja za dva radna mjesta radiološkog tehnologa po mjesecima u odnosu na ukupno godišnje dopuštenu dozu od 500mSv mjereno prsten osobnim doznim ekvivalentom Hp 0,07mSv



Iz grafikona 3. je vidljivo da je ukupno godišnje ozračenje radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i za konzolom PET/CT uređaja mjereno prsten dozimetrom Hp 0,07mSv znatno ispod godišnje dopuštenog maksimuma od 500mSv. Isto tako je vidljivo da je pri tom radiološki tehnolog u HOT laboratoriju znatno više ozračen u području ruke i šaka od radiološkog tehnologa u radu za konzolom PET/CT uređaja.

Na grafikonu je modrom bojom prikazana kumulativna aproksimacija za preostalih 6. mjeseci u godini (srpanj do prosinac) temeljem podataka za prvih 6. mjeseci.

Grafikon 4. Prikaz ukupno primljene doze zračenja za dva radna mjesta radiološkog tehnologa po mjesecima u odnosu na ukupno godišnje dopuštenu dozu od 20mSv mjereno elektronskim dozimetrom Hp 7mSv



Iz grafikona 4. je vidljivo da je ukupno godišnje ozračenje radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i za konzolom PET/CT uređaja mjereno elektronskim dozimetrom Hp 7mSv znatno ispod godišnje dopuštenog maksimuma od 20mSv. Isto tako je vidljivo da je pri tom radiološki tehnolog u radu za konzolom PET/CT uređaja cijelim tijelom znatno više ozračen od radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju.

Na grafikonu je modrom bojom prikazana kumulativna aproksimacija za preostalih 6. mjeseci u godini (srpanj do prosinac) temeljem podataka za prvih 6. mjeseci.

5. RASPRAVA

Svrha ovog istraživanja je bila pokazati ukupnu radijacijsku izloženost radiološkog tehnologa u PET/CT dijagnostici s obzirom na dva različita radna mjesta (HOT i konzola). Htjeli smo pokazati opravdanost uvođenja prsten dozimetrije kod radnika koji rade s otvorenim izvorom zračenja. Rezultati koje smo dobili prilikom 6-mjesečnog istraživanja pokazuju da su radiološkom tehnologu u HOT laboratoriju najviše izložene ruke jer priprema radiofarmak i ne dolazi u kontakt s pacijentom, dok radiološki tehnolog koji radi za konzolom dolazi u kontakt s pacijentom pa je samim time njegovo čitavo tijelo izloženo zračenju.

Pokazalo se da ukupna doza zračenja ovisi o broju pacijenata u tom mjesecu. Isto tako, rezultati govore da je količina primljenog zračenja daleko ispod zakonski propisanih granica. Radiološki tehnolog namješta pacijenta za snimanje i čest je slučaj da pacijenti starije dobi i nepokretni trebaju pomoć čime se povećava vrijeme koje provodi s pacijentom čime se povećava i doza ionizirajućeg zračenja kojem se izlaže. Međutim, s obzirom da prilikom mjerenja nismo bili u mogućnosti mjeriti provedeno vrijeme izloženosti pacijentu ovisno o protokolu snimanja, (PET/CT low dose i PET/CT+dijagnostički CT) u ovom radu nismo mogli pokazati direktnu povezanost vrste protokola i veće/manje izloženosti zračenju ovisno o protokolu.

Rezultati su pokazali da izmjerena doza zračenja uvelike ovisi o vrsti dozimetra koji se koristi, kao i o radnom mjestu. Vidljivo je da radiološki tehnolog s radnim mjestom u HOT laboratoriju primi 4 do 5 puta veću dozu zračenja izmjerenu prsten dozimetrom (Hp 0,07) u odnosu na radiološkog tehnologa s radnim mjestom za konzolom. Isto tako, vidljivo je da radiološki tehnolog u radu s PET/CT uređajem na isti broj pacijenata primi 2 do 3 puta veću dozu zračenja izmjereno elektronskim dozimetrom (Hp 7). Dobiveni rezultati su pokazali da TLD dozimetar (Hp 10) koji nije u mogućnosti mjeriti zračenja manje od 0,08mSv nije dovoljno učinkovit kao osobni dozimetar kod radnika koji rade s otvorenim izvorom zračenja. Rezultati mjerenja koje smo službeno dobili od ovlaštenog zavoda "Ekoteh dozimetrija d.o.o." tijekom šestomjesečnog mjerenja pokazala su da TLD dozimetar (Hp 10) nije dovoljno osjetljiv da bi pokazao stvarnu izloženost radnika koji rade s otvorenim izvorom zračenja.

Osobni dozimetri prsten (Hp 0,07) i TLD (Hp 10) su dozimetri koje očitava ovlaštena tvrtka Ekoteh, a njihova očitavanja su dostupna u sljedećem mjesecu za prehodni mjesec. S druge pak strane, elektronski dozimeter (Hp 7) je dozimeter koji trenutno očitava zračenje, pa ujedno predstavlja i sigurnosni faktor u radu s otvorenim izvorima zračenja i kao takav registrira svako, pa i najmanje incidentno ozračenje što omogućava brzu reakciju u smislu poduzimanja svih potrebnih mjera u saniranju incidentnog ozračenja.

Rezultati su pokazali da radiološki tehnolog koji radi za konzolom na godišnjoj razini dobije 4,34 mSv mjereno elektronskim dozimetrom (Hp 7), a zakonski je dopuštena razina do 20 mSv godišnje.

Rezultati su pokazali da radiološki tehnolog koji radi u HOT laboratoriju na godišnjoj razini dobije 1,88 mSv mjereno elektronskim dozimetrom (Hp 7), a zakonski je dopuštena razina do 20 mSv godišnje.

Rezultati su pokazali da radiološki tehnolog koji radi za konzolom na godišnjoj razini dobije 33,2 mSv mjereno prsten dozimetrom (Hp 0,07), a zakonski je dopuštena razina do 500 mSv godišnje.

Rezultati su pokazali da radiološki tehnolog koji radi u HOT laboratoriju na godišnjoj razini dobije 136,4 mSv mjereno prsten dozimetrom (Hp 0,07), a zakonski je dopuštena razina do 500 mSv godišnje.

Iz dobivenih rezultata mjerenja razvidno je da su mjesečna očitavanja za radiološke tehnologe na oba radna mjesta nekoliko puta ispod dozvoljenih granica propisanih zakonom o nuklearnoj i radiološkoj sigurnosti.

Isto tako, iz rezultata je vidljivo da radiološki tehnolog u HOT laboratoriju zbog načina rada koji obavlja u pripremi radiofarmaka (rad rukama) svoju primarnu dozu dobije na ekstremitete šaka što najzornije pokazuje prsten dozimetrija Hp 0,07. S druge pak strane, s obzirom da radiološki tehnolog za PET/CT uređajem radi s pacijentima, njegovo primarno ozračenje je cijelim tijelom, što pokazuje elektronski dozimeter Hp 7.

6. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje pokazalo je opravdanim uvođenje prsten dozimetrije za osobe koje rade sa otvorenim izvorom zračenja, a posebno za rad u HOT laboratoriju. Prijašnjim mjerenjima koja su se temeljila isključivo na elektronskom i TLD dozimetru Hp 10, dolazili smo do zaključaka kako radiološki tehnolog u HOT laboratoriju prima znatno manje količine zračenja od radiološkog tehnologa za konzolom, što se u ovom radu pokazalo točnim kad je u pitanju izloženost čitavog tijela zračenju. Međutim, uvođenjem prsten dozimetrije i dobivenim rezultatima u ovom radu pokazalo se kako radiološki tehnolog na području šaka prima znatno više količine zračenja u odnosu na radiološkog tehnologa za konzolom.

Sva mjerenja i rezultati su nedvojbeno pokazali da su ozračenja za oba radiološka tehnologa u HOT laboratoriju i za konzolom uvjerljivo ispod zakonom dozvoljenih granica.

U budućim istraživanjima ove tematike, bilo bi potrebno odvojiti mjerenja zračenja koristeći prsten dozimetar i elektronski dozimetar prema protokolu snimanja (PET/CT-low dose i PET/CT+dijagnostički CT) što ovom prilikom iz tehničkih razloga nije bilo izvedivo.

U svrhu što manjeg ozračenja profesionalnog osoblja potrebno je provoditi konstantnu dopunu znanja o zaštiti od zračenja uz primjenu svih dostupnih tehničkih pomagala.

Rezultati ovog istraživanja se u velikoj mjeri poklapaju s rezultatima istih ili sličnih istraživanja opisanih u relevantnoj dostupnoj istraživačkoj literaturi.

7. SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je pokazati opravdanost uvođenja prsten dozimetrije kod radnika koji rade s otvorenim izvorom zračenja. Proučili smo povijest PET/CT uređaja, njihov način rada i princip dobivanja konačne slike. Proučili smo dostupnu literaturu koja govori o utjecaju radijacije na ljudski organizam. Također smo se osvrnuli na zakonski propisanu količinu zračenja, i usporedili je s dobivenim rezultatima u našem centru. Pritom smo razdvojili rezultate za dva radna mjesta, radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju i radiološkog tehnologa za PET/CT uređajem i detaljno opisali njihova radna mjesta i radne zadatke. Prikazali smo njihovu ukupnu radijacijsku izloženost mjereći različitim dozimetrima: TLD Hp10, TLD Hp0,07, i elektronskim dozimetrom Hp7. Šestomjesečna mjerenja su pokazala da su oba radiološka tehnologa unutar zakonski dozvoljenih ograničenja. Također su pokazala da je kod radiološkog tehnologa u HOT laboratoriju primarna izloženost ruku i šaka, što je postalo vidljivo tek uvođenjem prsten dozimetra Hp0,07mSv, dok je kod radiološkog tehnologa koji radi za PET/CT uređajem primarna izloženost čitavog tijela zbog rada s pacijentom. Time smo pokazali opravdanost uvođenja prsten dozimetra Hp0,07 u zakonsku regulativu kod djelatnika koji rade s otvorenim izvorom zračenja.

8. SUMMARY

The goal of this paper was to justify the implementation of finger ring dosimeter measurements with people working with open sources of radiation. We studied the history of PET/CT, its working principles and image rendering. Impact of radiation on human body was also discussed. We also compared our findings with the legal limits of permitted radiation, and found it to be very well within those limits. The measurements we took were distinguished between two job descriptions, one of radiologic technologist working in HOT lab, and the other of radiologic technologist working at the console of PET/CT. Their working environment and tasks were thoroughly described. We used three kinds of dosimeters to show their radiation exposure: TLD Hp10, TLD Hp0,07, and electronic dosimeter Hp7. Measurements we took during a six month period showed that the radiation exposure of both radiologic technologists was within legal limits. They also showed that a radiological exposure for radiologic technologist in HOT lab was primarily in the region of his hands and fists, which became apparent only with the introduction of finger ring dosimeters Hp0,07. On the other hand, radiological exposure for radiologic technologist working at the console of PET/CT was primarily his whole body because of his interaction with the patient. Therefore, we were able to justify the implementation of finger ring dosimeter Hp0,07 measurements with people working with open sources of radiation.

9. LITERATURA

1. Janković S, Mihanović F i suradnici. Radiološki uređaji i oprema u radiologiji, radioterapiji i nuklearnoj medicini. Split: Sveučilište u Splitu Sveučilišni odsjek zdravstvenih studija; 2015.
2. Jones T, Townsend D. History and future technical innovation in positron emission tomography. J. Med. Imag. 2017. 4(1), 011013.
3. Modronja M. Proračun očekivane efektivne doze kod dijagnostičkih procedura u nuklearnoj medicini sa pozitronskim emiterima. Sarajevo: Univerzitet u Sarajevu Prirodno-matematički fakultet Odsjek za fiziku; 2014.
4. Marković V, Punda A, Eterović D. Pozitronska emisijska tomografija PET i PET-CT. Split: Medicinski fakultet Sveučilišta u Splitu, katedra za Nuklearnu medicinu; 2014.
5. Glavak L. Procjena ekvivalentnih doza za kožu i šake izloženih radnika u nuklearnoj medicini. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet Fizički odsjek; 2018.
6. Surić Mihić M. Vremenski razlučiva osobna dozimetrija rendgenskih zračenja vrlo niskih doza. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet; 2012.
7. Janković S. Uvod u radiologiju. Split: Sveučilište u Splitu Odjel za zdravstvene studije Studij radiološke tehnologije; 2015.
8. Janković S. Rentgensko zračenje i biološki učinci zračenja. Split: Medicinski fakultet Sveučilišta u Splitu; 2009.
9. Manning G, Rothkamm K. Deoxyribonucleic acid damage-associated biomarkers of ionising radiation: current status and future relevance for radiology and radiotherapy. Br J Radiol 2013;86:20130173.
10. Garaj-Vrhovac V. Karcinogenost i mutagenaza: analiza somatskih mutacija. Arh Hig Rada Toksikol 2000;51 Supp: 115–124
11. European Commission. Radiation protection 100 – Guidance for protection of unborn children and infants irradiated due to parental medical exposures. 1998.

12. Narodne novine. Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja. NN 38/2018.
13. Republika Hrvatska Ministarstvo Unutarnjih Poslova Ravnateljstvo civilne zaštite. Dokumenti. Dostupno na: <https://civilna-zastita.gov.hr/dokumenti-91/91>
14. Balenović A, Šamija M, Dobrila-Dintinjana R, Grbac-Ivanković S. PET/CT klinička primjena. Zagreb: Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti; 2014.

10. ŽIVOTOPIS

IME I PREZIME: Goran Miličević

ADRESA: Sv.Tekle,21210 Solin

KONTAKT: 098 321 162

E MAIL: goran.milicevic62@gmail.com

DATUM ROĐENJA: 27.9.1979.

MJESTO ROĐENJA: Split

OBRAZOVANJE:

Osnovna škola: Osnovna škola “Vjekoslav Parać” Solin, 1986-1994 godine

Srednja škola: Srednja medicinska škola Split, 1994-1998 godine

Fakultet: Veleučilište, stručni studij medicinska radiologija, 2000-2002 godine

Medicinski fakultet, stručni studij medicinske radiologije, 2002-2005 godine

Sveučilišni odjel zdravstvenih studija, smjer radiološka tehnologija, razlikovni modul, 2015 godine

Sveučilišni odjel zdravstvenih studija, smjer radiološka tehnologija, diplomski 2015-2019 godine

Radno iskustvo: Dom zdravlja Splitsko dalmatinske županije, radiološke ambulante u Solinu, Kaštelima, Omišu, Braču i Splitu. 2005-2009 godine

Poliklinika Medikol PET/CT centar podružnica Split, od 2009 godine

Posebna iskustva: Iskustvo člana upravnog vijeća ljekarni Splitsko dalmatinske županije, predsjednik upravnog vijeća Nastavnog zavoda za javno zdravstvo Splitsko dalmatinske županije, kao i predsjednik upravnog vijeća ustanove dječji vrtić Cvrčak Solin.

Vještine: Aktivno znanje engleskog jezika (govor i pisanje)

Poznavanje rada na računalu.

Položen vozački ispit B, C, E kategorije.