Procjena ekvivalentnih doza za kožu i šake izloženih radnika u nuklearnoj medicini

Glavak, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:398694

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Lucija Glavak

PROCJENA EKVIVALENTNIH DOZA ZA KOŽU I ŠAKE IZLOŽENIH RADNIKA U NUKLEARNOJ MEDICINI

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

Lucija Glavak

Diplomski rad

Procjena ekvivalentnih doza za kožu i šake izloženih radnika u nuklearnoj medicini

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Marija Surić Mihić, dipl. ing.

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Zahvale

”Prepreke su one strašne stvari koje možete vidjeti tek kada maknete oči s cilja.”

Henri Ford

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici dr. sc. Mariji Surić Mihić na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.
Veliku zahvalnost iskazujem i brojnim profesorima koji su svojim postupcima i metodama obogatili moje studiranje.
Zahvaljujem svim prijateljima i kolegama, koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijeli tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno.
Velika hvala Matiji, koji mi je bio motivacija i podrška kad je bilo najpotrebnije.
Posebnu zahvalnost dugujem cijeloj svojoj obitelji koja me uvijek podržavala i upućivala na pravi put.
I na kraju, najveću zaslugu za postignuti uspjeh pripisujem svojim roditeljima jer su mi omogućili studij, uvijek su bili tu, uz mene, radilo se o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam postigla ne bi bilo moguće.

Sažetak

Izloženi radnici koji rade u nuklearnoj medicini (NM) i laboratorijskoj dijagnostici (LD) manipuliraju otvorenim radioaktivnim izvorima koji se primjenjuju pacijentima u dijagnostičke i terapijske svrhe. Pri tom rukovanju ionizirajućem zračenju su najizloženije šake. Kako bi se procijenile ekvivalentne doze za kožu i šake izloženih radnika i istraživanju mogućih izloženosti preko granica doze, mjeren je osobni dozni ekvivalent Hp(0,07) uporabom termoluminiscentnih dozimetara u prsten nosaču u jednoj hrvatskoj kliničkoj bolnici. Pojedinačno praćenje provedeno je godinu dana s mjernim periodima od mjesec dana. Preporučeno dozno ograničenje za izložene radnike u NM i LM treba se uspostaviti radi optimizacije zaštite od zračenja i smanjenja primljenih doza. Osoblje u NM i LD bi trebalo motivirati da nosi prsten dozimetre u cilju poboljšanja pouzdanosti izmjerenih doza. Rezultati rutinskog praćenja mogli bi identificirati potencijalno loše postupke te omogućiti poduzimanje potrebnih radnji kako bi se oni uklonili.

Ključne riječi: osobna dozimetrija, ekvivalentna doza za šake i kožu, nuklearna medicina.

An estimate of equivalent doses to the skin and hands of exposed workers in nuclear medicine

Abstract

Exposed workers in nuclear medicine (NM) and laboratory diagnostics (LD) handle open radioactive sources which are administered to patients for diagnostic and therapeutic purposes. During the handling the skin and hands are the most exposed part of the body. In order to assess the equivalent doses for the skin and hands of the exposed workers and to investigate possible exposure above dose limits, the personal dose equivalent Hp (0,07) was measured using ring thermoluminescent dosimeters in one Croatian clinical hospital. Individual monitoring was conducted during a period of one year with monthly measurement periods. The recommended dose constraint for workers exposed to radiation in NM and LM is to be established to optimize radiation protection and to reduce exposure. Personnel in NM and LD should be motivated to wear ring dosimeters to improve the reliability of dose measurements. The results of the routine monitoring could identify potentially undesirable actions and allow one to take the steps necessary to eliminate them.

Keywords: personal dosimetry, equivalent dose for hands and skin, nuclear medicine.

Sadržaj

1 Uvod **1**

1.1 Motivacija 1

1.2 Ionizirajuće zračenje 1

1.2.1 Otvoreni radioaktivni izvori u medicini 3

1.3 Osnovne fizikalne veličine u dozimetriji ionizirajućeg zračenja 5

1.4 Zaštita od ionizirajućeg zračenja 9

1.4.1 Biološki učinci zračenja 9

1.4.2 Načela zaštite od ionizirajućeg zračenja 10

1.5 Osobna dozimetrija 11

2 TL dozimetrija **14**

2.1 TL dozimetri 14

2.2 Mjerenje Hp(0,07) prsten dozimetrima 17

2.3 ORAMED model procjene ekvivalentne doze za kožu i šake 21

3 Eksperiment **24**

4 Rezultati **25**

5 Zaključak **36**

Dodaci **38**

5.1 Priprema za nastavni sat - Radioaktivnost 39

5.1.1 Tijek nastavnog sata 40

Literatura **54**

1 Uvod

1.1 Motivacija

Ljudsko je tijelo svakodnevno izloženo ionizirajućem zračenju iz prirodnih izvora. Međutim, evolucijom se nisu razvila osjetila za prepoznavanje zračenja pa ljudsko tijelo nije u mogućnosti prepoznati kada i kojoj količini zračenja je izloženo. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i ponekad ih je teško povezati s uzrokom. Učinci se osjete nakon nekoliko sati, dana pa čak i godina, ovisno o tipu zračenja. Nisu sva zračenja jednako štetna i opasna. Mogući štetni učinci zračenja uvelike ovise o tipu pojedinog zračenja. Ionizirajuće zračenje uzrokuje ionizaciju u molekulama živih stanica što rezultira nastajanjem iona ili nabijenih atoma, koji mogu dalje reagirati s drugim atomima u stanici te tako uzrokovati oštećenja.

Optimizacija radiološke zaštite provodi se kako bi se smanjila izloženost ljudi ionizirajućem zračenju koliko je razumski moguće postići (ALARA[1] načelo). Kako bi se utvrdilo kolika je izloženost osoba koje su tijekom svog rada izloženje ionizirajućem zračenju, potrebno je napraviti mjerenja te u skladu s rezultatima mjerenjima provesti optimizaciju ukoliko je potrebno. Prema propisima od prije nekoliko mjeseci, u Republici Hrvatskoj mjerenje izloženosti šaka i kože izloženih radnika u nuklearnoj medicini nije bilo obvezno pa takvi podaci ne postoje ili nisu dostupni. Literaturni podaci izloženosti ljudi koji rade slične poslove u nuklearnoj medicini za druge zemlje su vrlo specifični vezano uz način rada, radno opterećenje i radioizotope karakteristične za pojedini odjel nuklearne medicine. Iz tog razloga ti literaturni podaci nisu bili direktno primjenjivi.

1.2 Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje je zračenje čija je energija dovoljna da iz atoma oslobodi elektron. Razlikujemo nekoliko vrsta ionizirajućeg zračenja s obzirom na uzrok ionizacije

- elektromagnetsko zračenje (rendgensko zračenje,γ zračenje),

[1] As Low As Reasonably Achievable - ALARA načelo

- nabijene čestice (β zračenje, α zračenje) ili
- neutralne čestice (neutroni)

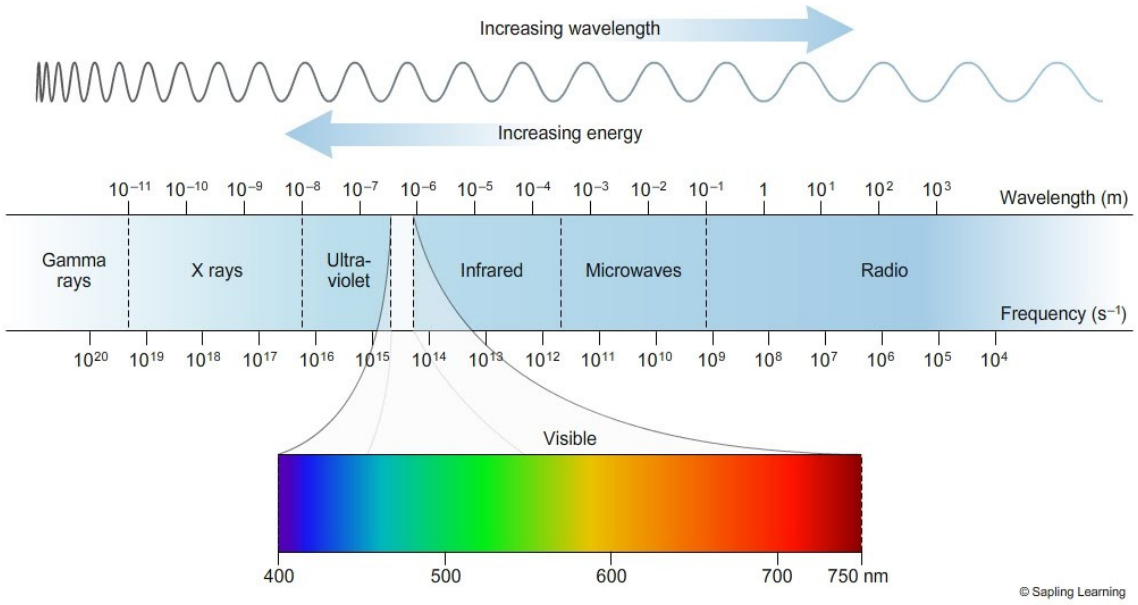
Porijeklo izvora ionizirajućeg zračenja je dijelom iz radionuklida koji se nalaze u prirodi, a dijelom od izvora stvorenih ljudskim djelovanjem. Doprinos od radionuklida koji se nalaze u prirodi naziva se prirodno pozadinsko zračenje.
Prirodno pozadinsko zračenje potječe od prirodnih izvora (kozmičko zračenje s nastalim radionuklidima (protoni, neutroni, γ) koji se nalaze u atmosferi te prirodne radioaktivne tvari (nizovi α, β, γ raspada) koje se nalaze u zemlji, stijenama, zraku, vodi, ali i u samom čovjeku).
Izvori zračenja stvoreni ljudskim djelovanjem nazivaju se antropogeni izvori. Oni se dijele na električne uređaje koji proizvode ionizirajuće zračenje i radioaktivne izvore. Obje vrste izvora imaju različite primjene. Najviše se koriste u medicini, industriji i znanosti. U medicini se koriste za različite dijagnostičke i terapijske postupke te nalaze nove primjene svakog dana. Električni uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje su rendgenski uređaji, CT[2], akceleratori.

Radioaktivni izvori mogu biti otvoreni i zatvoreni radioaktivni izvori. Zatvoreni radioaktivni izvor je radioaktivni izvor zatvoren u nepropusnoj ovojnici od neradioaktivne tvari ili ugrađen u čvrsti oblik tako da radioaktivna tvar u normalnim uvjetima rada ne može doći u dodir s okolišem. Svi drugi radioaktivni izvori se smatraju otvorenim radioaktivnim izvorima. Otvoreni radioaktivni izvori mogu biti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju. Zatvoreni radioaktivni izvori u nuklearnoj medicini služe za kontrolu kvalitete i ispravnosti rada uređaja kao što je gama kamera ili PET[3] skener. Koriste se još i u industrijskoj radiografiji, brahiterapiji, sterilizaciji predmeta, za mjerenje debljine, vlage, gustoće i slično. Terapija otvorenim radioaktivnim izvorima primjenjuje se na odjelima nuklearne medicine koji su opremljeni opremom, sredstvima i educiranim osobljem za rad s otvorenim radioaktivnim izvorima visoke aktivnosti. Otvoreni radioaktivni izvori se također koriste za in-vitro laboratorijske testove te in-vivo dijagnostička slikanja i terapijske postupke radiojodne ili radionuklidne terapije. Međutim, upotrebom radionuklida[4] javlja se sve veći problem zbrinja-

[2]engl. Computed Tomography, kompjuterizirana tomografija-CT
[3]pozitronska emisijska tomografija-PET
[4]nestabilne, radioaktivne jezgre atoma koje se spontano raspadaju i pritom emitiraju ionizirajuće zračenje - radionuklidi

vanja radioaktivnog otpada.

Ionizirajuće zračenje karakteriziraju visoke frekvencije (od $10^{16}Hz$ i više) te niske valne duljine ($10^{-8}m$ i niže). S obzirom na ovisnost energije o frekvenciji zračenja prema relaciji $E = h\nu$, Slika 1. prikazuje kako porastom frekvencije raste i energija zračenja. Sukladno tome, prema relaciji $E = \frac{hc}{\lambda}$, energija zračenja opada porastom valne duljine.



Slika 1.1: Spektar elektromagnetskog zračenja s pripadnim valnim duljinama. [2]

1.2.1 Otvoreni radioaktivni izvori u medicini

Razvojem znanosti i tehnologije u raznim se djelatnostima raširila upotreba ionizirajućeg zračenja. Najznačajnije primjene ionizirajućeg zračenja su u medicini, istraživanju i industriji. U nuklearnoj medicini se u dijagnostičke i terapijske svrhe koriste otvoreni i zatvoreni radioaktivni izvori. Tako se, na primjer, pacijentu za potrebe dijagnostike injicira radionuklid te se on akumulira u nekom organu ili tkivu gdje se inače nakuplja neradioaktivni izotop istog elementa. Upotrebom gama kamere snima se raspodjela aktivnosti u organu ili tkivu od interesa. Pri ovom se postupku biraju radioaktivni izvori na način da se na primjer nakupljaju uglavnom u jednom organu (jod u štitnjači) ili su karakteristični za neke procese (FDG[5]). S ob-

[5]FDG - glukoza obilježena radioaktivnim fluorom koja se koristi u pozitronskoj emisijskoj tomografiji (PET)

zirom da glukoza odlazi u tkiva i organe koji troše puno energije, a tumorsko tkivo troši puno energije, FDG je pogodna za detekciju tumorske tvorbe. Bitno je napomenuti kako se pri ovakvim postupcima koriste kratkoživući radioizotopi koji imaju vrlo kratko vrijeme poluraspada kako bi se što prije raspali i izlučili iz organizma. Time je omogućeno da osoba što prije prestane biti rizik za okolinu. Vrijeme poluraspada $T_{1/2}$ je vremenski interval u kojem se raspadne polovina jezgara radioaktivne tvari. Biološko vrijeme poluraspada $(T_{1/2})_b$ je vrijeme potrebno da se količina radiofarmaka apliciranog pacijentu reducira na polovinu uslijed njegovog izlučivanja iz organizma. Efektivno vrijeme poluraspada $(T_{1/2})_e$ je vrijeme potrebno da se aktivnost [6] radiofarmaka u pacijentu reducira na polovinu početne vrijednosti aktivnosti zbog radioaktivnog raspada i biološkog izlučivanja. Veza fizikalnog vremena poluraspada, biološkog vremena poluraspada i efektivnog vremena poluraspada dana je relacijom:

$$\frac{1}{(T_{\frac{1}{2}})_e} = \frac{1}{(T_{\frac{1}{2}})_b} + \frac{1}{T_{\frac{1}{2}}} \tag{1.1}$$

U tablici 1.1 navedena su vremena poluraspada za neke izotope koji se koriste u nuklearnoj medicini.

Tablica 1.1: Vremena poluraspada za neke izotope koji se koriste u nuklearnoj medicini.

izotop	$T_{\frac{1}{2}}$	$(T_{\frac{1}{2}})_b$	$(T_{\frac{1}{2}})_e$
^{125}I	60 dana	156 dana	43,3 dana
^{123}I	13,3 h	4 h	0,075 h
^{99m}Tc	6 h	1,2 h	1 h
^{18}F	1,83 h	6 h	1,4 h

Izotopi koji se koriste u nuklearnoj medicini prikazani su u tablici 1.2:

[6] Broj raspada koji se u radioaktivnom izvoru dogodi u jedinici vremena – aktivnost izvora (A)

Tablica 1.2: Prikaz najčešćih izotopa koji se koriste u nuklearnoj medicini podijeljeni prema načinu proizvodnje.

Namjena	Proizvodnja u akceleratorima	Proizvodnja u reaktorima
Terapeutski izotopi	^{64}Cu,^{67}Cu,^{77}Br,^{88m}Br, ^{88}Y,^{89}Yr,^{103}Pd,^{111}In, ^{124}I,^{186}Re,^{211}At	^{32}P,^{47}Sc,^{60}Co,^{64}Cu, ^{89}Sr,^{90}Sr,^{90}Y,^{103}Pd, ^{103}Ru,^{106}Ru,^{109}Cd,^{109}Pd, ^{117m}Sn,^{115}Cd,^{125}I,^{131}I, ^{137}Cs,^{145}Sm,^{153}Sm,^{165}Dy, ^{166}Dy,^{166}Ho,^{169}Er,^{169}Yb, ^{180}Tm,^{175}Yb,^{177}Lu,^{186}Re, ^{188}Re,^{192}Ir,^{195m}Pt,^{198}Au, ^{199}Au,^{211}Au,^{213}Bi,^{225}Ac, ^{241}Am
Dijagnostički izotopi	^{11}C,^{13}N,^{15}O,^{18}F, ^{55}Fe,^{57}Co,^{61}Cu,^{64}Cu, ^{67}Ga,^{74}As,^{76}Br,^{81m}Kr, ^{82m}Rb,^{94m}Tc,^{97}Ru,^{111}In, ^{123}I,^{124}I,^{179}Ta,^{201}Tl	^{3}H,^{14}C,^{51}Cr,^{97}Ru, ^{99m}Tc,^{123}I,^{131}I,^{133}Xe, ^{153}Gd,^{195m}Pt

S obzirom na vrstu radioaktivnog raspada otvoreni radioaktivni izvori se dijele na:

- čiste γ emitere (^{99m}Tc, ^{111}In, ^{67}Ga, ^{123}I) koji se koriste u dijagnostici,
- pozitronske emitere (^{18}F) koji se koriste u dijagnostici,
- γ i β^- emitere (^{131}I) koji se koriste u dijagnostici i terapiji,
- čiste β^- emitere (^{32}P, ^{90}Y) koji se koriste u terapiji
- α emitere (^{211}At , ^{213}Bi, ^{223}Ra) koji se koriste u terapiji

1.3 Osnovne fizikalne veličine u dozimetriji ionizirajućeg zračenja

Zbog prirode svog posla neki su ljudi, zbog svog posla, izloženi većim količinama zračenja nego je to uobičajeno i zakonski propisano za pojedinog stanovnika. Po-

područje na kojem postoji mogućnost da pojedinac ili grupa ljudi bude izložena ionizirajućem zračenju iznad granice ozračenja propisane za pojedinog stanovnika naziva se područje izloženosti. Za osobu koja obavlja djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearne djelatnosti ili djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora postoji vjerojatnost da tijekom obavljanja tih djelatnosti bude ozračena iznad propisanih granica ozračenja za pojedinog stanovnika. Ta osoba se naziva izloženi radnik.

Izloženost ionizirajućem zračenju pacijenta tijekom primjene izvora ionizirajućeg zračenja u dijagnostičke ili terapijske svrhe naziva se medicinsko ozračenje. Izloženost djelatnika u medicini najzastupljenija je prilikom upotrebe radioizotopa u nuklearnoj medicini te intervencijskih postupaka uporabom rendgenskih i CT uređaja. Najčešće je u pitanju izloženost γ, rendgenskom i β zračenju, a rjeđe neutronima.

Veličine koje se koriste u dozimetriji ionizirajućeg zračenja dijele se na fundamentalne veličine te veličine koje se koriste u zaštiti od ionizirajućeg zračenja, a obuhvaćaju operativne veličine i zaštitne veličine. Fundamentalne veličine opisuju polje zračenja i njegovu interakciju s materijom. Fundamentalne veličine su: KERMA, apsorbirana doza D, linearni prijenos energije (LET), faktor kvalitete Q te dozni ekvivalent H.

KERMA[7] je kinetička energija nabijenih čestica oslobođenih upadnim zračenjem u elementu materijala mase dm. Mjerna jedinica kojom se izražava KERMA je grej, $Gy = \frac{J}{kg}$. Ukoliko se KERMA mjeri u zraku, označava se s K_a, a u vodi K_w i slično. KERMA u elementu mase dm se računa kao:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \tag{1.2}$$

Apsorbirana doza D je omjer srednje vrijednosti energije ionizirajućeg zračenja predane elementu materijala mase dm. Mjerna jedinica kojom se izražava apsorbirana doza je također grej Gy. Apsorbirana doza u elementu mase dm se računa kao:

$$D = \frac{dE}{dm} \tag{1.3}$$

[7] eng. Kinetic Energy Released per unit MAss

Linearni prijenos energije (LET[8]) je prosječna stopa gubitka energije zračenja nabijene čestice u mediju, odnosno, energija zračenja izgubljena po jedinici dužine putanje kroz materijal. Mjerna jedinica za LET je $\frac{J}{m}$, a često se koristi i $\frac{keV}{\mu m}$. Linearni prijenos energije računa se kao:

$$L = \frac{dE}{dl} \tag{1.4}$$

Faktor kvalitete Q je bezdimenzionalna veličina koja karakterizira biološke učinke zračenja. Faktor kvalitete se bazira na gustoći ionizacije duž puta nabijene čestice u tkivu. Tablica 1.3 prikazuje faktore kvalitete za različite vrste zračenja.

Tablica 1.3: Faktori kvalitete za različite vrste zračenja.

Tip zračenja R	**Radijacijski težinski faktor** W_R
fotoni	1
elektroni i muoni	1
protoni i nabijeni pioni	2
alfa čestice, fisijski fragmenti, teški ioni	20
neutroni	kontinuirana krivulja kao funkcija energije neutrona

Dozni ekvivalent H u točki tkiva je umnožak apsorbirane doze D u toj točki i faktora kvalitete Q za specifično zračenje:

$$H = D \cdot Q \tag{1.5}$$

Mjerna jedinica za dozni ekvivalent je sivert Sv.

Zaštitne veličine ekvivalentna doza i efektivna doza ne mogu se direktno mjeriti pa se zbog toga koriste operativne veličine. Operativne veličine se koriste za procjenu gornjih granica vrijednosti zaštitnih veličina koje su vezane za izlaganje ionizirajućem zračenju. Mjerna jedinica za operativne veličine je Sv. Razlikujemo operativne veličine za nadzor prostora te operativne veličine za osobni nadzor.

Operativne veličine za nadzor prostora su ambijentalni dozni ekvivalent ($H^*(10)$) i dozni ekvivalent smjera ($H'(0,07)$). Pomoću ovih veličina se procjenjuje koliku maksimalnu efektivnu odnosno ekvivalentnu dozu neka osoba koja se nalazi u polju

[8]eng. Linear Energy Transfer

zračenja, na mjestu gdje je provedeno mjerenje, može primiti u nekom periodu.

Operativne veličine za osobni nadzor su osobni dozni ekvivalenti $H_p(10)$, $H_p(3)$ i $H_p(0,07)$. Osobni dozni ekvivalent $H_p(10)$ služi za određivanje efektivne doze za cijelo tijelo, osobni dozni ekvivalent $H_p(3)$ služi za određivanje ekvivalentne doze za očnu leću, a osobni dozni ekvivalent $H_p(0,07)$ služi za određivanje lokalne doze za kožu ili ekstremitete od fotona ili elektrona (maksimalna vrijednost ekvivalentne doze za kožu, uprosječena preko $1cm^2$). Zaštitne veličine su zasnovane na prosječnoj apsorbiranoj dozi u volumenu ciljanog organa ili tkiva, od određenog tipa zračenja.

Ovisno o LET-u i faktoru kvalitete Q, različite vrste zračenja proizvode različite učinke na tkivo. Učinak određenog tipa zračenja (koje upada na tijelo ili unutar tijela) opisan je preko radijacijskog težinskog faktora. Ekvivalentna doza u tkivu T od zračenja vrste R, $H_{T,R}$ je umnožak srednje apsorbirane doze D_T u tkivu T i težinskog koeficijenta zračenja W_R:

$$H_{T,R} = D_T \cdot W_R \tag{1.6}$$

Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert (Sv).

S obzirom da zračenje ne djeluje jednako na sve vrste tkiva, uvodi se proračunom modificirana mjerena apsorbirana doza odnosno efektivna doza. Njome se izražava rizik od izlaganja ionizirajućem zračenju te se uzima u obzir različita biološka učinkovitost različitih vrsta ionizirajućeg zračenja te različita osjetljivost tkiva i organa s obzirom na ionizirajuće zračenje. Efektivna doza je zbroj umnožaka ekvivalentne doze u pojedinom tkivu T i odgovarajućeg težinskog koeficijenta pojedinog tkiva T, W_T:

$$E = \Sigma_T W_T \cdot H_T \tag{1.7}$$

Mjerna jedinica za efektivnu dozu je sivert, Sv.

W_T, težinski faktor za tkivo T je mjera osjetljivosti pojedinog tkiva na zračenje.

Ove vrijednosti težinskih faktora predstavljaju ukupni doprinos na pojedine organe i tkiva za štetu zračenja od stohastičkih učinaka (oni učinci koje se ne može predvidjeti već se može govoriti samo o vjerojatnosti da se učinak pojavi). Radiosenzitivnost je relativna osjetljivost stanica, tkiva, organa, organizama ili drugih tvari na djelovanje zračenja. Općenito, pronađeno je da je radiosenzitivnost stanica izravno proporci-

onalna brzini diobe stanica i obrnuto proporcionalna stupnju diferencijacije stanica. To znači da su aktivni dijelovi stanica ili oni koji nisu potpuno zreli najviše izloženi riziku od zračenja. Najviše radio-osjetljivih stanica su one koje:

- imaju visoku stopu dijeljenja
- imaju visoku razinu metabolizma
- su nespecijalizirane vrste
- dobro su prokrvljene

Težinski faktori za tkiva dani su u tablici 1.4:

Tablica 1.4: Težinski faktori za tkiva i organe prema ICRP [3].

Tkivo	W_T	ΣW_T
koštana srž, debelo crijevo, pluća, želudac, dojka, preostala tkiva*	0,12	0,72
gonade	0,08	0,08
mokraćni mjehur, jednjak, jetra, štitnjača, površina kosti, mozak	0,04	0,16
žlijezde slinovnice, koža	0,01	0,04
Ukupno		1,00
* preostala tkiva: žlijezde, ekstratorakalno područje, žučni mjehur, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišići, usna mucosa, gušterača, prostata, tanko crijevo, slezena, nadbubrežna žlijezda, maternica		

1.4 Zaštita od ionizirajućeg zračenja

1.4.1 Biološki učinci zračenja

Učinci ionizirajućeg zračenja na živu tvar razlikuju se ovisno o količini apsorbirane energije i o njenoj prostornoj raspodjeli. Biološki učinci zračenja dijele se na determinističke (nestohastičke) i stohastičke učinke. Deterministički učinci su posljedica gubitka velikog broja stanica nastalog primjenom velikih doza zračenja. Jačina im ovisi o ekvivalentnoj dozi, a vidljivi su ubrzo nakon zračenja. Da bi učinak bio vidljiv potrebna je određena doza zračenja (”prag zračenja”). Stohastički učinci su oni koje se ne može predvidjeti već se može govoriti samo o vjerojatnosti da se učinak pojavi.

Vjerojatnost nastanka tih promjena u organizmu ovisna je o efektivnoj dozi.
Osjetljivost pojedinog tkiva ovisi o diobi stanica u tom tkivu. Tako su na primjer, stanice koje grade mišićna, živčana i koštana tkiva slabo osjetljive na izloženost zračenju jer se gotovo nikad ne dijele. Međutim, stanice koje se neprestano dijele, poput matičnih stanica u krvotvornom tkivu i spolnim žlijezdama te stanice kože i sluznica, znatno su osjetljivije na ionizirajuće zračenje. Pri niskim dozama, koje čovjek svakodnevno prima od pozadinskog zračenja, stanice uglavnom brzo poprave štetu. Pri višim dozama, ozračena stanica može biti toliko oštećena da prestane normalno funkcionirati pa odumre. Genetski materijal unutar stanice (DNK[9]) može biti oštećen pa su buduće kopije stanice promijenjene. Trajno izmijenjene stanice mogu proizvoditi abnormalne stanice prilikom diobe te one, u pravim okolnostima, mogu postati kancerogene. Ukoliko je posljedica ozračenja mutacija DNK reproduktivnih stanica, mutacija se može, ali i ne mora očitovati kod potomstva izložene osobe.

1.4.2 Načela zaštite od ionizirajućeg zračenja

Tri su osnovna načela zaštite od ionizirajućeg zračenja:

- opravdanost
- optimizacija i
- ograničenje ozračenja

Svako izlaganje izvoru ionizirajućeg zračenja mora biti opravdano. To općenito znači da izloženost mora donijeti više koristi od potencijalne štete uzrokovane ozračenjem, također uzimajući u obzir sve prihvatljive zamjene.

Optimizacija znači da izloženost zračenju treba zadržati niskom koliko je razumski moguće postići (ALARA načelo) uzimajući u obzir različite gospodarske, tehničke, organizacijske i socijalne čimbenike.

Načelo ograničenja ozračenja provodi se osiguravanjem da doze koje prime pojedinci moraju biti ispod određenih granica, obično zakonski propisanih. Te zakonske granice postavljene su na način da se za primljene vrijednosti efektivne doze odnosno

[9]Deoksiribonukleinska kiselina je nukleinska kiselina u obliku dvostruke spiralne zavojnice. Sadrži genetske upute za specifični biološki razvoj staničnih oblika života i većine virusa - DNK

ekvivalentnih doza ispod granica ozračenja ne očekuju stohastički odnosno deterministički učinci na čovjeka. Prilikom ocjene štetnosti određene vrste zračenja treba uzeti u obzir da nisu sva tkiva podjednako osjetljiva na zračenje. Osim toga bitan je i način ozračenja odnosno, radi li se o ozračenju izvana ili o unutarnjem ozračenju koje nastaje kada je izvor zračenja progutan, udahnut ili je izvor zračenja implantiran u tijelo. Zakonske granice ozračenja prikazane su u Tablici 1.5:

Tablica 1.5: Zakonske granice ozračenja. [4]

zaštitna veličina	**izloženi radnici (stariji od 18 godina)**	**osobe na obuci i studenti (16-18 godina starosti)**	**pojedini stanovnik**
efektivna doza	20 mSv godišnje	6 mSv godišnje	1 mSv godišnje
ekvivalentna doza za očnu leću	20 mSv u jednoj godini ili 100 mSv u bilo kojih 5 uzastopnih godina	50 mSv	15 mSv
ekvivalentna doza za kožu, šake, podlaktice, stopala, gležnjeve	500 mSv u jednoj godini	150 mSv	50 mSv

1.5 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,
- obavještavanje 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 već ugrađen program za trenutni ili odgođeni izračun primljene doze te često mogućnost vremenske rezolucije izloženosti zračenju. Pasivni osobni dozimetri daju informaciju o ukupnoj primljenoj dozi, a očitava ih se naknadno. Ovoj skupini dozimetara pripadaju npr. film-dozimetri, termoluminiscentni dozimetri (TLD) te dozimetri na bazi optički stimulirane luminiscencije (OSL). Aktivni dozimetri prikazani su na slici 1.2, a pasivni dozimetri na slikama 1.3, 1.4 i 1.5.



Slika 1.2: Aktivni elektronički dozimetri. [5]



Slika 1.3: Film dozimetar. [6]



Slika 1.4: Termoluminiscentni dozimetar.



Slika 1.5: Dozimetar na bazi optički stimulirane luminiscencije. [7]

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

Slika 1.6 prikazuje način nošenja dozimetra u intervencijskoj radiologiji i kardiologiji. S obzirom da liječnik pri radu koristi zaštitnu olovnu pregaču, jedan dozimetar se nosi ispod zaštitne olovne pregače, jedan iznad (kako bi se procijenila doza na nezaštićene dijelove tijela), jedan na ovratniku za zaštitu štitnjače te jedan na naočalama (za mjerenje izloženosti očne leće).



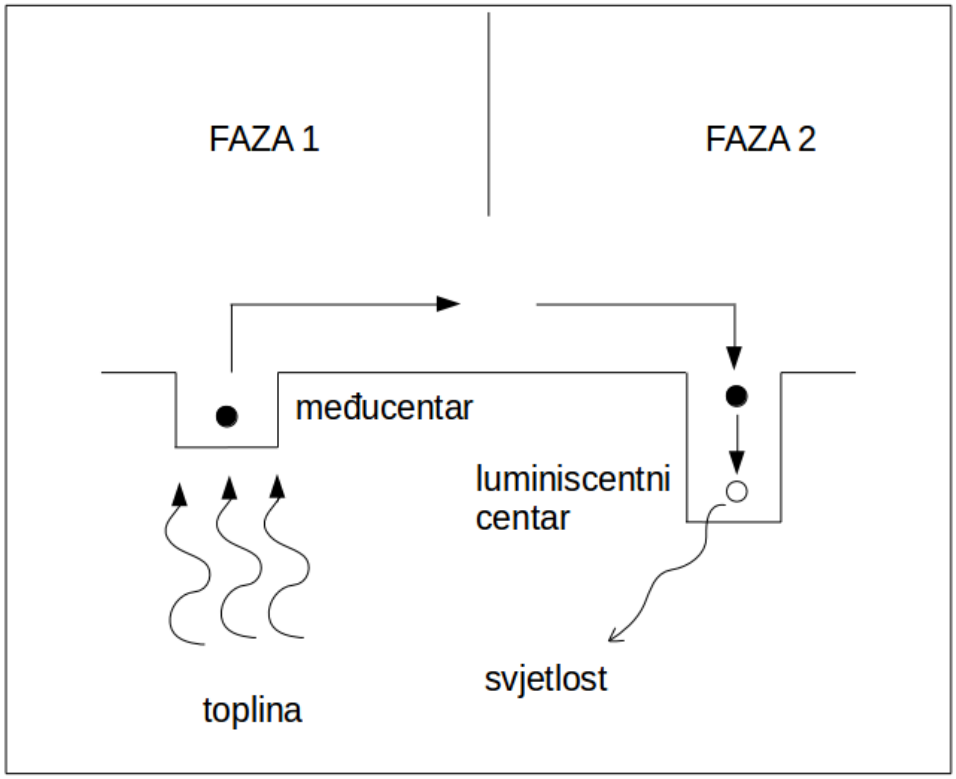
Slika 1.6: Način nošenja dozimetra u intervencijskoj radiologiji ili kardiologiji. [9]

2 TL dozimetrija

2.1 TL dozimetri

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 energetskih nivoa, ali elektroni mogu prelaziti iz valentne u vodljivu vrpcu. Prelaskom elektrona iz vod-

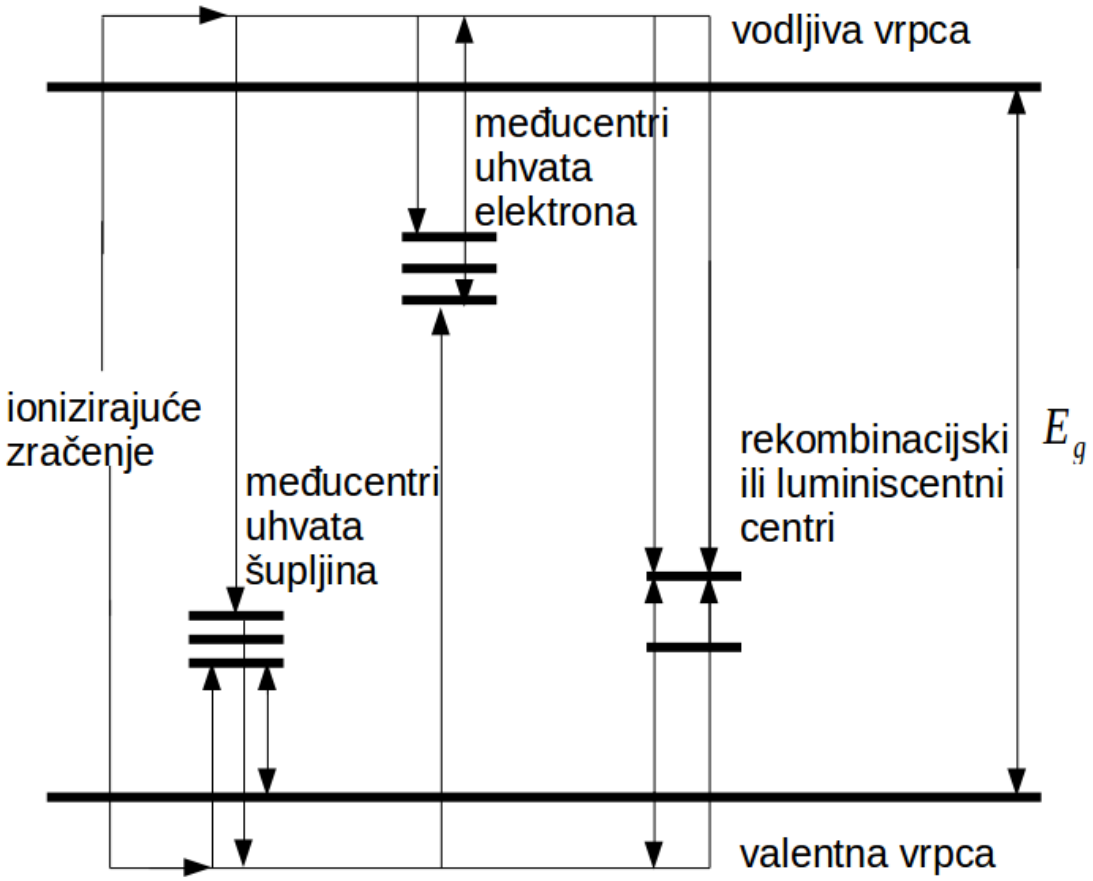
ljive u valentnu vrpcu nastaju slobodni elektroni te se ostavljaju slobodne šupljine. Prisustvo defekata i nečistoća u materijalu u zabranjenom prostoru između valentne i vodljive vrpce može prouzrokovati stvaranje novih, lokaliziranih energetskih nivoa. Priroda defekata i matične rešetke određuje položaj tih lokaliziranih energetskih nivoa. Neki od tih nivoa mogu postati međucentri uhvata elektrona ili šupljina odnosno traps (eng.). To se događa ukoliko neki od tih nivoa uhvate elektron ili šupljinu. Osim međucentara 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 međucentre uhvata i luminiscentne centre. Ukoliko je luminiscencija izazvana grijanjem odnosno termalnim pobuđenjem onda se radi o termoluminiscenciji (TL). Na slici 2.1 prikazan je shematski prikaz luminiscencije.



Slika 2.1: Shematski prikaz luminiscencije.

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 oslobađa se energija u obliku svjetlosti. 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 2.2:



Slika 2.2: Shematski prikaz termoluminiscencije.

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 ovisosti 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 materi-

jalu 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 očitanja 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 $H_P(10)$ i $H_P(0.07)$. Također, osim podataka o $H_P(10)$, ovi dozimetri mogu dati indikaciju 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.

2.2 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. Metoda je u postupku akreditacije prema normi HR EN ISO IEC 17025:2017.

Za provedbu osobne dozimetrije koriste se TL dozimetri tipa Panasonic UD-807ATN koji sadrže 1 element čiji je sastav i filtracija naveden u tablici 2.1:

Tablica 2.1: Karakteristike termoluminiscentnih dozimetara tipa Panasonic UD-807ATN.

kemijski sastav TL elementa	$^{n}Li_2B_4O_7$
prednja filtracija	nema
stražnja filtracija	nema
osjetljivost	β, γ
karakteristike	jedan TL čip dozimetar koji se pomoću specijalnog adaptera koristi za mjerenje doza na ekstremitetima

Serijski broj TL elementa ugraviran je s njegove prednje strane kao što se vidi na Slici 2.3.



Slika 2.3: Prsten dozimetar.

Ovisno o načinu rada i potrebama Kupca [10] odlučuje se o položaju nošenja prsten dozimetra (izbor prsta, ruke i orijentacija dozimetra) te se isto u formi dopisa preporučuje Kupcu.

TL dozimetri su osjetljivi na izlaganje znatno promijenjenim uvjetima okoliša. Stoga je potrebno spriječiti izlaganje dozimetara sunčevoj svjetlosti, prekomjernoj vlazi te grijaćim 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.

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) [11] 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 Kupcu. Za sve dozimetre korištene u ovom radu određeni su ECF-ovi te korišteni pri izračunu Hp(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 (kao što je prikazano na slici 2.4). 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.

[10] sukladno normi HRN EN ISO IEC 17025 korisnik usluge nazivs se Kupac



Slika 2.4: Postupak umetanja TL dozimetra u nosač za ozračivanje ili očitavanje.

Čitač TL dozimetara je u Sekundarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju (SSDL) umjeren za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta Hp(10) pa za mjerenje Hp(0,07) treba primijeniti kalibracijski faktor dobiven umjeravanjem u SSDL-u. Broj referentnih dozimetara za mjerenje Hp(0,07) (5 kom) se ozračuje u referentnim uvjetima u SSDL-u na „rod“ fantomu. Karakteristike fantoma propisane su prema normi ISO 4037-1:1996. Fantom je oblika štapa promjera 19 mm i dužine 300 mm, napravljen od PMMA. Fantom s referentnim dozimetrima se postavlja se na udaljenost veću od 2 m od izvora ^{137}Cs, pri čemu je ravnina dozimetra okrenuta prema izvoru okomito na upadni snop (kut upada 0^o). Dozimetri moraju biti izloženi homogenom polju zračenja, a uloga fantoma je da osigura povratno raspršenje zračenja koje odgovara raspršenju na prstu prilikom nošenja dozimetra. Dozimetri se očitavaju nakon 24h, a za umjeravanje se koristi srednja vrijednost ECF korigiranog očitanja 5 dozimetara.

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

U procesu izračuna Hp(0,07) mora se još uzeti u obzir korekcije vezane uz kutni i energijski odziv dozimetra te gubitak signala s vremenom (fading). Navedene korekcije izračunate su na temelju tipskog testiranja dozimetra u SSDL-u. Sve ove korekcije uključene su u jednadžbu za Izračun Hp(0,07)i na dozimetru i iz rezultata mjerenja:

$Hp(0,07) = k \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot ECF_i \cdot D_i$

k - kalibracijski faktor za TLD čitač za Hp(0,07) (0,486)

C_1 – korekcijski faktor za gubljenje signala na TL dozimetru (1,05)

C_2– korekcijski faktor za kutni i energijski odziv (1,1)

ECF_i– korekcijski faktor elementa dozimetra i

D_i – očitanje dozimetra i

Dozimetri se šalju Kupcu 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 očitanje dozimetara te izračun vrijednosti Hp(0,07) pojedinog dozimetra uporabom dozimetrijskog računalnog programa. Izračunata vrijednost Hp(0,07) koristi se za procjenu ekvivalentne doze za šake i kožu uporabom modela predloženog kao rezultat ORAMED projekta.

2.3 ORAMED model procjene ekvivalentne doze za kožu i šake

Analiza izvedena u FP6 CONRAD projektu istaknula je nedostatak sustavne analize podataka o izloženosti osoblja u intervencijskoj radiologiji (IR) i nuklearnoj medicini (NM). ORAMED (Optimization of RAdiation protection for MEDical staff) projekt je projekt suradnje financiran 2008. godine u okviru 7. okvirnog programa EU, Euratom programa za istraživanje i obuku u nuklearnom sektoru. Cilj ovog projekta bio je optimizacija radnih postupaka u području medicine s obzirom na zaštitu od zračenja. 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.

ORAMED projekt bio je strukturiran u 5 radnih paketa:

- Dozimetrija ekstremiteta i očne leće u IR (intervencijska radiologija) i IC (intervencijska kardiologija);
- Razvoj praktične dozimetrije očne leće;
- Optimizacija korištenja APD-a[11] u IR i IC;
- Dozimetrija ekstremiteta u nuklearnoj medicini;
- Obuka i diseminacija.

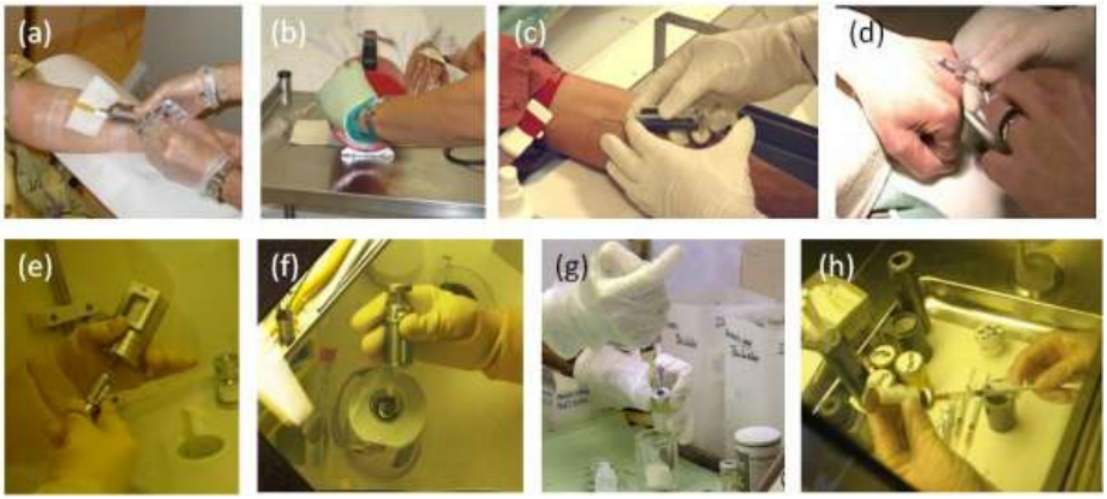
Postojalo je vrlo malo podataka o raspodjeli izloženosti duž šake osobe koja rukuje otvorenim radioaktivnim izvorima u nuklearnoj medicini. Iz tog je razloga napravljen veliki broj mjerenja s dozimetrima postavljenim na različita mjesta na šaci osoba koji rade u nuklearnoj medicini. Rezultati mjerenja su obrađivani korištenjem statističkih modela i Monte Carlo simulacija te su određeni faktori za izračun ekvivalentne doze ovisno o položaju nošenja dozimetra. Također je istraživan 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. Ukoliko ta mjerenja nije moguće provesti, preporučeni položaj za rutinsko praćenje ekstremiteta u nuklearnoj medicini je baza kažiprsta nedominantne ruke s detektorom dozimetra smještenog prema unutrašnjosti ruke (prema dlanu);
- Kako bi se procijenila maksimalna doza, očitavanje dozimetra kojeg je osoba nosila na dnu kažiprsta nedominantne ruke treba korigirati faktorom 6.;

[11] active personal dosemeter-APD

- Zaštita bočica i štrcaljki je neophodna. Ovo je preduvjet, ali ne i jamstvo niske izloženosti;
- 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. Rukovanje radioaktivnim izvorima u nuklearnoj medicini je prikazano na slici 2.5:

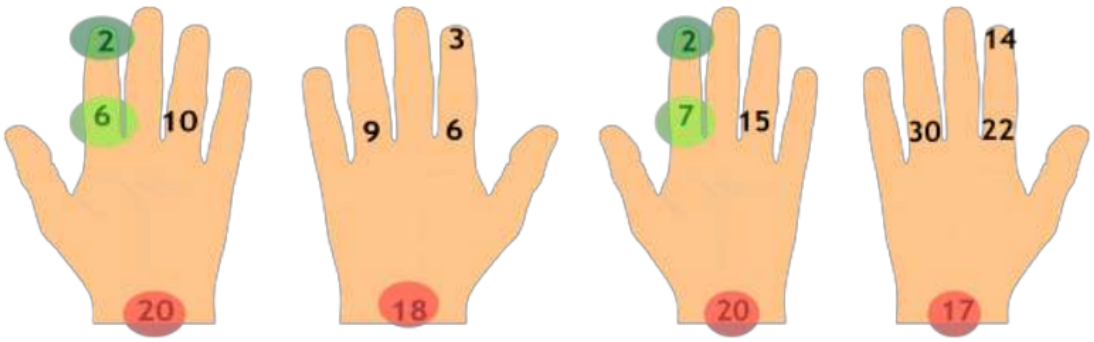


Slika 2.5: Pravilno rukovanje otvorenim radioaktivnim izvorima prilikom kojeg se koristi adekvatna zaštita (a,b,e,f) te loše rukovanje s neadekvatnom zaštitom (c,d,g,h). [10]

U svakodnevnoj praksi pri pripremanju i primjeni radiofarmaka, aplikacije radiofarmaka pacijentu, nije poznato koji dio ruke prima najveću dozu. Uz to, raspodjela doze može varirati tijekom jednog procesa. Iz slike 2.5 je vidljivo da su prsti praktički u dodiru sa spremnicima u kojima se nalaze radioaktivni izvori. Osoblje može biti izloženo i visokim dozama te prekoračiti godišnje dozno ograničenje za kožu od 500

mSv. Stoga su iznimno bitne odgovarajuće sigurnosne mjere uključujući ekstremno praćenje osoblja.

Izmjerene vrijednosti $Hp(0,07)$ koriste se za procjenjivanje ekvivalentne doze za kožu i šake prema modelu predloženom u sklopu ORAMED projekta. Iz slike 2.6 je vidljivo kako postoji velika razlika u vrijednostima koeficijenata dobivenim za dijagnostičke i terapijske postupke. Iz tog je razloga jako bitno da se dozimetar nosi na točno propisanom mjestu na ruci.



Slika 2.6: Faktori za izračun maksimalne doze u odnosu na dozu izmjerenu na određenim položajima za dijagnostičke postupke (lijevo) i terapijske postupke (desno). [10]

3 Eksperiment

Prsten dozimetri podijeljeni su osoblju koje radi u nuklearnoj medicini (NM) i laboratorijskoj dijagnostici (LD).

U laboratorijskoj dijagnostici se otvoreni radioaktivni izvori koriste kao markeri različitih molekula za radioimunološke (RIA) analize, imunoradiometrijske analize, in vitro testove u dijagnostici različitih bolesti (štitnjača, tumorske bolesti) i sl. Vrste izotopa koji se koriste u nuklearnoj medicini kliničkog bolničkog centra u kojem su provedena dozimetrijska mjerenja su: ^{125}I, ^{123}I, ^{99m}Tc, ^{18}F.

Na odjelu laboratorijske dijagnostike rade zdravstveni tehničari laboranti te biolozi, a na odjelu nuklearne medicine prvostupnici radiološke tehnologije, medicinske sestre te zdravstveni tehničari laboranti.

Djelatnici su dobili upute o načinu nošenja prsten dozimetra. Način nošenja prikazan

je na slici 3.1. Dozimetre je bilo potrebno nositi na kažiprstu nedominantne ruke okrenutog prema dlanu (NM) ili na kažiprstu ruke koja je bliža radioaktivnom izvoru (LD).



Slika 3.1: Položaj nošenja prsten dozimetra za dešnjake.

Vrijednosti $H_p(0.07)$ mjereni su svaki mjesec u periodu od godine dana. Prilikom obrade podataka za ovaj diplomski rad osobni podaci djelatnika (ime i prezime) bili su anonimizirani na način da je umjesto imena korištena šifra. Poznate su bile jedino struke pojedinih djelatnika koji rade u nuklearnoj medicini i laboratorijskoj dijagnostici.

4 Rezultati

Izmjerene vrijednosti $H_p(0.07)$ uz pripadno radno mjesto prikazane su u tablicama 4.1 i 4.2:

Tablica 4.1: Izmjerene vrijednosti za djelatnike na odjelu laboratorijske dijagnostike.

Odjel laboratorijske dijagnostike													
redni broj izloženog radnika	**radno mjesto**	**mjesec**											**ukupno**
		1.	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**	**6.**	**7.**	**8.**	**9.**	**10.**	**11.**	**12.**	
		$H_p(0,07)/mSv$												
1.	**medicinski tehničar laborant**	1.2	0.0	3.8	1.1	1.5	1.7	0.7	3.0	2.2	3.8	0.6	0.0	19.6
2.		3.0	0.0	0.8	0.0	1.0	2.3	0.4	2.1	2.9	0.7	1.6	2.3	17.1
3.		0.0	0.6	0.0	5.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	5.0	11.3
4.		1.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.5	0.0	0.0	6.2	10.6
5.		4.1	2.6	7.5	8.9	2.5	10.8	3.0	0.0	35.3	2.6	3.4	2.7	83.4
6.		2.2	0.2	0.8	1.2	0.5		0.6	0.0	3.3	2.0	0.6	4.5	15.9
7.		1.0	0.0	1.0	1.0	1.1	1.8	0.4	1.2	8.0	0.9	1.3	9.6	27.3
8.		0.2	0.2	3.5	4.7	1.2	3.9	0.0	6.8	5.2	11.8	0.0	5.4	42.9
9.		5.3	2.9	16.1	9.2	0.0	12.0	1.3	5.4	0.0	12.6	3.0	1.8	69.6
10.		0.0	1.2	2.1	0.5	4.1	0.0	0.8	0.2	1.3	2.6	1.3	1.6	15.7
11.		1.7	4.6	9.8	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.7
12.		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13.		11.8	0.0	4.2	0.0	2.5	1.1	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	21.7
14.		0.7	6.7	0.0	0.0	0.0								7.4
15.		3.6	2.2	0.0	2.5	0.6	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	13.0
16.		0.9	0.0	1.2	3.2	0.6	0.0	2.2	0.0	1.8	3.6	4.7	1.4	19.6
17.	**biolog**	2.9	0.0	6.1	1.3	1.1	0.0	1.8	0.0	3.6	0.0	1.5	3.8	22.1
18.		1.3	3.2	0.3	0.0	1.8	0.5	1.5	1.1	3.1	2.7	2.0	6.1	23.6

Tablica 4.2: Prikupljeni podaci za djelatnike na odjelu nuklearno medicinske dijagnostike.

Odjel za nuklearno medicinsku dijagnostiku														
redni broj izloženog radnika	**radno mjesto**	**mjesec**												**ukupno**
		1.	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**	**6.**	**7.**	**8.**	**9.**	**10.**	**11.**	**12.**	
		$H_p(0,07)/mSv$												
1.	**prvostupnik radiološke tehnologije**	0.5	4.2	0.0	0.0	27.1	0.3	0.5	13.8	2.4	16.3	0.5	0.0	65.6
2.		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0				0.0
3.		0.2	1.7	2.1	0.0	0.8	0.0	1.4	0.0	0.4	2.1	0.0	0.0	8.7
4.		0.0	0.6	0.0	0.0	0.3	1.1	0.8	0.3	0.0	2.0	0.4	0.0	5.5
5.		0.3	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.6	3.6
6.		1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4
7.		0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
8.														0.0
9.		0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.1
10.		0.2	2.1	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0		5.9
11.	**tehničar**	0.5	0.3	0.0	1.1	0.0	1.1	0.0	0.0	1.0	0.0			4.0
12.	**laborant**	0.0	0.3	0.5	3.0	0.2	2.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	1.3	8.2
13.	**medicinska**	3.6	0.3	1.3	0.5	0.0	0.0	0.5	0.3		2.0	0.0	2.5	11.0
14.	**sestra**	0.9	0.3	0.0	1.1	0.0	1.1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	2.0	6.4

Mjesta u tablicama 4.1 i 4.2 gdje nema broja znače da dozimetar nije vraćen na očitanje. Razlog nevraćanja dozimetra je zato što je izgubljen ili je oštećen na način da ga nije bilo moguće očitati.

Ukupni $H_p(0.07)$ pomnožen je s faktorom 6 jer taj faktor odgovara modelu predloženom u sklopu ORAMED projekta za procjenjivanje ekvivalentne doze za kožu i šake za dijagnostičke postupke. Ekvivalentne doze za šake i kožu dobivene iz mjernih podataka za pojedinog djelatnika unutar godinu dana, prikazane su u tablicama 4.3 i 4.4:

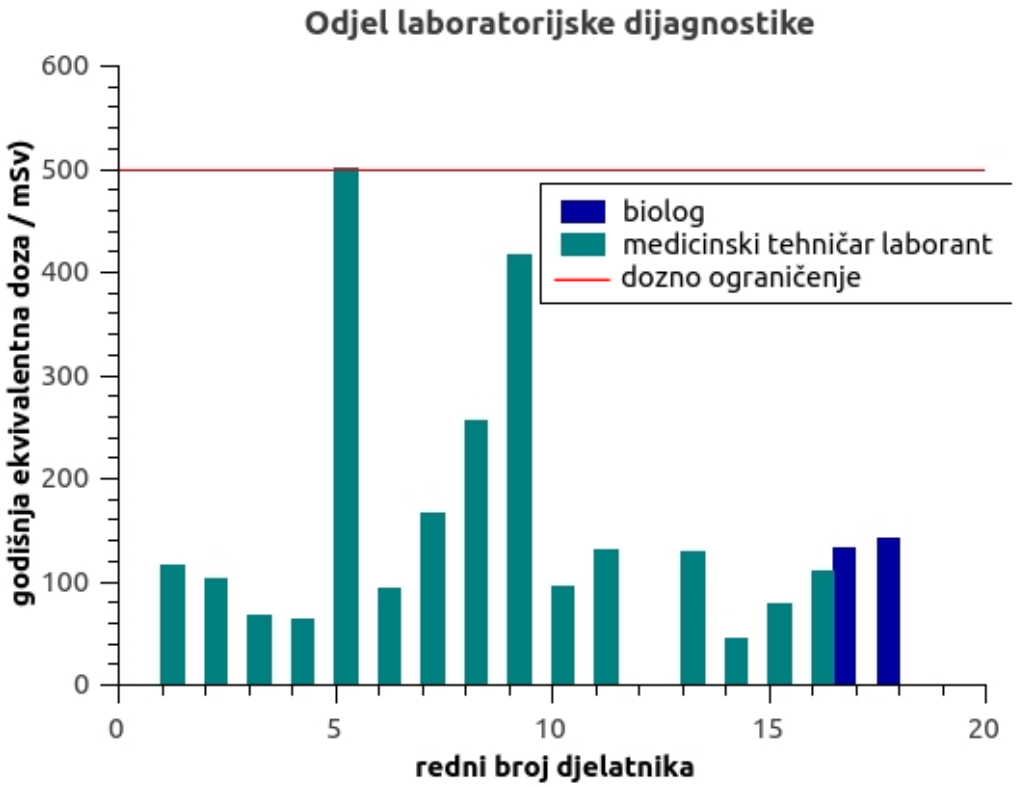
Tablica 4.3: Vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu u jednoj godini za izložene radnike na odjelu laboratorijske dijagnostike.

Odjel laboratorijske dijagnostike			
redni broj	**radno mjesto**	**ukupno** $H_p(0.07)$ $[mSv]$	**ekvivalentna doza** $[mSv]$
1.	**medicinski tehničar laborant**	19.6	117.6
2.		17.1	102.6
3.		11.3	67.8
4.		10.6	63.6
5.		83.4	500.4
6.		15.9	95.4
7.		27.3	163.8
8.		42.9	257.4
9.		69.6	417.6
10.		15.7	94.2
11.		21.7	130.2
12.		0	0
13.		21.7	130.2
14.		7.4	44.4
15.		13.0	78.0
16.		19.6	117.6
17.	**biolog**	22.1	132.6
18.		23.6	141.6

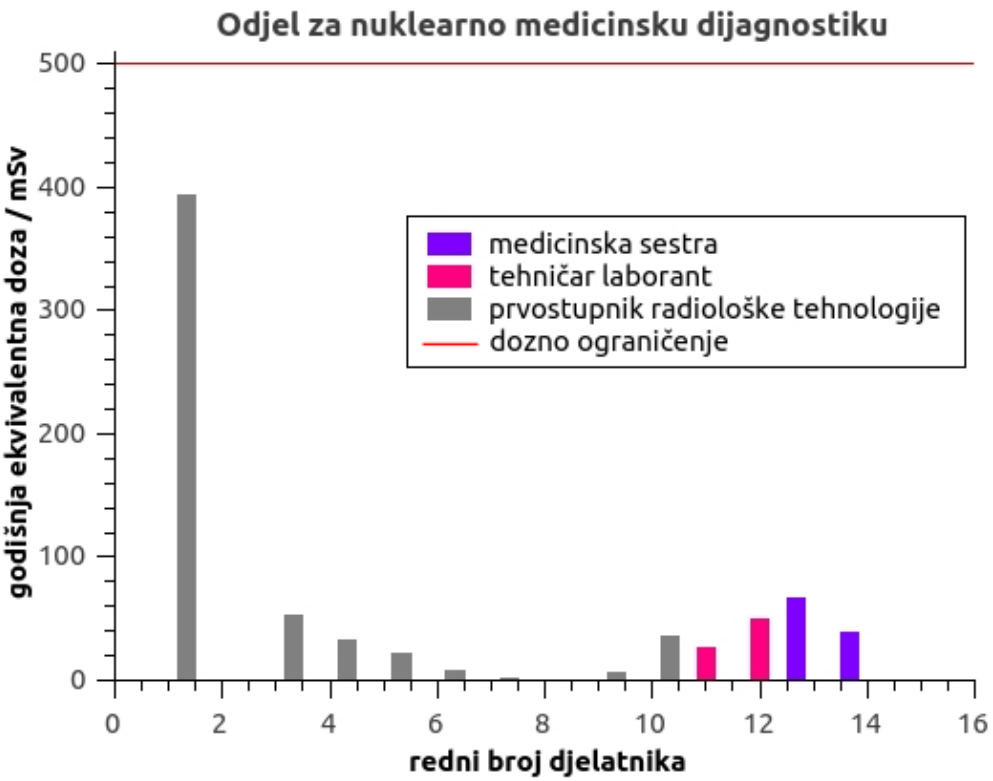
Tablica 4.4: Vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu u jednoj godini za izložene radnike na odjelu za nuklearno medicinsku dijagnostiku.

Odjel za nuklearno medicinsku dijagnostiku			
redni broj	**radno mjesto**	**ukupno** $H_p(0.07)$ $[mSv]$	**ekvivalentna doza** $[mSv]$
1.	**prvostupnik radiološke tehnologije**	65.6	393.6
2.		0	0
3.		8.7	52.2
4.		5.5	33.0
5.		3.6	21.6
6.		1.4	8.4
7.		0.3	1.8
8.		0	0
9.		1.1	6.6
10.		5.9	35.4
11.	**tehničar laborant**	4.0	24.0
12.		8.2	49.2
13.	**medicinska sestra**	11.0	66.0
14.		6.4	38.4

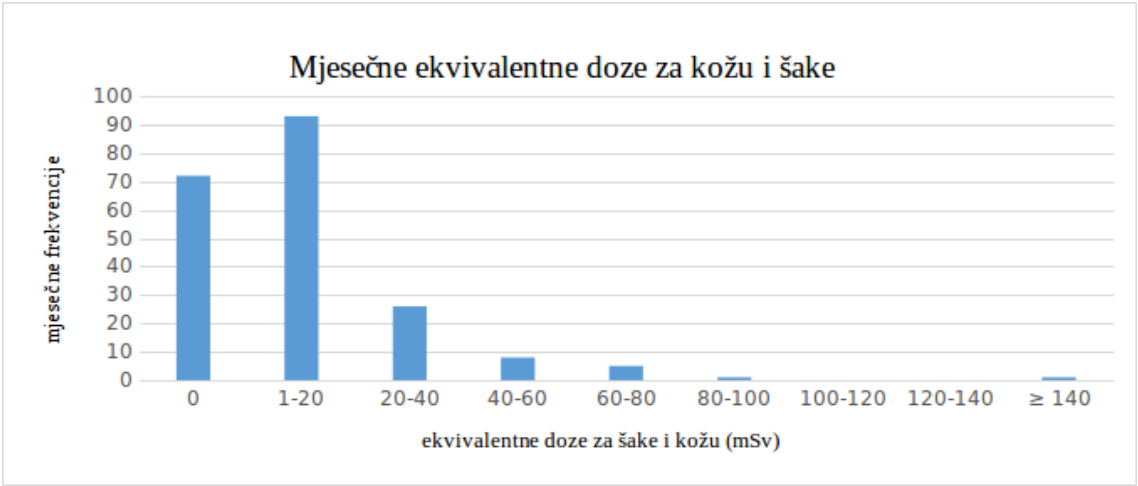
Na slikama 4.1 i 4.2 prikazana je ekvivalentna doza za pojedinog djelatnika dobivena prethodnim izračunima. Crvena linija označava godišnje dozno ograničenje.



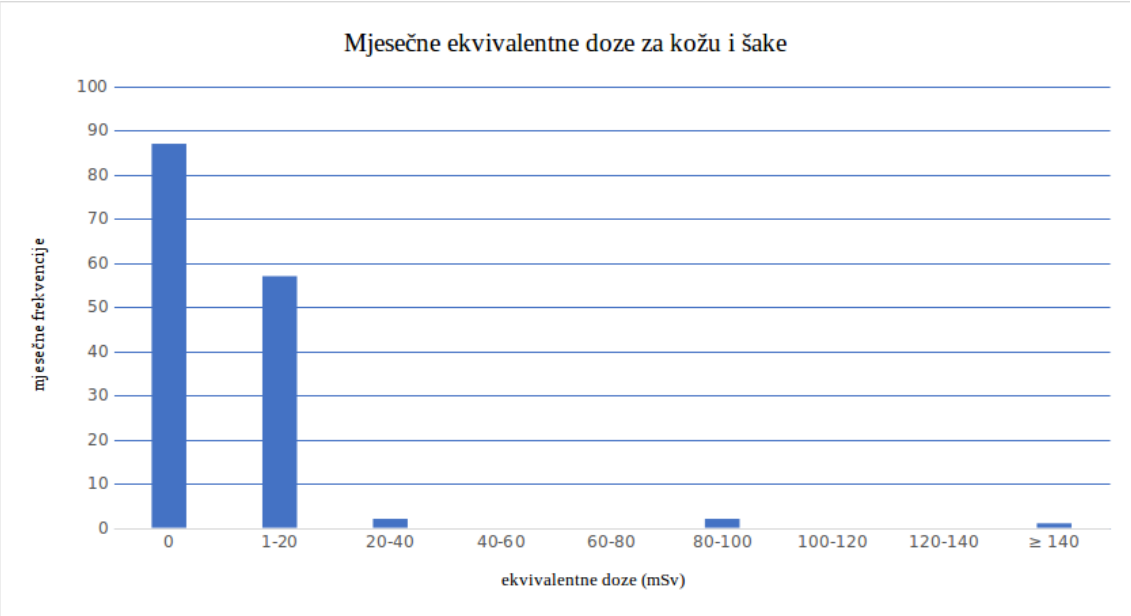
Slika 4.1: Godišnja ekvivalentna doza za pojedinog djelatnika na odjelu laboratorijske dijagnostike.



Slika 4.2: Godišnja ekvivalentna doza za pojedinog djelatnika na odjelu za nuklearno medicinsku dijagnostiku.

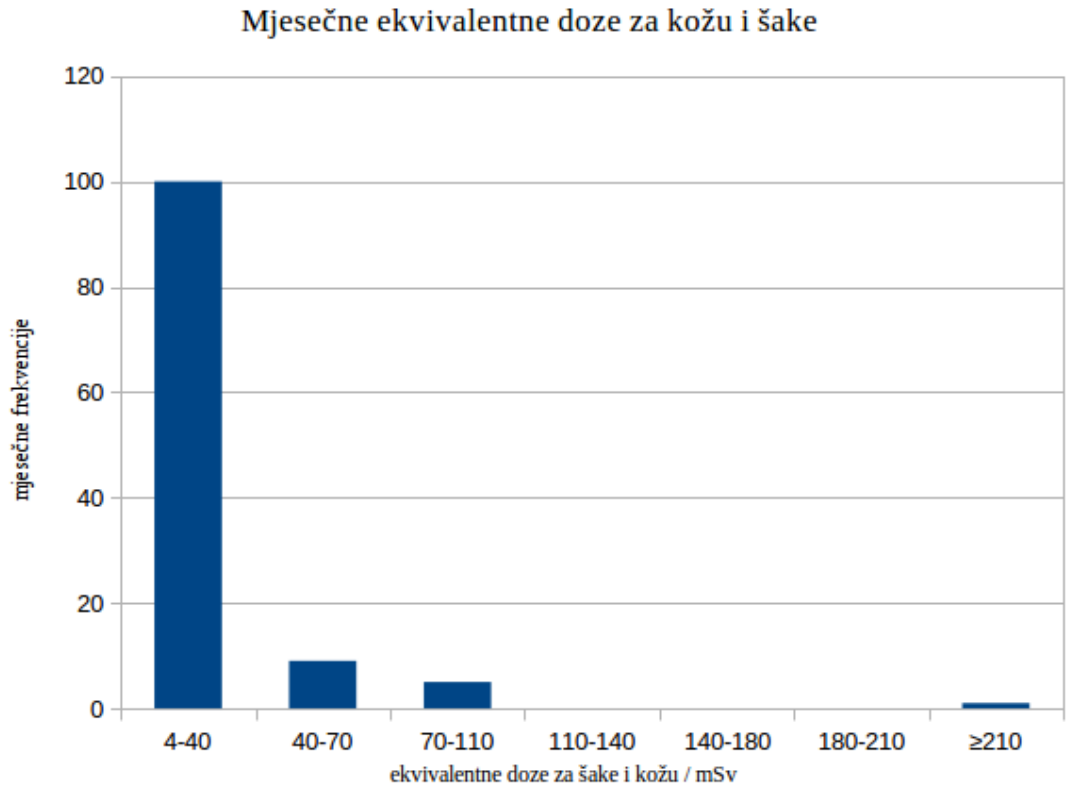


Slika 4.3: Raspodjela broja mjesečnih ekvivalentnih doza za kožu i šake u laboratorijskoj dijagnostici.

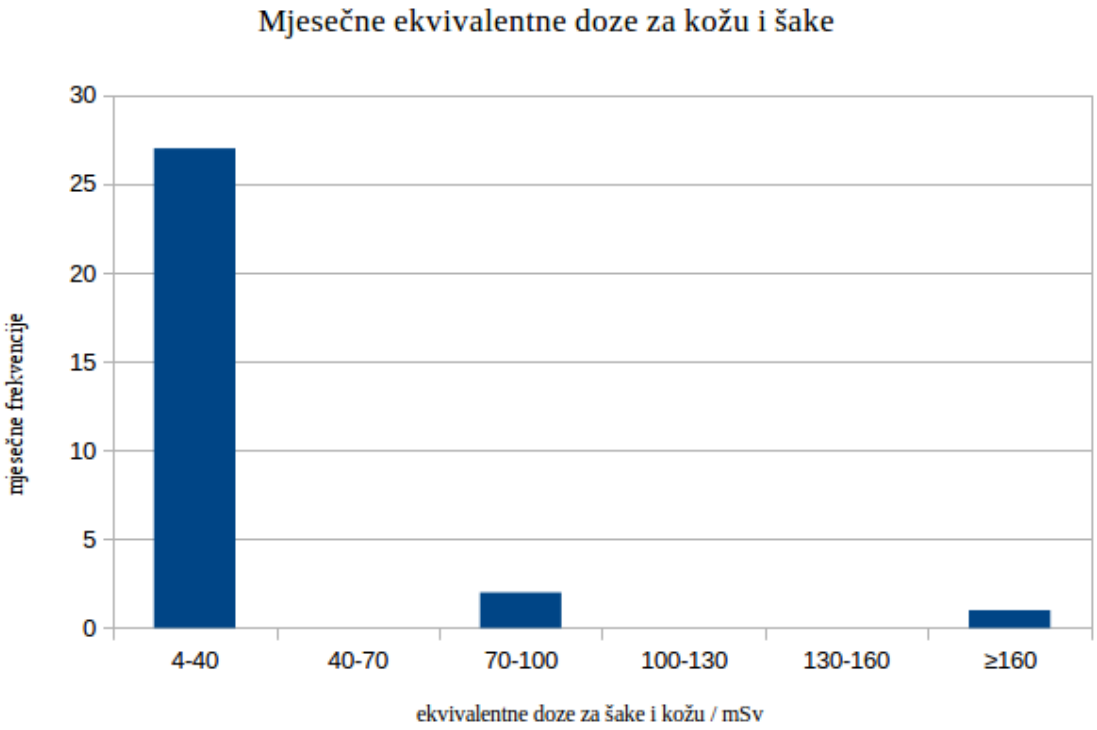


Slika 4.4: Raspodjela broja mjesečnih ekvivalentnih doza za kožu i šake u medicinskoj dijagnostici.

Ukoliko podijelimo godišnju granicu ($500\ mSv$) na 12 mjeseci, dobije se $4,167\ mSv$ odnosno $4,2\ mSv$. To je vrijednost ispod koje se, zakonski propisano, doze bilježe kao nula. Slike 4.18 i 4.19 prikazuju grafove u kojima su promatrane samo doze iznad $4.2\ mSv$.



Slika 4.5: Raspodjela broja mjesečnih ekvivalentnih doza za kožu i šake u laboratorijskoj dijagnostici iznad $4.2\ mSv$.



Slika 4.6: Raspodjela broja mjesečnih ekvivalentnih doza za kožu i šake u medicinskoj dijagnostici iznad $4.2\ mSv$.

S obzorom da je većina rezultata u laboratoriskoj dijagnostici i u nuklearnoj dijagnostici unutar grupe doza $4 - 40\ mSv$ izračunati su medijan i srednja vrijednost za tu grupu doza.
Ostali rezultati se mogu smatrati izoliranim slučajevima.

Tablica 4.5: Srednja vrijednost i medijan za grupe doza $4 - 40\ mSv$ za laboratorijsku dijagnostiku i medicinsku dijagnostiku.

	laboratorijska dijagnostika	**medicinska dijagnostika**
srednja vrijednost / mSv	15.44	11.23
medijan / mSv	13	10.5

Na temelju izračunatih srednjih vrijednosti i 11 mjeseci rada godišnje procijenjena je godišnja efektivna doza. Pretpostavka je da zaposlenik uvijek obavlja iste poslove s istim radnim opterećenjem te da je prosječno jednako ozračen svaki mjesec. Iz svega

prethodno navedenog prosječna godišnja ekvivalentna doza u LD bila bi $170\ mSv$, a u NM bila bi $123\ mSv$.

5 Zaključak

Cilj provedbe ovih mjerenja bio je osim određivanja izloženosti i utvrditi koliko su djelatnici u medicini redoviti u uporabi dozimetra te osvijestiti važnost provedbe mjerenja u svrhu provedbe optimizacije ukoliko je potrebno te na taj način smanjiti izloženost djelatnika ionizirajućem zračenju.

Dobiveni rezultati ukazuju na to da kod većine djelatnika na odjelu laboratorijske dijagnostike i na odjelu za nuklearno medicinsku dijagnostiku ekvivalentna doza ne prelazi godišnje dozno ograničenje. Međutim, na odjelu laboratorijske dijagnostike zabilježeno je da kod jednog medicinskog tehničara laboranta ekvivalentna doza prelazi dozno ograničenje. Na odjelu za nuklearno medicinsku dijagnostiku jedan prvostupnik radiološke tehnologije znatno odstupa od ostalih djelatnika. Ovakav rezultat može ukazivati na to da ostali djelatnici ili nisu redovito nosili dozimetre pa za njih nisu prikupljeni svi podaci ili ovaj djelatnik obavlja većinu posla pri kojem je veća izloženost ionizirajućem zračenju.

Najveći problem predstavlja nenošenje dozimetara. Bez pravilne provedbe mjerenja nije moguće dati realne procjene izloženosti niti provesti optimizaciju izloženosti. Pojedini djelatnici nosili su dozimetre prvih nekoliko mjeseci i tada su zabilježeni brojčani podaci, međutim, kasnije su zabilježene nule što ukazuje na to da su vrlo vjerojatno prestali nositi dozimetar, a nastavili su raditi na isti način. Isto tako pojedini djelatnici nisu u potpunosti prestali nositi dozimetre, ali su na primjer jedan mjesec nosili, a drugi mjesec nisu čime je vrlo vjerojatno još nekoliko djelatnika prešlo dozno ograničenje. S obzirom na dobivene rezultate potrebno je provesti optimiraciju izloženosti.

Optimizacija izloženosti uključuje:

- preraspodjelu posla na način da se smanje individualne doze, ali istovremeno ne povećaju kolektivne doze,
- analizu radnih postupaka i uvođenje promjena koje će rezultirati nižim dozama zaposlenika
- uporabu novih ili do sada slabo korištenih zaštitnih sredstava, itd.

Većina postupaka uključenih u optimizaciju često iziskuje uključenje stručnjaka, vri-

jeme i znatna materijalna sredstva te prije njihove primjene treba dobro poznavati izloženost djelatnika. S obzirom da je uočeno da najveći problem predstavlja nedostatak motivacije za redovnu i pravilnu uporabu osobnih dozimetara potrebno je provesti edukaciju i motiviranje djelatnika odjela NM i LD u smislu podizanja razine razumijevanja što dozimetrija jest, osobito u smislu prepoznavanja loše prakse, te uloge dozimetrijskog nadzora u zaštiti pojedinca i smanjenju izloženosti zračenju odnosno prevenciji negativnih učinaka ionizirajućeg zračenja na zdravlje. Rezultati ovih mjerenja biti će predstavljeni u sklopu predavanja koja će se održati u ova dva odjela. Po provedenom predavanju i edukaciji nastaviti će se provoditi dozimetrijski nadzor uporabom prsten dozimetara, ocijeniti učinci edukacije te ako je nužno istu ponoviti.

Dodaci

Primjena u nastavnom procesu

Otkriće radioaktivnosti bilo je prvo važno otkriće koje je izravno povezano s procesima u atomskoj jezgri. Fenomen radioaktivnosti je 1896. otkrio francuski fizičar Antoine Henri Becquerel (1852. - 1908.). U studenome 1895. Wilhelm Conrad Rontgen (1845. - 1923.) otkrio je x-zrake (rendgensko zračenje). Kasnije se spoznalo da su rendgenske zrake vrlo prodorni elektromagnetski valovi velikih frekvencija te nastaju naglim zaustavljanjem brzih elektrona na meti. U Rontgenovu eksperimentu elektroni su u katodnoj cijevi udarali u stijenku. Posljedica tog udaranja bila je nastanak x-zraka i fluorescencija na stijenci odnosno zračenja svjetlosti za vrijeme osvjetljavanja. S obzirom da se Becquerel bavio istraživanjem fluorescencije pokušao je utvrditi postoji li neka veza između x-zraka i fluorescencije. U eksperimentu je pokrio fotografsku ploču tamnim neprozirnim papirom, na papir je stavio fluorescentni materijal i sve to ostavio na Sunčevoj svjetlosti. Razvijanjem fotografske ploče pokušao je utvrditi djelovanje x-zraka na ploču. Nakon nekoliko negativnih rezultata, za uzorak je uzeo kristale uranovog spoja. Sada je na fotografskoj ploči dobio slike kristala. Na temelju pokusa Becquerel je pomislio da uran upija Sunčevu svjetlost te potom zrači X-zrake koje detektira fotografska ploča. Kada je sljedeći put išao ponoviti pokus bilo je oblačno te je sav postav pospremio u ormar i odlučio pričekati. Na njegovo iznenađenje ponovnim razvijanjem slika uočio je jasnu sliku uranovih kristala nastalu bez izlaganja Sunčevoj svjetlosti. Tako su otkrivene Becquerelove zrake. One nastaju spontano, bez prikapčanja na električne uređaje i bez posebne obrade uzoraka. Becquerelje također ustanovio da na ovo zračenje ne utječu uobičajene promjene fizikalnih uvjeta. 1897. godine Marie Curie-Sklodowska (1867. - 1934.) i Pierre Curie (1859. - 1906.) otkrili su da i element torij Th zrači iste zrake. Time je pokazano kako ovo zračenje nije posebna karakteristika urana. Ovu su pojavu prozvali radioaktivnost. 1899. godine Ernest Rutherford je otkrio da uzorak urana emitira najmanje dvije različite vrste zraka. Prozvao ih je alfa i beta zrakama. 1900. godine francuski fizičar P. Villard je otkrio i treću vrstu zraka, gama zrake.

Nastavna jedinica Radioaktivnost obrađuje se u 4. razredu srednje škole kao dio

cjeline Atomske jezgre i elementarne čestice. Učenici su prije ove nastavne jedinice upoznati sa strukturom atomske jezgre i detektorima čestica. Nastavne jedinice se izvode na interaktivan i istraživački način. Interaktivan način podrazumijeva interakciju između profesora i učenika te interakciju učenika međusobno. Ovakav pristup omogućuje učenicima aktivno sudjelovanje u nastavi, a time i veću učinkovitost nastave. Interaktivne metode uključuju razrednu raspravu, konceptualna pitanja s karticama, kooperativno rješavanje zadataka u manjim skupinama, interaktivno izvođenje pokusa te računalne interaktivne metode. Istraživački usmjerenom nastavom učenici samostalno razvijaju konceptualne i matematičke modele, a nastavnik ih usmjerava i pomaže. Na taj način učenici razvijaju kritičko mišljenje i logičko zaključivanje te eksperimentalne vještine. Učenici u istraživački usmjerenoj nastavi traže odgovore na znanstvena pitanja, formuliraju i testiraju hipoteze, osmišljaju i provode pokuse, samostalno zapisuju svoja predviđanja, opažanja i zaključke te prezentiraju drugima svoje rezultate i argumentirano ih brane. Ukoliko učenici u potpunosti samostalno istražuju to se naziva otvoreno istraživanje. Ovakav pristup je dobar kod naprednijih malih grupa i za projekte. Glavni oblik istraživanja u razredu je vođeno istraživanje pri kojem nastavnik usmjerava i vodi učenike. Nastavna jedinica Radioaktivnost izvest će se na interaktivan i istraživački način. Razrednom raspravom doći će se do zaključaka pojedinih pokusa, a konceptualnim pitanjima s karticama i kooperativnim rješavanjem zadataka u manjim skupinama provjerit će se ostvarenost obrazovnih ishoda. Koristit će se simulacije kako bi se moglo doći do zaključaka pokusa koji nisu izvedivi u razredu.

5.1 Priprema za nastavni sat - Radioaktivnost

Ova priprema pisana je za četvrti razred gimnazije ili tehničke škole s četverogodišnjim programom fizike. Predviđeno vrijeme za ovu nastavnu jedinicu je jedan školski sat. Učenici su upoznati s načinom rada elektroskopa te s pojmom ionizacije.
Obrazovni ishodi:

- opisati pojavu radioaktivnosti
- opisati vrste radioaktivnog zračenja

- objasniti od kojih se čestica sastoje alfa i beta zrake
- objasniti ionizacijsko djelovanje radioaktivnog zračenja
- opisati metode zaštite od ionizirajućeg zračenja
- opisati princip rada Geiger Mullerovog brojača
- razvijati sposobnosti usmenog i pisanog izražavanja.
- razvijati znanstveno zaključivanje i logičko razmišljanje

Odgojni ishodi:

- izražavanje vlastitog mišljenja
- uvažavanje tuđeg mišljenja
- razvijanje demokratičnosti
- razvijanje parlamentarnosti
- razvijanje interesa za znanost

5.1.1 Tijek nastavnog sata

Uvodni dio (otvaranje problema, prikupljanje ideja, upoznavanje pojave)

Uvodni problem: **Becquerelov pokus**
Francuski znanstvenik Henri Becquerel je 1896. godine istraživao djelovanje Sunčevog zračenja na kemijski spoj u čijem sastavu ima urana. Ispod spoja je u crnom papiru bila zamotana fotografska ploča (Slika 5.1).



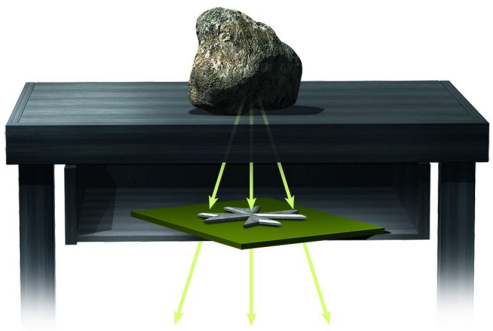
Slika 5.1: Uzorak u čijem sastavu ima urana postavljen na papir u kojem je zamotana fotografska ploča. [12]

Slika 5.2 prikazuje sliku koju je Becquerel dobio nakon razvijanja.

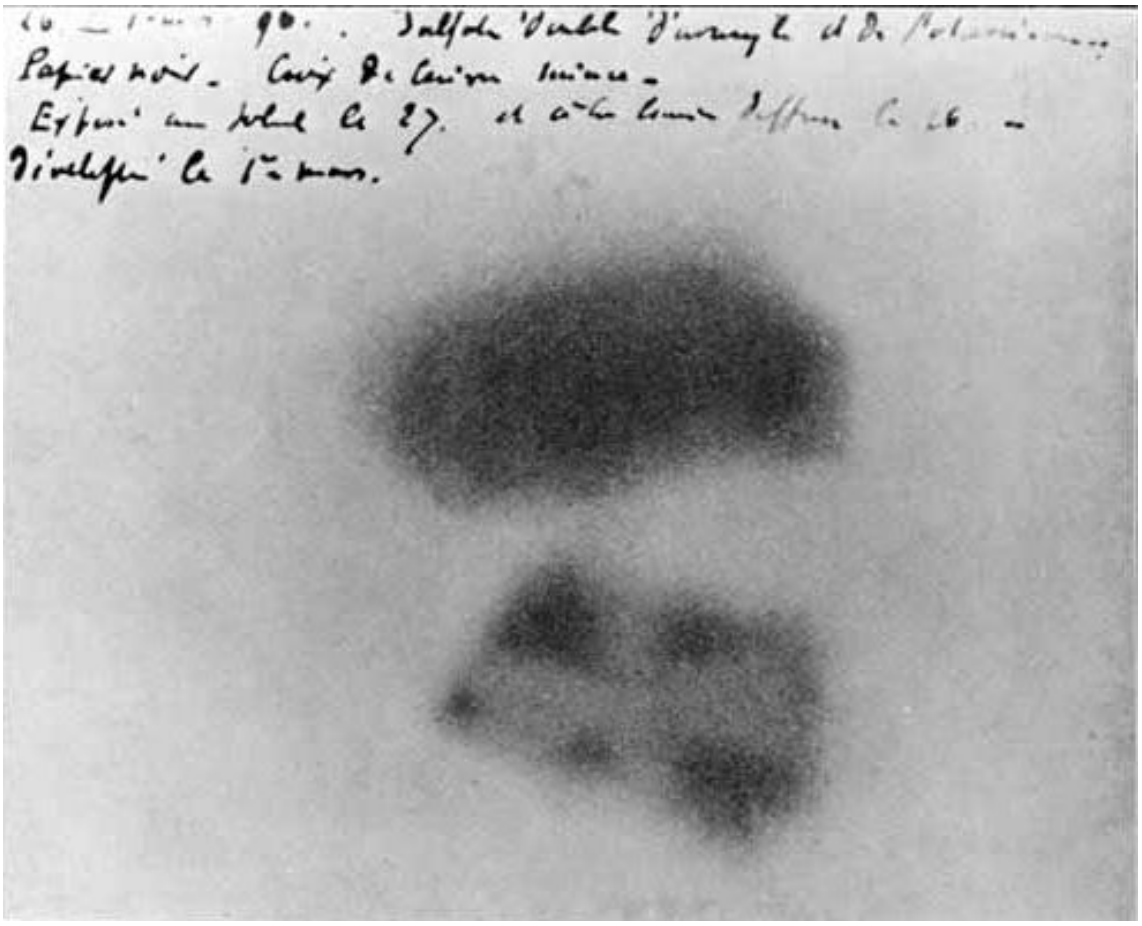


Slika 5.2: Slika dobivena nakon izlaganja uzorka Sunčevoj svjetlosti te razvijanja filma. [12]

Raspravljamo s učenicima o tome što vide na Slici 5.2 te što bi to moglo predstavljati. Učenici opažaju mrlju koja se nalazi na mjestu gdje je bio postavljen kristal. Becquerel je izvodio mnogo eksperimenata tijekom kojih je postavljao različite novčiće i križeve između uzoraka urana i fotografske ploče kako bi provjerio domet zraka.



Slika 5.3: Malteški križ postavljen između uzorka urana i fotografske ploče. [13]



Slika 5.4: Slika dobivena nakon razvijanja. [13]

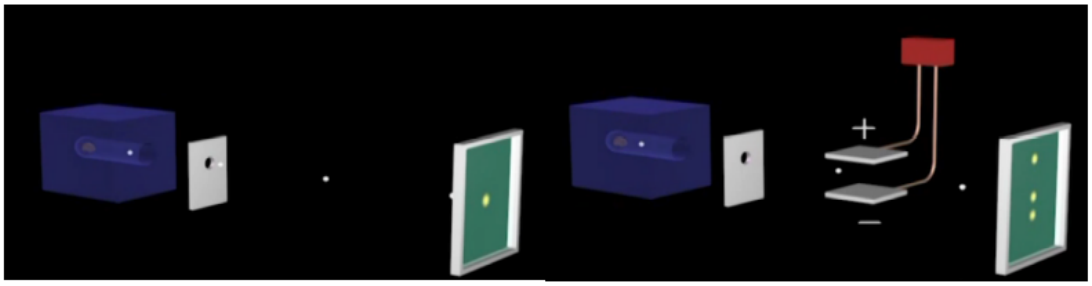
Ponovo raspravljamo s učenicima o tome što vide na slici 5.4.
Opažaju sjenu malteškog križa. Becquerel je na temelju svog pokusa pomislio da uran upija Sunčevu svjetlost te potom zrači X-zrake koje detektira fotografska ploča. Međutim, kada je sljedeći put išao ponoviti pokus bilo je oblačno pa je odlučio to odgoditi te je sav postav pospremio u ormar. Na njegovo iznenađenje, ponovnim razvijanjem slika uočio je jasnu sliku uranovih kristala nastalu bez izlaganja Sunčevoj svjetlosti. Diskusijom o značenju dobivenih rezultata Becquerelovog pokusa učenici dolaze do toga da neki elementi spontano emitiraju zračenje. Ova pojava naziva se radioaktivnost.
Na ploču pišemo naslov: **Radioaktivnost**

Središnji dio, konstrukcija modela – fizikalni i matematički opis pojave:

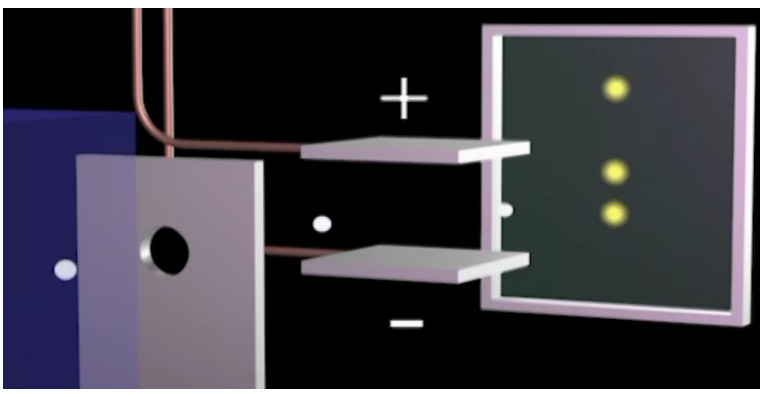
Istraživačko pitanje: **Što čini radioaktivno zračenje?**
Učenici daju ideje kako bi to istražili. Predlažu uporabu vanjskog električnog po-

lja kako bi istražili moguće postojanje nabijenih čestica u radioaktivnom zračenju. Nastavnik ih upućuje na računalnu simulaciju.

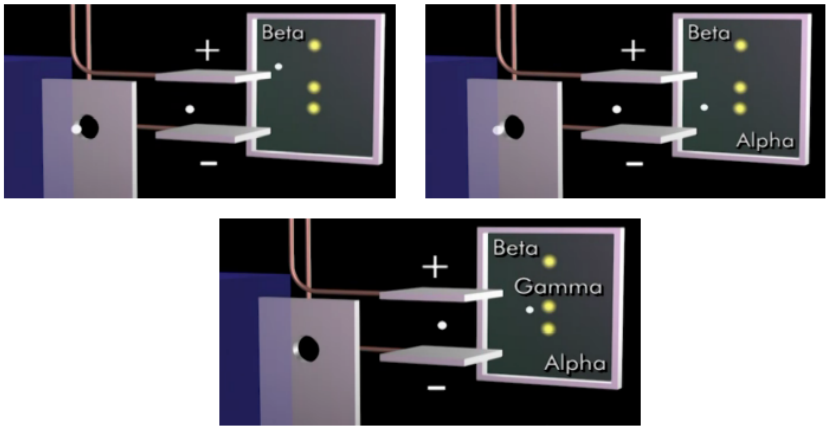
Simulacija prikazuje izvor radioaktivnog zračenja koje prolazi kroz malu rupicu kako bi se stvorio snop. Snop je usmjeren na fluorescentni zaslon koji zasvijetli kada zračenje padne na njega. Moguće je uključiti vanjsko električno polje između izvora i zaslona. Kako se giba snop radioaktivnog zračenja bez vanjskog električnog polja? Cijeli snop radioaktivnog zračenja udara u jednu točku zaslona (slika 3). Kako se ponaša snop radioaktivnog zračenja u prisustvu električnog polja? U prisustvu električnog polja, učenici uočavaju kako se početni snop dijeli na tri komponente (slika 4). Kako možemo otklon čestica povezati s njihovim nabojem? Jedan dio snopa je otklonjen suprotno od smjera električnog polja što navodi na to da su te čestice negativno nabijene. Te radioaktivne zrake nazivaju se beta-zračenjem. Drugi dio snopa je skrenut prema dolje što ukazuje da su te čestice pozitivno nabijene. Te radioaktivne emisije nazivaju se alfa zrake. Dio izvornog snopa koji nije otklonjen ukazuje da postoji dio zračenja bez električnog naboja. Ove se emisije nazivaju gama zračenja.



Slika 5.5: Prikaz eksperimentalnog postava. [14]



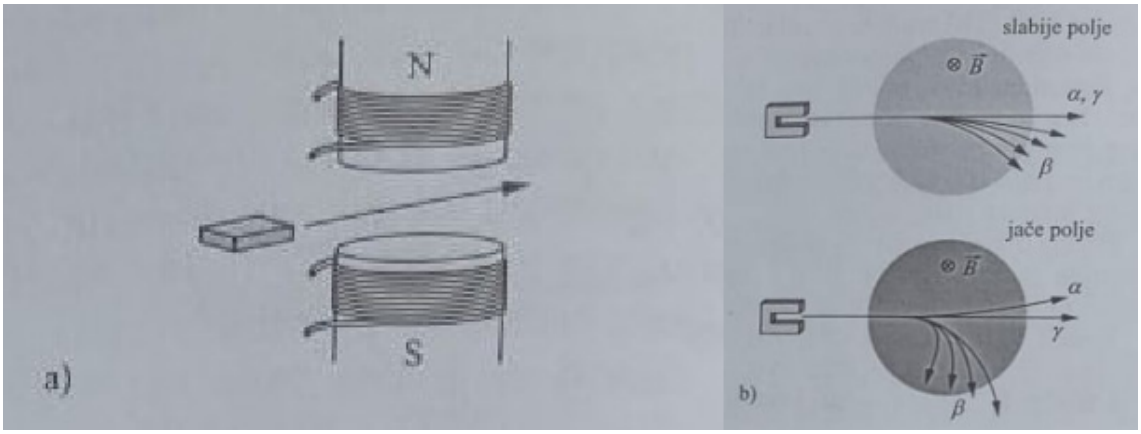
Slika 5.6: Zakretanje dijelova snopa. [14]



Slika 5.7: Alfa, beta i gama zrake. [14]

Što bi se s radioaktivnim zračenjem dogodilo pri prolasku kroz magnetsko polje?

Pomoću slike 5.8 i korištenjem izraza za Lorentzovu silu podrobnije se razmatra problem naboja pojedinih čestica.



Slika 5.8: a) Uski snop radioaktivnih zraka iz izvora prolazi između polova jakog magneta. b) U dijelu prostora u kojem postoji vertikalno magnetsko polje (između polova magneta) alfa i beta zrake se zakreću u horizontalnoj ravnini. [15]

U kojem smjeru se otklanjaju alfa,beta, a u kojem gama zrake prolaskom kroz magnetsko polje?

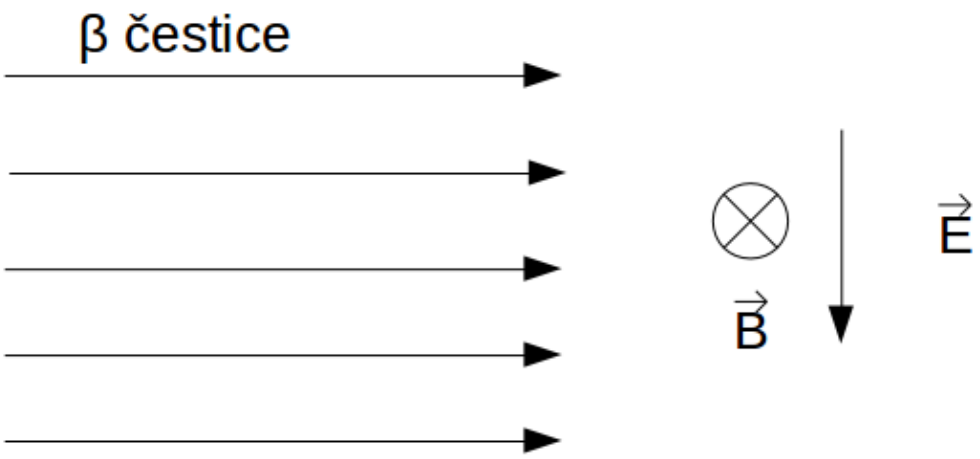
Kako ovisi otklon pojedinih zraka s obzirom na jačinu polja? Što možemo zaključiti o naboju koji nose pojedine zrake na temelju njihovog otklona? Kako bismo to mogli matematički interpretirati?

Učenici zaključuju kako alfa i beta zrake nose električni naboj jer se otklanjaju pro-

laskom kroz magnetsko polje, dok gama zrake ne nose naboj jer se ne otklanjaju prolaskom kroz magnetsko polje. Također uočavaju kako je otklon alfa i beta zraka veći što je magnetsko polje jače te da nema otklona gama zraka bez obzira na jačinu polja. Primjenom zakona za magnetski dio Lorentzove sile $F_m = qvxB$ zaključuje se kako su alfa zrake pozitivno nabijene čestice, a beta zrake negativno nabijene čestice.

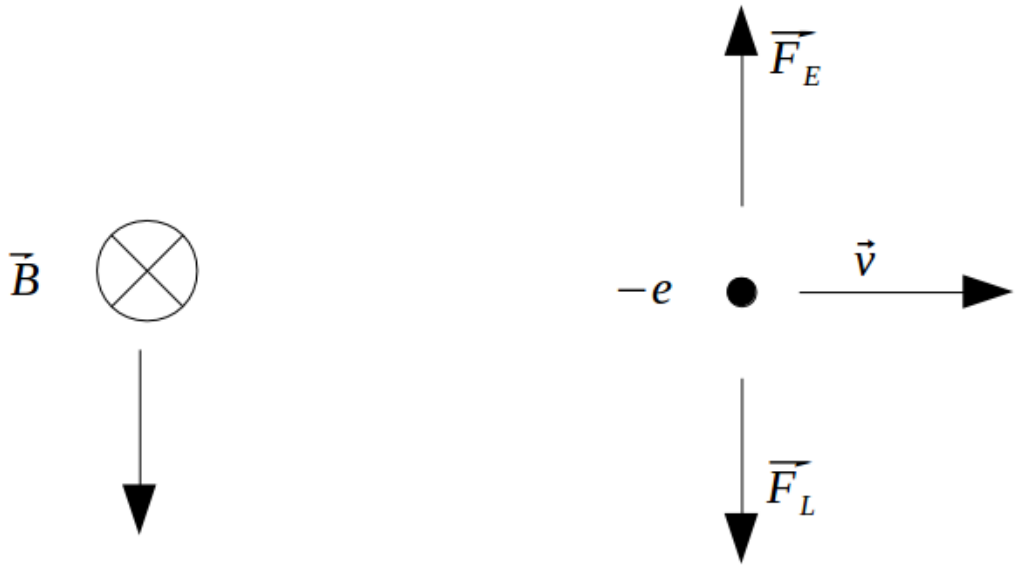
Kako bismo mogli izračunati brzinu pojedinih čestica?

Učenici uz pomoć pitanja, slika i prethodnih zaključaka pokušavaju doći do izraza za brzinu čestica.



Slika 5.9: Beta čestice su usmjerene prema desno te nailaze na električno polje koje je usmjereno prema dolje i magnetsko polje koje je usmjereno u papir (ploču).

U kojem smjeru djeluje na beta česticu električna sila, a u kojem magnetska sila? Kako to možemo iskoristiti za određivanje brzine beta čestice?



Slika 5.10: Skica sila koje djeluju na beta česticu. Električna sila djeluje prema gore, a Lorentzova sila prema dolje.

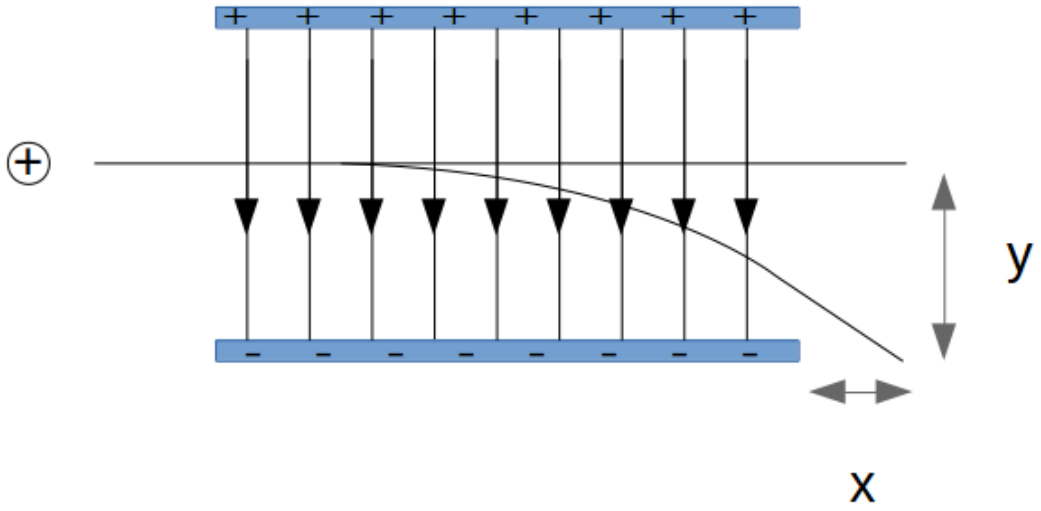
Izjednačavanjem iznosa električne i Lorentzove sile dolazi se do izraza za brzinu čestice:

$$F_e = F_L \tag{5.1}$$

$$qE = qvB \tag{5.2}$$

$$v = \frac{E}{B} \tag{5.3}$$

Pomoću ovako određene vrijednosti brzine beta čestice Becquerel je mjerio otklon u električnom polju te je odredio omjer $\frac{q}{m}$. Odredite $\frac{q}{m}$ preko otklona y snopa od horizontalnog smjera i duljine ploča x.



Slika 5.11: Otklon čestice u homogenom električnom polju.

Otklon čestice na x osi je:

$$x = v_0 t \tag{5.4}$$

Brzina u x smjeru je poznata i iznosi v_0. Sada se dolazi do izraza za vrijeme

$$t = \frac{x}{v_0} \tag{5.5}$$

Otklon čestice na y osi je:

$$y = \frac{1}{2}\frac{q}{m}Et^2 \tag{5.6}$$

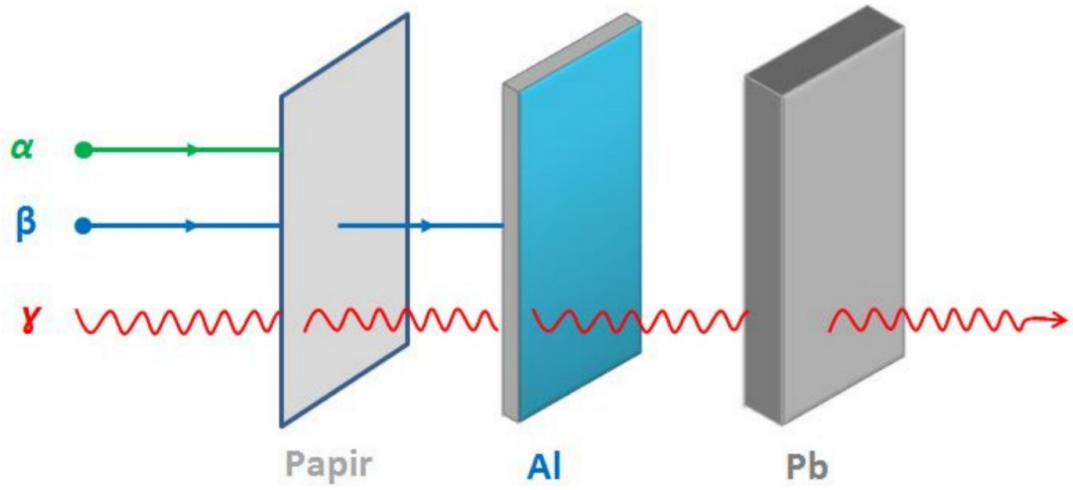
Ubacivanjem izraza za vrijeme u jednadžbu 5.6, dobiva se izraz za $\frac{q}{m}$:

$$\frac{q}{m} = \frac{2yv_0^2}{Ex^2} \tag{5.7}$$

Za beta čestice omjer $\frac{q}{m}$ odgovara omjeru $\frac{q}{m}$ elektrona. Na isti način Rutherford je dobio omjer $\frac{q}{m}$ alfa čestica koji iznosi $4,8 \cdot 10^7 \frac{C}{kg}$ te je ustanovio da se radi o jezgri atoma helija.

Istraživačko pitanje vodi do zaključaka da se radioaktivno zračenje sastoji od alfa, beta i gama zračenja. Alfa zrake su pozitivno nabijene čestice i te čestice su jezgre helija, beta zrake su negativno nabijene čestica i te čestice su elektroni, a gama zrake su elektromagnetski valovi.

Koje je zračenje prodornije?

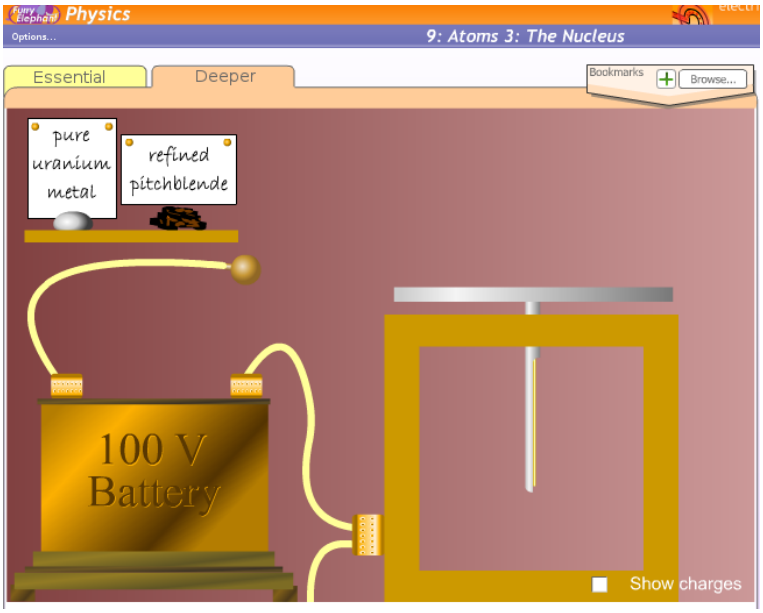


Slika 5.12: Prodornost pojedine vrste radioaktivnog zračenja. [16]

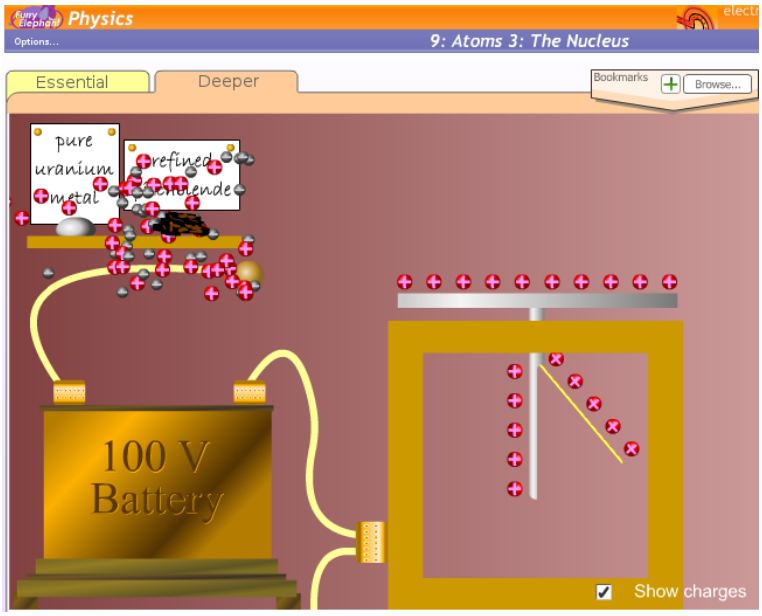
Na temelju slike 5.12 učenici donose zaključke o prodornosti pojedine vrste radioaktivnog zračenja te koliko je pojedino zračenje opasno. Alfa zračenje može zaustaviti papir. Ukoliko dospije unutar organizma izrazito je opasno. Beta zračenje može zaustaviti aluminijski lim debeo nekoliko milimetara ili par metara zraka. Gama zračenje ima najveću dubinu prodiranja. Ne može ga u potpunosti zaustaviti ni olovna ploča debljine par milimetara. Najbolje ga apsorbiraju materijali velikog atomskog broja (olovo) i velike gustoće.

Završni dio, primjena modela – korištenje novostečenog znanja u novim situacijama, provjera ostvarenosti obrazovnih ishoda

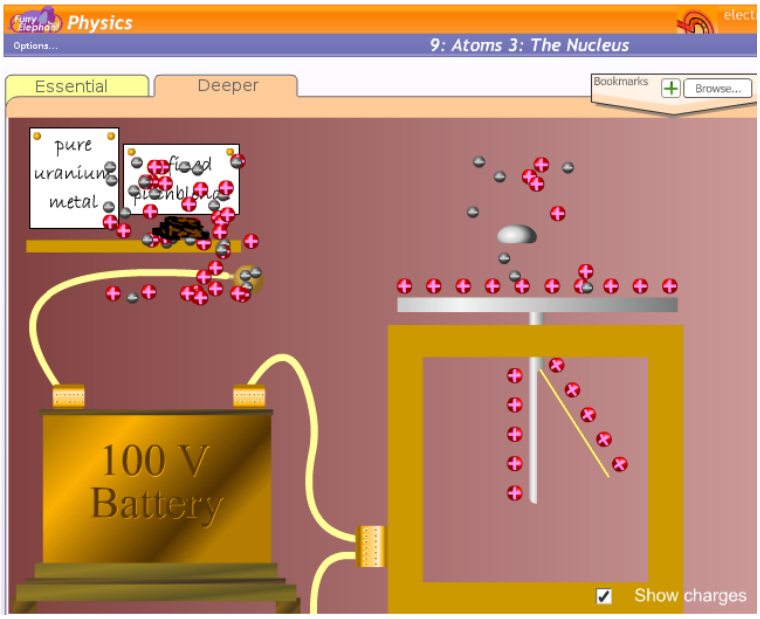
Što se događa s kazaljkom nabijenog elektroskopa u prisustvu uzorka uranija? Simulacija prikazuje elektroskop koji se nabije tako da se spoji na bateriju. Odspojimo li ga s baterije elektroskop ostaje nabijen te postavimo na simulaciji da se vide naboji. Komad urana može se približiti nabijenom elektroskopu. Učenici zapisuju svoja opažanja. Skiciramo pokus. Prikaz simulacije:



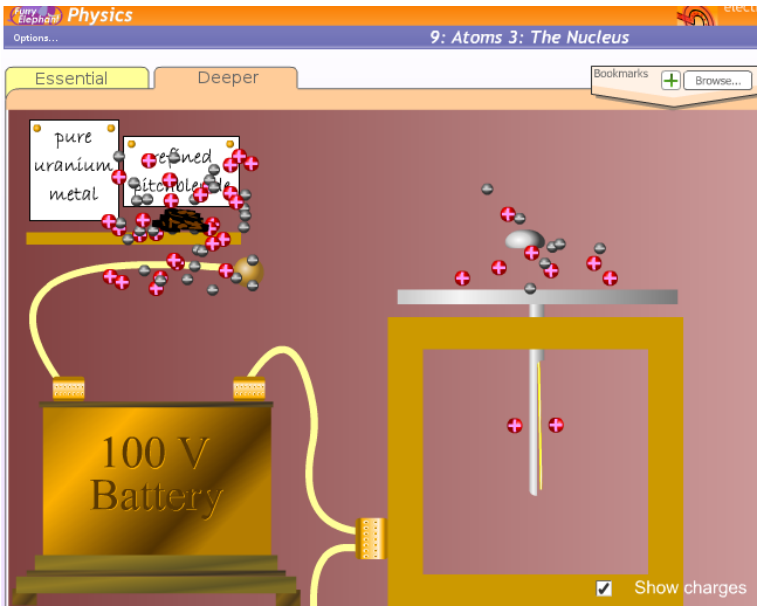
Slika 5.13: Prikaz postava. [17]



Slika 5.14: Prikaz postava s prikazom naboja nakon nabijanja elektroskopa. [17]



Slika 5.15: Približavanje uranija nabijenom elektroskopu. [17]



Slika 5.16: Izbijanje elektroskopa u prisustvu uranija. [17]

Učenici opažaju kako se kazaljka elektroskopa polagano spušta. Zaključuju da se to događa pod utjecajem radioaktivnog zračenja.

Što je neutraliziralo električni naboj na kazaljci elektroskopa? Kako nazivamo taj proces?

Kroz raspravu prisjećamo učenike na pojam ionizacije te dolazimo do zaključka da se okolni zrak ionizirao odnosno ioni zraka neutraliziraju električni naboj na kazaljci

elektroskopa.

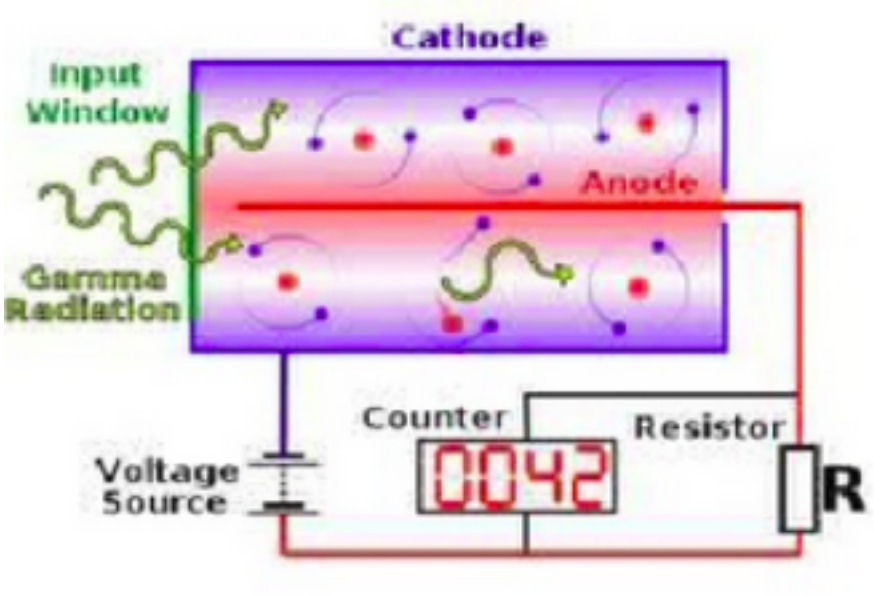
Uvodimo pojam ionizirajućeg zračenja odnosno zračenja koje ima dovoljno energije da izbije elektrone iz atoma i tako proizvodi ione. Rendgenske i gama zrake oblici su ionizirajućeg zračenja. Kemijski procesi inducirani zračenjem mogu dovesti do bioloških učinaka poput uništavanja tjelesnih stanica, pa tako i tumorskih.

Princip rada Geiger-Müllerovog brojača

Geiger-Müllerovog brojač je uređaj za detekciju i mjerenje ionizacijskog zračenja (obično, alfa-zračenje, beta-zračenje i gama-zračenja), a može registrirati i pojedinačne fotone.



Slika 5.17: Geiger-Müllerovog brojač. [18]



Slika 5.18: Shematski prikaz Geiger-Müllerovog brojača. [19]

Sastoji se od komore ispunjene zrakom ili nekim plinom (najčešće helij, argon ili neon). U komori je uspostavljeno električno polje. Zidovi cilindra predstavljaju negativnu elektrodu (katodu), a anoda je tanka žica koja prolazi kroz sredinu cilindra. Prolaskom kroz komoru zračenje izaziva ionizaciju te pozitivni ioni odlaze na katodu, a negativni (elektroni) ioni odlaze na anodu. U strujnom krugu nastaju električni impulsi koji se obrađuju te se na brojčaniku prikazuju određene vrijednosti (broj impulsa, broj impulsa po jedinici vremena).

Bibliography

[1] Sears and Zemansky's, University physics with modern physics, Thirdteenth Edition, Young Freedman, Pearson

[2] http://hlconsulting.com.au/Revision.htm

[3] ICRP, Annals of the ICRP, ICRP Publikation 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ELSEVIER

[4] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_4_8_39.html

[5] http://www.lacoonline.com/cgi-bin/lacoonline/00246.html

[6] https://vdocuments.site/mjerenje-ionizirajuceg-zracenja.html

[7] http://tecnasa.es/productos/nuclear/monitores-de-dosis-y-tasa-de-dosis/

[8] https://www.nagase-landauer.co.jp/english/inlight/technology.html

[9] https://www.heliyon.com/article/e00117/

[10] European Radiation Dosimetry Group e. V., EURADOS Report 2012-02, Braunschweig, April 2012

[11] Philip Plato and Joseph Miklos: Production of element correction factors for thermoluminiscent dosimeters. Health Physics, Volume 9, November 1985, pp 873-881

[12] https://www.ck12.org/book/CK-12-Chemistry-Second-Edition/r18/section/24.1/

[13] https://www.docma.nu/da/blog/uran-ulmede-i-skuffen

[14] https://blausen.com/en/video/behavior- of-alpha-beta-and-gamma-rays-in-an-electric-field/

[15] Jakov Labor, FIZIKA 4, udžbenik za 4. razred gimnazije, ALFA

[16] Rudolf Krsnik, FIZIKA 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije, ŠK

[17] http://www.furryelephant.com/player.php?subject=physicsjumpTo=re/9D1s1

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter

[19] https://vdocuments.site/mjerenje-ionizirajuceg-zracenja.html