

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**ANALIZA INVESTICIJE V ZDRAVSTVU: NOVA
OBSEVALNA NAPRAVA**

DIPLOMSKO DELO

Aleš Valentinčič

Mentor: Prof. dr. Božidar Šarler

Nova Gorica, 2009

ZAHVALA

Zahvaljujem se podjetju Kolektor d.d., ki mi je soomogočilo študij in vsem, ki so mi pri nastajanju diplomskega dela kakorkoli pomagali.

Predvsem bi se zahvalil ge. Ani Žličar in g. Iliji Vojvodiču z Onkološkega inštituta v Ljubljani, ki sta mi prijazno pomagala pri pridobivanju informacij in podatkov v zvezi z investicijo v novo obsevalno napravo.

Zahvaljujem se tudi g. Tomažu Ružmanu z Zavarovalnice Triglav d.d., ki mi je dal potrebne informacije glede zavarovanja nove obsevalne naprave.

Nazadnje se zahvaljujem tudi mentorju prof. dr. Božidarju Šarlerju za sodelovanje in koristne napotke pri izdelavi diplomske naloge.

NASLOV

Analiza investicije v zdravstvu: nova obsevalna naprava

IZVLEČEK

V Sloveniji so radioterapevtske zmogljivosti nezadostne, saj primanjkuje tako obsevalnih naprav, kot tudi kadra. Incidenca raka v Sloveniji se iz leta v leto povečuje. Med vzroki smrti v Sloveniji je rak na drugem mestu. Prav ta dejstva so bila glavna motivacija za izdelavo diplomskega dela.

S pomočjo podatkov zaposlenih na Onkološkem inštitutu v Ljubljani smo opredelili, kakšno je stanje v Sloveniji na področju radioterapije in opisali glavne tehnične specifikacije obsevalnih naprav. Po metodi vrednotenja projektov smo naredili investicijski načrt za nakup nove obsevalne naprave ter opredelili prednosti, ki bi jih tak nakup prinesel tako z ekonomskega vidika, kot z vidika skrajšanja čakalnih vrst in zmanjšanja preobremenjenosti obstoječih naprav.

Trenutno imamo v Sloveniji sedem megavoltnih obsevalnikov. Na podlagi analize investicije smo ugotovili, da bi z nakupom nove obsevalne naprave skrajšali čakalno dobo s povprečno 35 dni na 30 dni. Za doseg evropske ravni števila megavoltnih obsevalnikov na milijon prebivalcev in s tem primerljive čakalne dobe, ki znaša 14 dni, bi potrebovali vsaj 12 takih obsevalnikov. Pri tem smo upoštevali 11 urni dnevni obratovalni čas naprav. Izračunali smo, da se nam investicija povrne že v petem letu obratovanja in da je nakup nove obsevalne naprave upravičen.

KLJUČNE BESEDE

Radioaktivno sevanje, ionizacija, detektorji sevanja, CT, PET, NMR, ultrazvok, učinki sevanja, teleterapija, telekobalt, linearni pospeševalnik, brahiterapija, rak, vrednotenje projekta, diskontna stopnja, neto sedanja vrednost - NSV, interna stopnja donosnosti - ISD.

TITLE

Analysis of investment in health care: new irradiation device

ABSTRACT

In Slovenia there is the lack of radiotherapy facilities, such as lack of irradiation devices, as well as staff. Incidence of cancer in Slovenia is increasing from year to year. Among the causes of death in Slovenia, cancer is the second. All those facts have been the main motivation for present bachelor thesis.

With the help of the employees from the Institute of Oncology in Ljubljana we defined the situation in Slovenia in the field of radiotherapy and described the main technical specifications of irradiation devices. According to the method of evaluation of projects we have made an investment plan for the purchase of a new irradiation device and have identified the advantages that such a purchase would bring both from the economic considerations as well as shortening of waiting terms and reduction of congestion on existing facilities.

Seven irradiation devices currently exist in Slovenia. Based on the analysis of investment, we found that the purchase of a new irradiation device would shorten the waiting terms from an average of 35 days to 30 days. To achieve the number of European level of irradiation devices per million population and comparable waiting terms, which is 14 days, we would need at least 12 such devices. Here we took into account the 11 - hour daily operating time of devices. We calculated that the investment would reimburse already in the fifth year of operation and that the purchase of a new irradiation facility is justified.

KEYWORDS

Radiation, ionization, radiation detectors, CT, PET, NMR, ultrasound, radiation effects, teletherapy, telecobalt, linear accelerator, brachytherapy, cancer, project evaluation, discount rate, net present value - NPV, internal rate of return - IRR.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Opredelitev problema.....	1
1.2	Hipoteza za rešitev problema	2
1.3	Namen in cilj naloge	2
1.4	Pregled diplomskega dela	2
2	KAJ JE TO SEVANJE.....	4
2.1	Kaj je ionizacija.....	5
2.2	Viri in vrste ionizirajočega sevanja	5
2.2.1	Kozmično sevanje	5
2.2.2	Nevtronsko sevanje	5
2.2.3	Sevanje alfa	6
2.2.4	Sevanje beta	6
2.2.5	Žarki-X in sevanje gama	7
2.3	Radioaktivno sevanje	8
2.3.1	Aktivnost sevanja	8
2.3.2	Razpolovni čas	9
2.3.3	Biološki učinki sevanja	9
2.3.4	Doza sevanja	10
2.3.5	Omejitve doz	11
2.3.6	Uporaba radioaktivnih snovi	12

3	VRSTE NAPRAV ZA MERJENJE RADIOAKTIVNEGA SEVANJA.....	14
3.1	Fotografska emulzija.....	15
3.2	Meglična in mehurčna celica	15
3.3	Plinski števeci (detektorji)	16
3.3.1	Ionizacijska celica	17
3.3.2	Proporcionalni števec	17
3.3.3	Geiger Müllerjev števec	18
3.4	Scintilacijski števec	19
3.4.1	Fotopomnoževalka	20
3.5	Polprevodniški detektor	21
3.6	Nevtronski detektorji.....	21
3.7	Termoluminiscentni dozimetri (TLD).....	22
4	IONIZIRAJOČE SEVANJE V ZDRAVSTVU	23
4.1	Vrste slikanja notranjosti človeškega telesa.....	23
4.1.1	CT (Computed Tomography).....	23
4.1.2	PET (Positron Emission Tomography)	25
4.1.3	NMR (Nuclear Magnetic Resonance ali MRI - Magnetic Resonance Imaging)	27
4.1.4	Ultrazvok.....	29
4.2	Učinki sevanja	31
4.2.1	Fizikalni in kemični učinki sevanja.....	34
4.2.2	Biološki učinki sevanja na celico	36

4.2.3	Biološki učinki sevanja na tkiva in organe	39
4.2.4	Deterministični in stohastični učinki sevanja.....	41
4.2.5	Sevanje v okolju in na delovnem mestu.....	45
5	RADIOTERAPIJA.....	46
5.1	Zgodovina	46
5.2	Teleterapija.....	46
5.3	Kdaj obsevamo?	48
5.4	Obsevalne naprave teleterapije	48
5.4.1	Telekobalt.....	49
5.4.2	Linearni pospeševalnik.....	49
5.4.3	Terapevtska rentgenska naprava	51
5.5	Brahiterapija.....	52
6	ZAŠČITA PRED SEVANJEM.....	53
6.1	Zaščita pred sevanjem nekoč	54
6.2	Zaščita pred sevanjem danes	54
6.3	Zaščita med rentgenskimi preiskavami	56
6.4	Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list R. Slovenije št. 67 / 26.07.2002).....	57
7	RAK V SLOVENIJI	59
8	INVESTICIJA V NOVO OBSEVALNO NAPRAVO (VARIAN CLINAC)...	61
8.1	Ekonomske metode vrednotenja projekta	62
8.1.1	Celotni stroški (naložbe in stroški)	62

8.1.2	Prihodki	64
8.1.3	Viri financiranja	65
8.1.4	Individualna diskontna stopnja	65
8.1.5	Bilanca uspeha	66
8.1.6	Bilanca realnega - ekonomskega toka.....	67
8.1.7	Likvidnostni - skupni denarni tok projekta	68
8.2	Metode vrednotenja učinkov (statična in dinamična analiza projekta).....	69
8.2.1	Statična analiza.....	69
8.2.2	Dinamična analiza	71
8.3	Končna ocena investicije.....	75
9	ZAKLJUČEK.....	76
10	LITERATURA.....	77

KAZALO SLIK

Slika 1: Spekter elektromagnetnega valovanja	4
Slika 2: Primer sevanja alfa.....	6
Slika 3: Primer sevanja beta	7
Slika 4: Primer sevanja gama	7
Slika 5: Prodornost sevanja alfa, beta in gama	8
Slika 6: Znak za radioaktivne snovi ali področje s povišanim radioaktivnim sevanjem	8
Slika 7: Krivulja razpolovnega časa.....	9
Slika 8: Delež glavnih sevalcev doz na zemlji.....	12
Slika 9: Plinski detektorji (osnovni princip konstrukcije).....	17
Slika 10: Geiger Müllerjev števec	19
Slika 11: Fotopomnoževalka.....	20
Slika 12: CT naprava.....	25
Slika 13: Fotografija izdelana s CT napravo	25
Slika 14: PET naprava.....	27
Slika 15: Fotografija izdelana s PET napravo	27
Slika 16: MRI naprava	29
Slika 17: Fotografija izdelana z MRI napravo	29
Slika 18: Ultrazvok	30
Slika 19: Fotografija izdelana z ultrazvokom	30
Slika 20: Zaporedje dogodkov pri sevalni poškodbi.....	32

Slika 21: Shema deoksiribonukleinske kisline - DNA.....	36
Slika 22: Vrste poškodb DNA, ki jih povzroča ionizirajoče sevanje.....	37
Slika 23: Linearni pospeševalnik Varian Clinac 2100 C/D	50
Slika 24: Shema linearnega pospeševalnika	51
Slika 25: Najpogostejše vrste raka v Sloveniji.....	59
Slika 26: Pogostost raka glede na starost	60

KAZALO TABEL

Tabela 1: Biološki učinki sevanja	10
Tabela 2: Vrste sevanja in njihov faktor učinkovitosti - Q	11
Tabela 3: Lestvica učinkov pri trenutnem obsevanju	11
Tabela 4: Učinki oziroma mehanizmi interakcij sevanja s snovjo.....	14
Tabela 5: Časovni potek dogodkov, ki jih povzroči ionizirajoče sevanje.....	34
Tabela 6: Učinki ionizirajočega sevanja glede na dozo	40
Tabela 7: Razvrstitev organov glede na radioobčutljivost.....	41
Tabela 8: Potrebe po megavoltnih obsevalnih napravah v Sloveniji do leta 2010	62
Tabela 9: Cenik storitev radioterapije	64
Tabela 10: Individualna diskontna stopnja	65
Tabela 11: Bilanca uspeha (v €).....	66
Tabela 12: Realni - ekonomski denarni tok projekta (v €).....	67
Tabela 13: Likvidnostni - skupni denarni tok projekta (v €).....	68
Tabela 14: Doba vračanja - odplačilna doba projekta (v €)	69
Tabela 15: Skupni donos na enoto naložbe.....	70
Tabela 16: Povprečni letni donos na enoto naložbe.....	70
Tabela 17: Metoda aktualiziranega dobička na enoto naložb po letih (v €)	71
Tabela 18: Izračun sedanje vrednosti projekta po letih (v €)	72
Tabela 19: Izračun ISD z diskontiranjem in interpolacijo po letih (v €)	73
Tabela 20: Izračun kriterijev učinkovitosti projekta (v €)	74
Tabela 21: Izračun kazalcev uspešnosti projekta	75

1 UVOD

Sevanje je sestavni del človekovega življenja. Glede na to, kakšne učinke ima na človeka, ločimo dve vrsti sevanja. Neionizirajoče sevanje človeku ni škodljivo, ionizirajoče sevanje pa pri prevelikih dozah človeku škoduje. Slednje se uporablja predvsem v industriji, medicini, znanosti in vojaški tehniki. V diplomskem delu smo povzeli bistvene značilnosti in vrste sevanja, najpogosteje uporabljene merilnike sevanja, podrobneje pa sevanje v zdravstvu.

1.1 Opredelitev problema

V današnjem času je zaznati vedno večjo porast rakavih obolenj. Po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije za rakom v Sloveniji vsako leto zboli več kot 10.000 prebivalcev. Pri moških je najpogostejša oblika raka rak prostate, pri ženskah pa rak dojke. Pri obeh spolih pa se večja incidenca raka malignega melanoma ter drugih kožnih rakov (15,9 % vseh vrst rakov), debelega črevesa in danke (12,1 % vseh vrst rakov) in pljuč (11,4 % vseh vrst rakov). Zdravljenje rakavih obolenj za vsako državo predstavlja ekonomsko breme. Leta 2006 so v Sloveniji stroški zdravljenja rakavih obolenj, vključno s preventivo, znašali približno 157 milijonov €. Največji strošek, in sicer 55 %, je predstavljal starostna skupina od 15 do 64 let, 46 % je predstavljal skupina oseb, starejših od 65 let, najmanjši strošek pa je predstavljal starostna skupina do 14 let, in sicer 2 % vseh stroškov.

V diplomskem delu smo analizirali, kakšno je stanje glede rakavih obolenj v Sloveniji. Po mednarodnih priporočilih in standardih, bi moral biti delež bolnikov, zdravljenih z radioterapijo, večji od 50 %, v Sloveniji pa ta delež znaša le 38 %. Trenutno imamo v Sloveniji sedem (Strojan, 2007) megavoltnih obsevalnih naprav, potrebovali pa bi jih vsaj še pet, da bi se približali temu deležu. Težava je tudi v zastarelosti nekaterih obsevalnih naprav. Rezultat pomanjkanja obsevalnih naprav je predolga čakalna doba, ki v Sloveniji znaša več kot štiri tedne. Po mednarodnih priporočilih in standardih pa naj čakalna doba ne bi bila daljša od dveh tednov. Posledično je težava tudi v preobremenjenosti obsevalnih naprav, saj delujejo več kot 11 ur dnevno. Ob tovrstni preobremenjenosti pa se življenska doba naprav skrajša. V Sloveniji primanjkuje tudi ustrezno izobraženih kadrov.

1.2 Hipoteza za rešitev problema

Omenjene težave se v Sloveniji rešujejo z nadurnim delom, povečanim obratovalnim časom obsevalnih naprav in sobotnim delom. Delno rešitev problema bi prinesel nakup novih obsevalnih naprav, kar predstavlja velik izziv s stroškovnega in organizacijskega vidika.

1.3 Namen in cilj naloge

Cilj naloge je ugotoviti, ali bi nakup nove obsevalne naprave poleg tega, da bi predstavljal delno rešitev omenjenih problemov, bil upravičen tudi z ekonomskega vidika. Prav investicija v novo obsevalno napravo in analiza te investicije je bil glavni cilj diplomskega dela. To delo je namenjeno kot pomoč pri odločitvi o upravičenem nakupu nove obsevalne naprave, npr. v Onkološkem inštitutu v Ljubljani. Poleg upravičenosti z vidika vrednotenja projekta po metodi vrednotenja učinkov (Bizjak, 1996) smo spoznali tudi prednosti, ki bi jih nakup nove obsevalne naprave prinesel pri zaščiti osebja in pacientov pred ionizirajočim sevanjem.

1.4 Pregled diplomskega dela

Na začetku diplomskega dela je opisano stanje glede rakavih obolenj v Sloveniji, število obsevalnih naprav in cilj, ki ga želimo z diplomskim delom doseči. To je ugotoviti, kako bi nakup nove obsevalne naprave pripomogel k zmanjšanju čakalnih vrst ter preobremenjenosti osebja in obstoječih naprav. Drugo poglavje opisuje kaj je to sevanje in kakšne vrste sevanja poznamo. Podrobneje opišemo radioaktivno oz. ionizirajoče sevanje, glavne značilnosti tega sevanja ter njegovo uporabo. V tretjem poglavju spoznamo vrste naprav za merjenje radioaktivnega sevanja in njihovo delovanje. V naslednjem, četrtem poglavju, se osredotočimo na uporabo ionizirajočega sevanja v zdravstvu. Najprej opišemo vrste slikanja notranjosti človeškega telesa, nato pa spoznamo učinke sevanja. V petem poglavju predstavimo pojem radioterapije in njeno zgodovino. Nadalje obrazložimo najbolj pogost način radiologije, to je teleterapijo in ugotavljamo, kdaj obsevamo. V tem poglavju spoznamo tudi obsevalne naprave teleterapije in brahiterapijo. V šestem poglavju se osredotočimo na zaščito pred sevanjem in predstavimo, kakšna je bila le ta nekoč in kakšna je danes. Pri tem opišemo, kako je to področje zakonsko urejeno. V sedmem

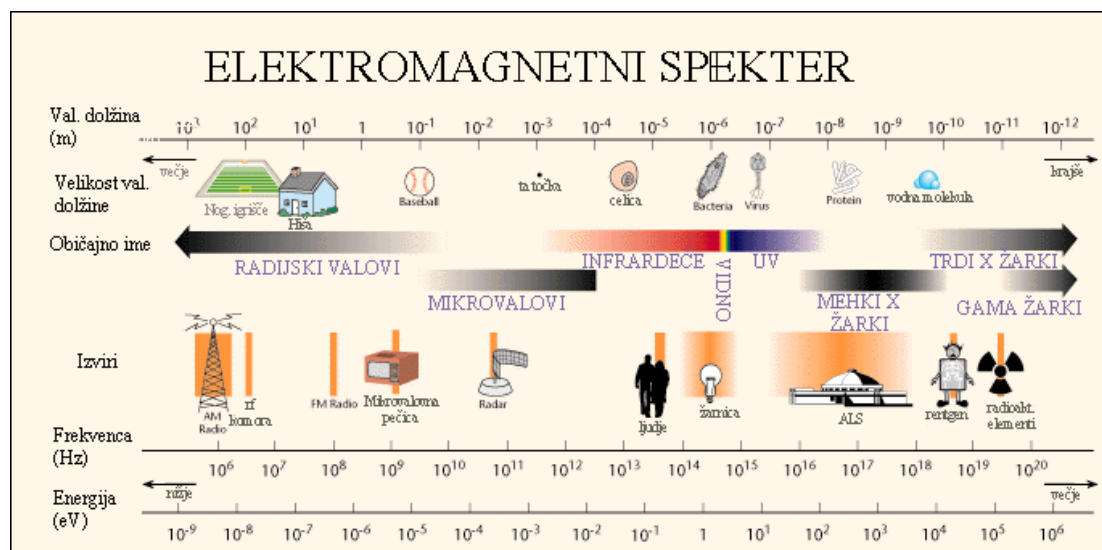
poglavju opredelimo, kakšno je stanje v Sloveniji na področju rakavih obolenj, katere so najpogostejše oblike raka ter kakšne so napovedi. V osmem poglavju s pomočjo ekonomske metode vrednotenja projekta in metode vrednotenja učinkov naredimo izračun investicije v novo obsevalno napravo in končno oceno investicije. V zadnjem, devetem poglavju podamo zaključke z ekonomskega vidika in predstavimo prednosti, ki bi jih prinesel nakup nove obsevalne naprave.

2 KAJ JE TO SEVANJE

Sevanje predstavlja prenos energije v obliki toka delcev ali širjenja elektromagnetnih valov. Sončni žarki so verjetno najbolj znana oblika sevanja, ki prinašajo svetlobo in toploto, brez katerih ne bi bilo življenja. Toda preveč sončne svetlobe je lahko za človeka škodljivo. Sončna svetloba je sestavljena iz sevanja z daljšimi valovnimi dolžinami (IR sevanje) pa preko vidne svetlobe vse do UV žarkov, ki so valovanja krajših valovnih dolžin in zato večjih energij, kar prikazuje slika 1 (Zupan in Derganc, 2009).

Če je energija žarkov dovolj velika, lahko tak žarek v atomu izbije elektron in tako atom ionizira, to pa pomeni poškodbo materiala, še posebno, če je tak atom del živega tkiva. Tako sevanje imenujemo *ionizirajoče sevanje*. V velikih odmerkih je torej ionizirajoče sevanje nevarno, zato je potrebno izpostavljenost sevanju nadzirati.

Poleg ionizirajočega poznamo tudi *neionizirajoče sevanje*.



Slika 1: Spekter elektromagnetnega valovanja (Kvarkadabra, 2009)

Med neionizirajoče sevanje uvrščamo ultravijolično, vidno in infrardečo svetlobo, mikrovalove in radijske valove. Ker to sevanje ne more tvoriti ionov, je veliko manj škodljivo oz. sploh neškodljivo živim celicam.

Ionizirajoče sevanje, kamor uvrščamo sevanje radioaktivnih snovi (sevanje alfa, beta, gama in elektroni), rentgensko sevanje, nevtronsko sevanje in kozmično sevanje ter delno ultravijolično sevanje, ima veliko višjo energijo valovanja kot neionizirajoče

sevanje ter ima dovolj energije, da lahko ionizira atome. To pomeni, da sevanje s svojo energijo lahko »izbije« elektrone iz atomov in jih spremeni v električno nabite ione. Ionizirajoče sevanje tako po prehodu snovi za seboj pusti ionske pare: ione in elektrone. Takšno sevanje lahko spremeni strukturo molekul in trajno poškoduje naše celice. Ionizirajočih sevanj s čutili ne moremo zaznati, lahko pa njihovo prisotnost ugotovimo s pomočjo ustreznih merilnikov (Amon, 2004).

2.1 Kaj je ionizacija

Ionizacija je pojav, pri katerem nastajajo ioni. Ko električno nevtralni atomi pridobijo ali izgubijo enega ali več elektronov postanejo anioni (negativno nabiti) ali kationi (pozitivno nabiti). Ionizacijo lahko sproži sevanje, trki delcev, pa tudi kemijska elektroliza. Pri sevanju (denimo sevanje alfa - ioniziran atom helija) pri prehodu skozi snov odtrgajo elektrone iz elektronskega oblaka atoma. Pri tem dobimo pozitivno nabit ion (kation), ki mu manjka en ali več elektronov in en ali več prostih elektronov.

2.2 Viri in vrste ionizirajočega sevanja

- naravno ozadje (kozmični žarki, radon v zraku, naravni izotopi v zemlji: K^{40} , U^{238} , Th^{232} , ...)
- rentgen,
- umetni viri sevanja žarkov alfa, beta in gama (Am^{243} , Sr^{90} , Cs^{137} , Co^{60} , ...).

2.2.1 Kozmično sevanje

Kozmično sevanje je naravno sevanje, ki prihaja iz vesolja. Sestavljajo ga različni delci, ki prihajajo iz vesolja in obsevajo zemljo. V višjih plasteh atmosfere je gostota teh žarkov precej večja kot ob morju, ker se delci v plasteh zraka absorbirajo. Tipično so to delci višjih energij (do 50 GeV), skoraj 90 % pa je protonov (vodikova jedra).

2.2.2 Nevtronsko sevanje

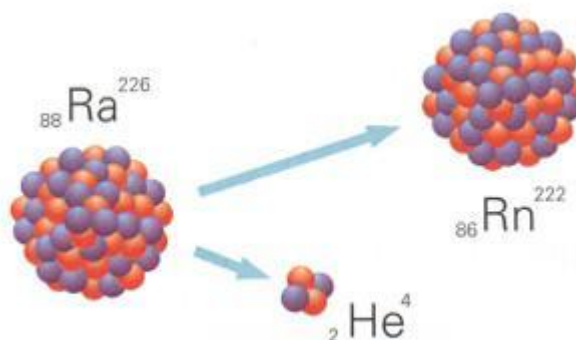
Je tok nevtronov. Nevtroni so delci v jedru, ki nimajo naboja. Pri razpadu težkih jeder ali zlitju lažjih pa zapustijo jedro. Ker so elektrostatično nevtralni, jih je težko

zaustaviti. Navadno nevtroni nastajajo v jedrskih reaktorjih, kjer potekajo omenjeni procesi. Nevtronsko sevanje je zelo prodorno. Za zaustavitev nevtronov pa večinoma uporabljajo vodo ali beton.

2.2.3 Sevanje alfa

Delci alfa so pravzaprav jedra helijevega atoma (dva protona in dva nevtrona), ki pri alfa razpadu odletijo iz jeder težjih atomov, kot so uran, americij ali radij. Sevanje alfa ni prodorno, saj v zraku prodre le nekaj centimetrov daleč. Delce alfa zaustavi že povrhnjica kože ali list pisarniškega papirja. Posebej nevarni pa so, če vdihnemo ali zaužijemo delce z viri tega sevanja. Zato se moramo zaščititi pred vnosom sevalcev alfa v telo (z zaščitnimi oblačili, dihalno opremo).

Na sliki 2 je prikazan primer razpada izotopa radija (Ra^{226}) v radon (Rn^{222}), pri čemer nastane še delec alfa - jedra helija (He^4) (ICJT, 2009).

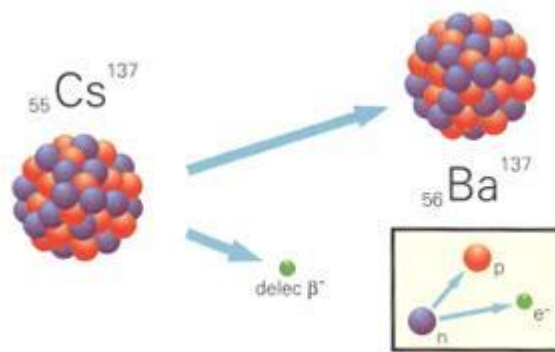


Slika 2: Primer sevanja alfa (ICJT, 2009)

2.2.4 Sevanje beta

So hitri elektroni (delci beta), ki pri beta minus razpadu zapustijo jedro (nukleus atoma). Ti elektroni so precej bolj pronicljivi, saj lahko prodrejo 1-2 cm v vodo ali človeško telo. V zraku prodrejo nekaj metrov daleč. Zaustavijo jih nekaj mm debela plast aluminija ali stekla. Delce beta sevajo mnogi radioaktivni elementi (tipičen predstavnik je stroncij, Sr^{90}).

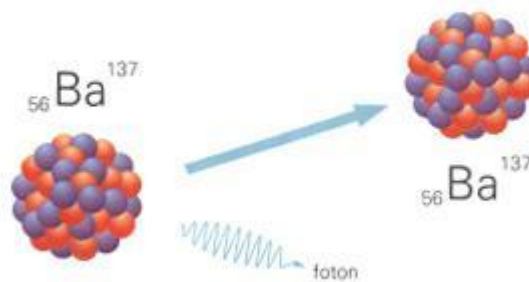
Na sliki 3 je prikazan primer razpada izotopa cezija (Cs^{137}) v barij (Ba^{137}). Pri tem se en nevtron spremeni v proton tako, da odda elektron - delec beta (ICJT, 2009).



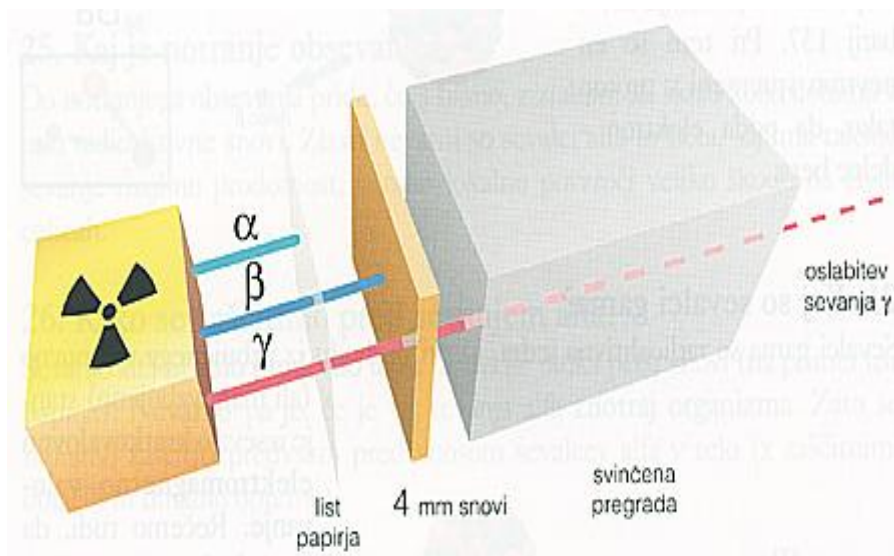
Slika 3: Primer sevanja beta (ICJT, 2009)

2.2.5 Žarki-X in sevanje gama

Sevanje gama predstavlja sevanje visokoenergijskih fotonov. Le ti nastanejo pri razpadu radioaktivnih jeder, ki ob prehodu iz vzbujenega v osnovno (ali manj vzbujeno) stanje izsevajo kratkovalovno elektromagnetno valovanje dolžine manj kot 10^{-11} m (slika 4). Ti žarki so zelo prodorni. Brez problema potujejo skozi človeško telo (rentgenske slike), zaustavijo jih šele debele plasti betona, svinca ali vode, kar nazorno prikazuje slika 5 (Koželj in drugi, 2006).



Slika 4: Primer sevanja gama (ICJT, 2009)



Slika 5: Prodornost sevanja alfa, beta in gama (ICJT, 2009)

2.3 Radioaktivno sevanje

Radioaktivno sevanje je naraven pojav, ki ga uvrščamo med ionizirajoča sevanja. Tri glavne vrste radioaktivnega sevanja smo že omenili in sicer: alfa, beta in gama. Pri tem sevanju nekatera atomska jedra razpadejo. Pri tem sproščajo energijo v obliki elektromagnetnega valovanja ali materialnih delcev. Znak za radioaktivnost prikazuje slika 6 (ICJT, 2009).



Slika 6: Znak za radioaktivne snovi ali področje s povišanim radioaktivnim sevanjem (ICJT, 2009)

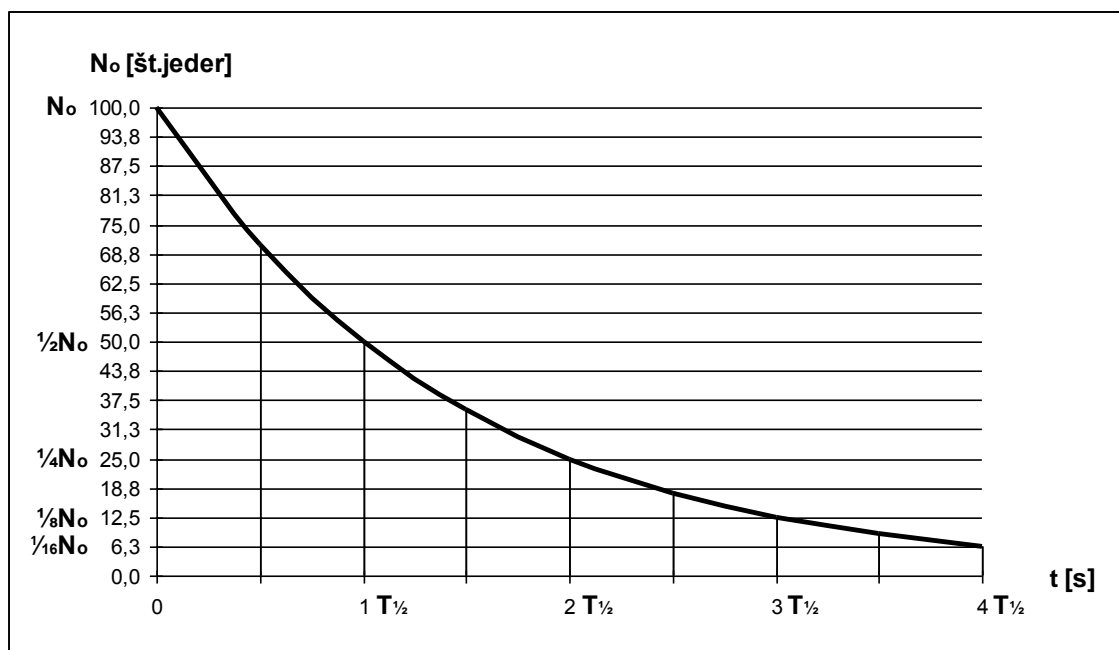
2.3.1 Aktivnost sevanja

Aktivnost izvora je enaka številu razpadov jeder v tem izvoru v eni sekundi. Je sorazmerna jakosti sevanja in je zato temeljni pokazatelj radioaktivnosti tega izvora.

Osnovna enota aktivnosti je *becquerel* (Bq), ki pomeni razpad enega jedra na sekundo. Stara enota za aktivnost je *curie* (Ci). 1 Ci je $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

2.3.2 Razpolovni čas

Aktivnost sevanja s časom upada. Merilo za upadanje aktivnosti je razpolovni čas. To je čas, v katerem razpade polovica začetnega števila radioaktivnih jeder. Po prvem razpolovnem času ostane še polovica začetnih jeder, po drugem še četrtina, po tretjem še osmina,... po sedmem še manj kot 1 % prvotnega števila jeder (slika 7). Dolgoživa jedra imajo zelo dolg razpolovni čas (npr. izotop C^{14} ima razpolovni čas 5730 let). Kratkoživa jedra razpadajo hitro (npr. radon ima razpolovni čas 3,8 dneva) (ICJT, 2009).



Slika 7: Krivulja razpolovnega časa (ICJT, 2009)

2.3.3 Biološki učinki sevanja

Ko pa govorimo o bioloških vplivih sevanja na človeško telo, je obravnava dodatno zapletena. Različna sevanja imajo na človeško telo različno močne vplive.

Npr. 1 Gy sevanja alfa bo imel na človeško telo močnejši vpliv kot 1 Gy sevanja beta ali gama. Zato moramo prejeta (absorbirano) dozo pomnožiti s *faktorjem biološkega vpliva* (Q), da dobimo enoto s katero zaznamujemo biološki vpliv na človeka. Ta enota se imenuje *Sivert* (Sv). 1 Sv povzroči enak biološki učinek ne glede na vrsto

sevanja. Na primer pri kalibraciji termoluminiscentnih dozimetrov se uporablja vir Co^{60} , za ta vir faktor biološkega vpliva znaša 1,14. Zato lahko rečemo, da 1 Gy prejetega sevanja ustreza vplivu 1,14 Sv na človeško telo (ICJT, 2009).

Radioaktivno sevanje poškoduje celice. Odvisno od vrste in števila poškodb lahko pride do okvare prizadetega tkiva, organa ali celotnega organizma. Učinki se lahko poznajo šele na potomcih. Biološki učinki so odvisni od vrste sevanja, prejete doze, časovnega intervala, v katerem dozo prejmemo, razporeditve doze po telesu in občutljivosti organizma (tabela 1).

Tabela 1: Biološki učinki sevanja (ICJT, 2009)

Obsevanost	Posledice
Velika doza na celo telo	Smrt v nekaj dneh ali tednih
Velika doza v kratkem času na enem mestu	Pordečitev kože, lokalne spremembe tkiva, uničenje tkiva tumorja
Doza v dolgem obdobju	Brez vidnih učinkov, možen poznejši nastanek raka ali dedne spremembe

2.3.4 Doza sevanja

Količina oz. doza sevanja je merilo obsevanosti človeka in okolja. Razlikujemo dve vrsti doze, in sicer:

- *absorbirano dozo* - D merimo jo v enotah *energije* (W), ki jo pusti delec v nekem telesu *mase* (m) in ima enoto *Gray* (Gy). To je prikazano v enačbi (1). 1 Gy je pri sevanju velika enota, zato navadno raje uporabljamo enoto *miligray* (mGy) ali celo *mikrogray* (μGy) ter

$$D = \frac{W}{m} \left[\frac{J}{kg} \right] = \frac{W}{m} \text{ Gy} \quad (1)$$

- *ekvivalentno dozo* - H (enačba (2)), ki upošteva, da imajo različna ionizirajoča sevanja različen vpliv na organizem.

$$H = DQ \quad (2)$$

Z enoto Sv (sievert, izgovorjava *siver*) merimo *ekvivalentno dozo* sevanja. Doza sevanja zaradi absorpcije nevtronov ali delcev alfa je za živo tkivo bolj škodljiva kot enaka absorbirana doza sevanja beta ali gama. To upoštevamo s *faktorjem učinkovitosti* (Q) (od 1 do 20), s katerim pomnožimo absorbirano dozo (tabela 2).

Tabela 2: Vrste sevanja in njihov faktor učinkovitosti - Q (ICJT, 2009)

Vrste sevanja	Faktor učinkovitosti
Sevanje alfa	20
Sevanje beta	1
Sevanje gama	1
Nevtronsko sevanje	5 - 20 (odvisno od energije)

Dobljeni produkt imenujemo ekvivalentna doza sevanja. 1 Sv je precej velika enota, zato uporabljamo za doze, s katerimi imamo običajno opravka, tisočkrat manjšo enoto mili sievert: $1 \text{ mSv} = 1/1000 \text{ Sv}$. Latentno obdobje med trenutnim obsevanjem in pojavom učinkov je nekaj ur pri dozi cca 0,1 Sv, do nekaj minut pri dozi okoli 10 Sv. Škodljivi učinki sevanja so približno sorazmerni prejeti dozi (tabela 3). Tega pa ne moremo z gotovostjo trditi za zelo majhne doze, kakršnim smo izpostavljeni vsak dan. Možno je, da sploh niso škodljive (Zupan in Derganc, 2009)

Tabela 3: Lestvica učinkov pri trenutnem obsevanju (Kvarkadabra, 2009)

Ekvivalentna doza (Sv)	Posledice obsevanja
0 do 0,5	Ni izrazitih učinkov, spremembe v krvni sliki.
pribl. 1	V 5 do 10 % se v prvem dnevu pojavi slabost.
pribl. 2	V 50 % v prvem dnevu slabost in bruhanje.
pribl. 3	Že okoli 20 % smrtnih primerov v prvih 2-6 tednih.
4 do 5	50 % smrtnost, okrevanje preživelih pol leta.
10	Slabost, drhtenje po nekaj urah. Preživelih ni.
50	Trenutna onesposobljenost. Preživelih ni.

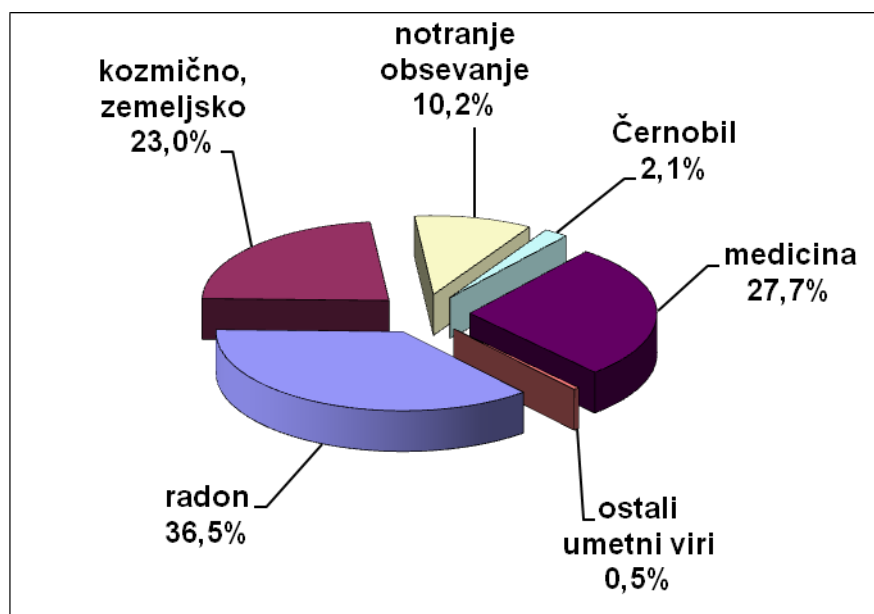
2.3.5 Omejitve doz

Najvišje doze, ki jih lahko prejme posameznik, so zakonsko omejene. Omejitve morajo biti spoštovane ne glede na stroške. Zakonsko omejena letna doza za delavce

v jedrski elektrarni je 50 mSv. V kratkem času po celem telesu prejeta doza od 4 do 6 Sv povzroči smrt. Vse prejete doze naj bodo čim nižje. Zmanjšujemo jih daleč pod zakonske omejitve (ALARA princip). ALARA je okrajšava za *As Low As Reasonably Achievable*, kar pomeni "nizko, kolikor se razumno še lahko doseže", oz. z drugimi besedami pomeni zmanjšati dozo sevanja izpostavljenih oseb na najnižjo možno raven ob upoštevanju ekonomskih in socialnih dejavnikov.

Poglejmo si nekatere prispevke sevanja (slika 8) (ICJT, 2009):

- Letni prispevek naravnega okolja je 2,4 mSv. Največji delež sevanja iz naravnega okolja prispeva plin radon katerega potomci so sevalci alfa.
- Letni prispevek umetnih virov (medicina, industrija) je 0,4-1,5 mSv.
- Letni prispevek iz NE Krško je 0,01 mSv.
- Celotni prispevek Černobilske nesreče od leta 1986 je 0,72 mSv.
- Celotni prispevek dosedanjih jedrskih poskusov v ozračju je 7,2 mSv.



Slika 8: Delež glavnih sevalcev doz na zemlji (ICJT, 2009)

2.3.6 Uporaba radioaktivnih snovi

Radioaktivne snovi oziroma sevanje nam poleg uporabe v jedrskih elektrarnah (za proizvodnjo energije) omogočajo mnoge postopke v medicini (rentgensko slikanje, zdravljenje tumorjev, diagnostika) in industriji (slikanje zvarov in iskanje napak v

kovinah, merjenje debeline in nivojev, sterilizacija hrane in medicinske opreme, javljalniki požarov ipd).

3 VRSTE NAPRAV ZA MERJENJE RADIOAKTIVNEGA SEVANJA

Radioaktivnega sevanja s človeškimi čutili ne moremo zaznati, izjemoma pri visokih vrednostih (blisk v očeh, pekoč občutek, itd.). Lahko pa ga zanesljivo odkrivamo in merimo z napravami, ki delujejo na osnovi fizikalnih učinkov sevanja (tabela 4). Delujejo na različne načine:

- *štetje delcev* na določeno časovno enoto,
- *površinska kontaminiranost* (Bq/cm^2) - doza na površinsko enoto,
- *dozimetrija* (biološke nevarnosti so odvisne od količine sevanja, ki pusti posledice v organizmu):
 - sprotno merjenje sevanja v okolici na uro ali merjenje hitrosti doze (D/t),
 - osebni dozimeter, ki meri direktno dozo - termoluminiscentni dozimeter - mesečni nadzor v že znanem okolju, kjer ni prisotnih velikih virov sevanja,
- *spektrometrija* - sevanje je analizirano po energijah.

Tabela 4: Učinki oziroma mehanizmi interakcij sevanja s snovjo (Dozimetrija, 1996)

Učinki	Naprave	Detektor
Električni	Ionizirajoča celica* Proporcionalni detektor* Geiger-Müllerjev detektor* ----- Polprevodniški detektor*	Plin Plin Plin ----- Germanij (Ge)
Kemijski	Fotografska plošča Filmski dozimeter Kemijski dozimeter	Emulzija Tekočina
Svetlobni	Scintilacijski detektor* Čerenkov detektor	Kristal Tekočina
Svetlobni	Scintilacijski detektor* Čerenkov detektor	Kristal Tekočina

* ... pogosta uporaba

3.1 Fotografska emulzija

Za detekcijo radioaktivnega sevanja se uporablja podobno kot pri svetlobi fotografski film ali plošča. Emulzija (debelina od 50 μm do 0,1 mm) vsebuje zrnca, ki se pod vplivom ionizirajočega sevanja kemično razgradijo. V razviti emulziji nastanejo počrnjene sledi delcev sevanja, električnih delcev ali fotonov, ki jih opazujemo z mikroskopom. Iz debeline in dolžine sklepamo o naboju in energiji delcev. Čim večji je električni naboj delca, tem večja je specifična ionizacija, tem debelejša je sled. Dolžina sledi je merilo za energijo, ki jo delec sevanja izgubi v emulziji, kar pomeni energijo delca, če se njegova sled v emulziji konča. Za vsako vrsto sevanja je potrebna posebna emulzija. Najpogosteje se uporabljajo zrnca srebrovih halogenidov (velikost 0,1 do 0,3 μm), ki so enakomerno razporejena po želatini.

Fotografska emulzija se uporablja za detekcijo kozmičnih žarkov, z njo so npr. odkrili pozitrone (Dozimetrija, 1996).

3.2 Meglična in mehurčna celica

V valjasti posodi s steklenimi stenami je nasičeno vlažen zrak, spodnja osnovna ploskev je premični bat. Če bat na hitro odmaknemo, se zrak v celici adiabatno raztegne, ohladi in prenasiti z vlago. Presežek vodne pare iz prenasičenega zraka se kondenzira, najprej in najmočneje ob kondenzacijskih jedrih, na primer po prašnih delcih in ionih v zraku; nastanejo vodne kapljice, na katerih se svetloba siplje. Sled delca sestavljajo ioni, zato postane vidna kot sled vodnih kapljic. Svetloba osvetljuje sledi od strani, opazujemo ali slikamo pa jih od zgoraj.

Podoben pojav kot v meglični celici pogosto opazimo v naravi, npr. sled letal v velikih višinah, kjer je zrak močno ohlajen. Vodna para iz izpušnih plinov letalskih motorjev se kondenzira na ionih in prašnih delcih, ki izhajajo z izpušnimi plini.

Meglična celica je primerna za detekcijo električnih delcev z visoko specifično ionizacijo, npr. žarkov alfa. Elektroni in fotoni gama se v redkem zraku ne ustavijo. Zanje je primerna tako imenovana mehurčna celica. Ta je zgrajena podobno kot meglična celica, le da namesto zraka vsebuje gosto kapljevino z majhno površinsko napetostjo, npr. tekoči vodik pri temperaturi 27 K. V celici je visok tlak in kapljevina je segreta tik pod vreliščem. Tlak v celici nenadoma zmanjšamo, kapljevina se

pregreje in v njej hipoma nastanejo mehurčki pare; najprej okrog ionov, ki učinkujejo kot aktivacijska jedra za vrenje. Sled mehurčkov opazujemo podobno kot pri meglični celici (Dozimetrija, 1996).

3.3 Plinski števci (detektorji)

V plinskih števcih se kot detektorska snov uporablja razredčen plin, večinoma argon z raznimi primesmi. Sledi ionskih parov, ki jih v plinu ustvarjajo detektirani delci sevanja, registriramo kot električni signal, ki ga ojačimo in štejemo.

V osnovi so to kondenzatorji znotraj katerih se nahaja plin. Če postavimo tak kondenzator s plinom v obsevano polje, se notranji plin ionizira (tvorijo se pozitivni in negativni delci), kar je prikazano na sliki 9. Če med ploščama kondenzatorja ni električne napetosti, se pari rekombinirajo v določeni časovni enoti. Ko pa med plošči priklopimo električno napetost, prične elektromagnetno polje privlačiti delce. Pri nizki napetosti to poteka počasi tako, da se pari še lahko rekombinirajo. Vendar pa določeni nabiti delci vseeno pridejo do plošče.

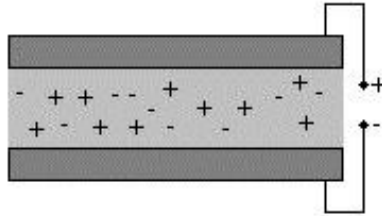
Ti števci so najpogosteje narejeni v obliki podolgovate valjaste cevi. vzdolž osi cevi je napeta tanka kovinska žička, ki je električno izolirana od kovinskega plašča. Med plaščem in žičko je električna napetost več sto do tisoč voltov (žička je pozitivna, plašč je negativen). Delci sevanja na poti skozi števec ionizirajo atome plina.

Sproščeni elektroni in pozitivni ioni se v električnem polju gibajo pospešeno. Ioni k plašču in elektroni k žički. V neposredni bližini žičke, kjer je električno polje najmočnejše, elektroni začno dodatno ionizirati atome plina. Sprosti se pravi plaz sekundarno sproščenih elektronov, ki zgrmi na žičko. Tako nastane električni signal (pulz), ki ga še dodatno ojačimo s tem, da damo med plošče kondenzatorja plin pod pritiskom.

Nasičenje je sorazmerno s sevanjem v okolici, za merjenje razlik v tokovih pa uporabljamo posebne merilce, saj klasični ampermetri namreč niso dovolj natančni.

Odvisnost nastalega toka od priključene napetosti (pri danem vpadnem sevanju) je podobna kot pri toku v plinu. Glede na velikost uporabljene anodne napetosti (v katerem delu tokovne karakteristike števec deluje) poznamo več vrst plinskih števec (Dozimetrija, 1996):

- ionizacijska celica,
- proporcionalni števec,
- Geiger - Müllerjev števec.



Slika 9: Plinski detektorji (osnovni princip konstrukcije)

3.3.1 Ionizacijska celica

Uporablja napetost od 100 do 300 V. Celica obratuje v ravnem nasičenem delu tokovne karakteristike. Nastali električni signal je neodvisno od napetosti premo sorazmeren s številom primarnih ionskih parov, ki jih delec sevanja sproži v plinu. Ker zaradi nizke napetosti ni elektronskih plazov, je nastali električni signal šibak in je potrebna precejšnja ojačitev. Ionizacijska celica se uporablja za detekcijo močnega sevanja in ima lahko velik volumen (Dozimetrija, 1996).

3.3.2 Proporcionalni števec

Uporablja napetost od 700 do 800 V. Polnilni plin je argon in metan, tlak je 1 bar. Žička je zelo tanka 0,01 mm, zato je električno polje v njeni neposredni bližini dovolj močno, da nastanejo elektronski plazovi, ki ojačijo izhodni signal. Ta je okrog tisočkrat močnejši kot pri ionizacijski celici.

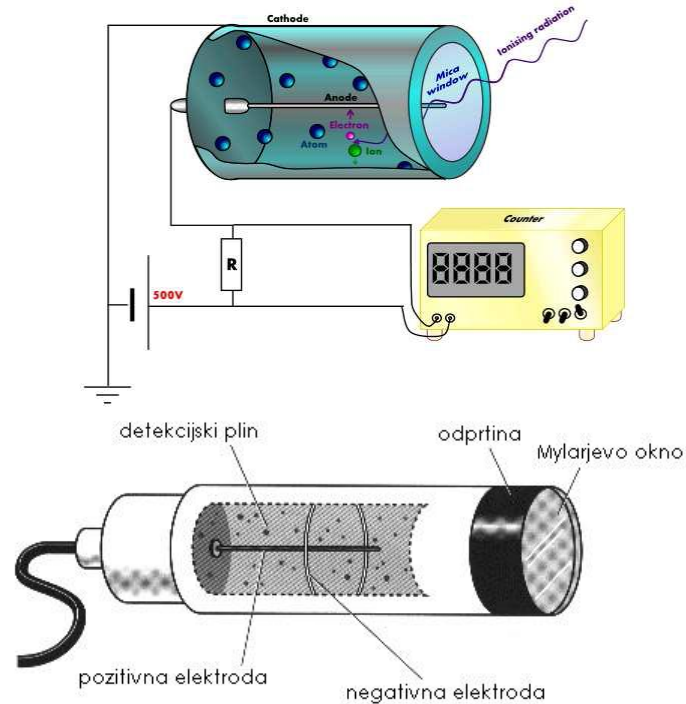
Čeprav je izhodni signal (napetost na anodnem uporu R) odvisen od priključene anodne napetosti U (ker ta števec deluje na strmem delu tokovne karakteristike), je vendarle premo sorazmeren s številom primarnih ionskih parov, to je z energijo vpadnega sevanja - od tod tudi ime proporcionalni števec. Proporcionalni števec se uporablja predvsem za merjenje energij delcev sevanja (Dozimetrija, 1996).

3.3.3 Geiger Müllerjev števec

Ta števec uporablja napetost od 1000 do 1200 V. Polnilni plin je argon z različnimi dodatki, tlak je od 10 - 500 mbar. Plaz ionizacij okrog žičnate anode se zaradi dodatnih ionizacij s fotoni, ki se sprostijo ob prvih ionizacijah, razvleče vzdolž celotne anode. V kratkem času nekaj mikrosekund se razvije močan signal, ki je neodvisen od primarnega števila ionskih parov, to je od energije vpadnih delcev sevanja. S tem števcem le registriramo prehod delca sevanja skozi števec, ne moremo pa meriti njegove energije.

Z močno sekundarno ionizacijo se ob žičnati anodi nabere plast pozitivnih ionov, ki močno oslabi električno polje, polmer žičke se navidezno poveča tako, da je nadaljnja ionizacija možna šele, ko se masivni pozitivni ioni odmaknejo od žičke k plašču in se prvotno električno polje spet obnovi. Med tem časom števec ne more šteti - t. i. mrtvi čas števca, običajno je to okrog 100 μ s. Da se mrtvi čas števca zmanjša, so polnilnemu plinu dodani različni dodatki npr. brom. Ker se ti sčasoma porabijo, je življenjska doba Geiger Müllerjevega števca omejena npr. lahko prešteje do 10^9 pulzov. S tem števcem zgolj ugotavljamo prisotnost radioaktivnega sevanja, ne glede na njegovo vrsto ali energijo (Dozimetrija, 1996).

Geiger Müllerjev števec uporabljamo za ugotavljanje ionizirajočih delcev. Je s plinom argonom napolnjen valjasti kondenzator z zelo tanko notranjo elektrodo. Pozitivni pol visoke enosmerne napetosti je priključen na notranjo elektrodo, negativni pa na zunanjo. Ionizirajoči žarek povzroči ionizacijo plina, s tem pa postane plin prevoden. Pozitivni ioni kationi potujejo proti zunanji negativni elektrodi, elektroni pa proti notranji pozitivni elektrodi. V bližini tanke notranje elektrode je močno električno polje, v katerem elektroni pri trkih še dodatno ionizirajo atome plina, posledica tega pa je sunek električnega toka, oziroma kratek napetostni sunek na priključenem upor R . Impulz ojačimo in vodimo v števno napravo (slika 10). Visoko občutljivost Geiger Müllerjeve števne naprave dosežemo s pravilno geometrično porazdelitvijo elektrod in sicer s tanko anodo v obliki žičke, ter valjasto katodo z veliko površino. Verjetnost, da pri ionizaciji sproščeni negativni elektroni takoj dosežejo anodo, je majhna. Praviloma letijo mimo anode naprej. Zgoščene silnice polja ob anodi pa jih prisilijo v ukrivljeno pot, med katero povzročijo številne trke preden dosežejo anodo (Seliger, 2007).

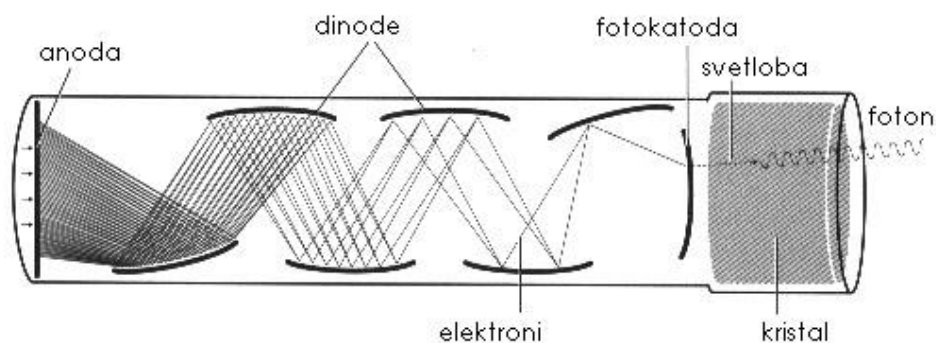


Slika 10: Geiger Müllerjev števec (Dozimetrija, 1996)

3.4 Scintilacijski števec

Nekatere luminiscenčne snovi t. i. scintilatorji (npr. kristal natrijevega jodida) po absorpciji delcev sevanja oddajo svetlobne bliske (fosforescenca), podobno kot po absorpciji ultravijoličnih fotonov. Npr. steklo s plastjo cinkovega sulfida med obsevanjem z žarki alfa luminiscira. Vsak absorbiran delec alfa povzroči kratek svetlobni blisk.

V scintilatorju se energija delcev vpadnega sevanja deloma spreminja v fotone, večinoma pa v toploto. Čim več energije se z delci absorbira v scintilatorju, tem močnejši svetlobni blisk nastane. Bliske lahko neposredno opazujemo z mikroskopom, še bolje pa je, da se električno ojačijo v fotopomnoževalki v električni signal (Dozimetrija, 1996).



Slika 11: Fotopomnoževalka (Dozimetrija, 1996)

3.4.1 Fotopomnoževalka

Deluje podobno kot fotocelica. Ima fotokatodo, iz katere nastali svetlobni blisk izbija elektrone, več dodanih elektrod npr. do 20 t. i. dinod za povečevanje števila izbitih elektronov ter pozitivno anodo, ki zbere končni električni signal in ga pošlje skozi anodni upor R . Prva dinoda, ki je tik za fotokatodo, je za 100 - 200 V bolj pozitivna kot fotokatoda, druga dinoda pa ravno za toliko bolj pozitivna kot prva itd. Svetlobni signal, ki ga vpadni delec povzroči v scintilatorju, se s svetlobnim vodnikom prenese do fotokatore, iz katere izbije elektrone. Število izbitih elektronov je premo sorazmerno z energijo vpadnih oz. absorbiranih delcev. Iz fotokatore izbiti elektroni se pospešijo k prvi dinodi, udarijo ob njo in iz nje izbijejo več sekundarnih elektronov. Ti se pospešijo k drugi dinodi, nato k tretji, itd. Začetni tok elektronov se tako močno ojači od 10^6 do 10^8 krat (slika 11). Izhodni električni signal, to je napetost na anodnem uporniku R , je premo sorazmeren z energijo vpadnega sevanja. Zato lahko scintilacijski števec uporabljamo podobno kot proporcionalni števec za merjenje energije vpadnega sevanja. Prednost scintilacijskega sevanja je predvsem v tem, da se pulz razvije v izredno kratkem času (mikrosekunda) in je zato primeren za štetje hitro spreminjajočih se pojavov. Razen tega scintilator mnogo učinkovitejše absorbira fotone gama kot npr. detektorski plin v plinskih števcih. Scintilacijski števeci se uporabljajo predvsem za detekcijo in merjenje energije žarkov gama.

Najprimernejši scintilatorji so:

- antracen in
- natrijev jodid s primesjo talija.

V te namene pa se uporabljajo tudi tekoči kristali (Dozimetrija, 1996).

3.5 Polprevodniški detektor

Polprevodniško diodo, ki je priključena v zaprti smeri tako, da ne prevaja električnega toka, lahko uporabimo tudi za detekcijo sevanja. Vpadno ionizirajoče sevanje prodre skozi tanko plast do zaporne plasti, kjer sprošča elektrone in vrzeli. Ti se v močnem električnem polju, ki je v zaporni plasti, pospešijo in skozi zaključen električni krog steče električni tok, ki je sorazmeren z energijo vpadnega sevanja.

Polprevodniški detektor se uporablja podobno kot ionizacijska celica, je nekakšna trdna ionizacijska celica. Primeren je predvsem za detekcijo in merjenje energije sevanja gama (Dozimetrija, 1996).

3.6 Nevtronski detektorji

Nevtroni so električno nevtralni in ne ionizirajo atomov snovi, zato jih ne moremo neposredno meriti podobno kot fotone gama ali električne delce (alfa in beta). Pomagamo si tako, da detektorski snovi običajnih detektorjev dodamo primesi, v katerih vpadni delci (npr. fotoni gama, nevtroni, ali pospešeni el. delci) z jedrsko reakcijo, za katero je značilno, da se del mase spreminja v energijo, sproščajo fotone ali električne delce, ki jih nato zaznamo. Vpadne delce označujemo z (n - nevtroni, p - protoni, α - helioni, d - devteroni, γ - fotoni, e^- - hitri elektroni, itd.).

Za detekcijo nizkoenergetskih termičnih nevtronov ($< 0,5$ eV) so primerne predvsem reakcije $B^{10} (n, \alpha) Li^7$, $Li^6 (n, \alpha) H^3$ ter cepitev U^{235} ali Pu^{239} . Ionizacijski celici ali proporcionalnemu števcu se doda neradioaktiven izotop bora (B^{10}) bodisi v plinski obliki (npr. kot plin BF_3) ali se katodni plašč prevleče z borovo spojino npr. z borovim karbidom. Vpadni nevtroni, ki se na poti skozi števec absorbirajo v jedrih B^{10} , povzročijo razpad na Li^7 energije 0,84 MeV ter delce alfa energije 1,47 MeV, ki nato ionizirajo detektorski plin. Znani so predvsem tako imenovani BF_3 števci termičnih nevtronov. Uporabne so tudi t.i. cepitvene celice. Okence ionizacijske celice je lahko prevlečeno s tanko plastjo oz folijo U^{235} ali Pu^{239} . Po absorpciji vpadnih nevtronov se jedra U^{235} cepijo in nastali cepitveni produkti so močno ionizirani in imajo precejšno kinetično energijo, zato močno ionizirajo detektorski plin v celici. Cepitvena celica da zelo močan in izrazit električni signal.

Hitri visokoenergetski nevtroni energije nekaj MeV se premalo absorbirajo v jedrih, da bi jih lahko merili z omenjenimi števci. Zanje je primeren npr. detektor na odzivne protone. Detektorskemu plinu običajnih plinskih detektorjev se lahko doda vodikov plin, ali pa so stene prevlečene s parafinom, ki vsebuje veliko vodika. Vpadni hitri nevtroni zadenejo v vodikova jedra in jih odrinejo, da se ta pospešijo skozi detektorski plin. Drugi je tako imenovani pragovni detektor, pri katerem se izkoriščajo endoergične reakcije s hitrimi nevtroni. Običajnemu plinskemu detektorju je dodan U^{238} ali Th^{232} . Jedra teh elementov se cepijo le, če je energija vpadnih nevtronov večja od 1 MeV. Lahko se izkoristi tudi jedrska reakcija $N^{14} (n, p) C^{14}$, ki ima prag cepitve pri 0,55 MeV (Dozimetrija, 1996).

3.7 Termoluminiscentni dozimetri (TLD)

Se uporabljajo za osebno dozimetrijo oseb, ki so pri svojem delu izpostavljeni ionizirajočemu sevanju zunanjih virov in so zakonsko obvezani za vse, ki bi lahko prejeli doze večje od mejnih vrednosti za prebivalstvo (1 mSv/leto).

Novejše TLD najpogosteje sestavljajo štiri detektorji »tabletke« iz kristalov kot je npr. LiF (litijev fluorid) prekritimi s filtri. Ti kristali absorbirajo del energije sevanja. Obsevanje kristala povzroči vzbujanje elektronov znotraj kristala, tako da se preselijo v valenčni pas z višjo energijo. Tako ujete elektrone sprostimo tako, da kristal segrejemo. Ko se vrnejo v prvotni valenčni pas z nižjo energijo, odvečno energijo oddajo v obliki vidne svetlobe. Količina oddane vidne svetlobe je sorazmerna energiji, ki se je absorbirala v kristalu. Segrevanje in meritev se opravita v posebnih čitalnikih, ki rezultate meritev preračunajo v prejeto dozo. Iz odčitkov vseh štirih detektorjev in njihovih razmerij ocenimo vrsto in energijo sevanja s katerim je bil dozimeter obsevan in to upoštevamo pri izračunu prejete doze.

Vsak dozimeter je opremljen s številko, ki je kodirano zapisana v ohišju dozimetra in na nalepki na samem dozimetru. Na drugi strani dozimetra pa je nalepka z imenom in priimkom osebe, ki dozimeter uporablja (Koželj in drugi, 2006).

4 IONIZIRAJOČE SEVANJE V ZDRAVSTVU

Uporaba sevanja v medicinske namene se je pričela pred več kot 100 leti, ko je Wilhelm Conrad Röntgen 8. novembra 1895 med proučevanjem katodnih žarkov odkril novo vrsto sevanja. Fizik je hotel spoznati skrivnostne nevidne žarke, ki so prihajali iz Crookes-ove brezračne (vakuumske) cevi in zaradi katerih so stene postale ponoči svetleče. Röntgen je cev ovil s črnim papirjem in usmeril žarke na ekran, prevlečen s fluorescenčno maso: ekran je postal svetleč. Med cev in ekran je dal svojo roko - na svetlem ozadju se je v temnih obrisih pojavila slika njegovih kosti. Tako je Röntgen naredil prvo radiografijo s pomočjo žarkov X, kot jih je poimenoval. Kasneje so jih njemu v čast poimenovali röntgenski žarki.

Le tri mesece po odkritju so jih prvič uporabili v medicinske namene. V neki bolnišnici v ZDA so namreč naredili prvi klinični posnetek. Za svoje odkritje je W. C. Röntgen leta 1901 dobil prvo Nobelovo nagrado za fiziko v zgodovini.

Najpreprostejšega rentgenskega slikanja smo deležni takrat, ko si zlomimo kakšno kost ali npr. zvijemo gleženj. To poteka tako, da pod del telesa, ki ga želimo pregledati, položimo film, nato pa z rentgensko svetlobo presvetlimo pacienta. Rentgenski žarki so precej prodorni, zato preidejo skozi tkivo, zadenejo film in ga počrnijo na mestu zadetka. Zaradi različne prepustnosti tkiv za sevanje, bo tudi film bolj počrnel na mestu, kjer je tkivo dobro prepustno (mišica) kot na mestu, kjer je bolj slabo prepustno (kost).

4.1 Vrste slikanja notranjosti človeškega telesa

4.1.1 CT (Computed Tomography)

Slabost klasičnega načina rentgenskega slikanja je v tem, da dobimo projekcijo le v eni smeri. Včasih pa je koristno pacienta pregledati podrobneje, zato so razvili metodo računalniške tomografije (CT - computed tomography), pri kateri slikamo pacienta z več strani tako, da vir žarkov X in sprejemniški (detektorski) sistem istočasno krožita okrog vzdolžne osi telesa v posameznih ravninah ("rezinah" telesa). Razlike v absorpciji žarkov X skozi posamezna tkiva pretvori računalnik v sliko na zaslonu. Iz teh meritev z metodo dekonvolucije (v nuklearni medicini pomeni ta izraz način matematične obdelave časovne krivulje radioaktivnosti nekega organa, ki

izloči iz krivulje posamezno funkcijo na osnovi matematičnega modela kinetike določenega radiofarmaka) izračunamo, kakšna je notranjost telesa. Postopek so omogočili šele visoko zmogljivi računalniki. Slike, ki jih dobimo, najbolj spominjajo na tehniko rezanja človeškega telesa na tanke rezine (Mali, 2000).

CT je metoda, ki daje mnogo ostrejši posnetek notranjosti telesa, kot pa druge metode. Zdravniki lahko zaradi boljšega kontrasta razlikujejo med različnimi tkivi, kot so kosti, mišice in maščoba. S to metodo ugotavljajo poškodbe medvretenčnih ploščic, omogoča pa tudi neboleč pregled črevesja (virtualna koloskopija). Z ultra hitrim CT lahko samo v dvajsetih sekundah posnamejo srčno ožilje in ugotovijo celo najmanjše poapnenje, ki je prvi znak obolenja.

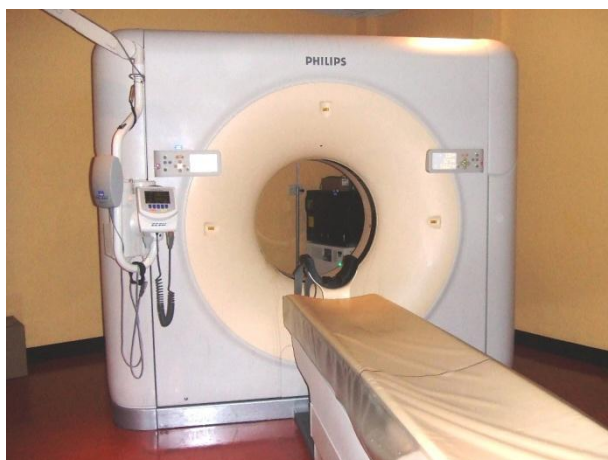
Nove generacije t.i. multi-slice CT naprav so oblikovane tako, da samo v 0,3 s posnamejo do štiri plasti vzorca telesa in v manj kot sekundi ustvarijo matrico slike 512 x 512. Celoten prsni koš (40 vzorcev plasti, debelih 8 mm) lahko posnamejo samo v desetih sekundah. Poleg velikega napredka glede hitrosti, so znanstveniki dosegli še premike na področju zmogljivosti obdelave, prikaza slike ter bolnikovega udobja.

Za CT preiskavo se odločijo takrat, ko je potrebno prikazati organe, ki jih je težko prikazati z drugimi slikovnimi metodami, ali pa to sploh ni možno, npr. možgane. CT se uporablja tudi, ko druge metode ne zagotovijo zanesljivih dokazov o bolezni, klinična slika pa kaže na bolezenski proces, ki bi ga bilo mogoče ozdraviti z operacijo. Opravijo jo tudi takrat, ko so si podatki, zbrani s pomočjo drugih preiskovalnih metod, nasprotujoči ali premalo zanesljivi za dober načrt in zanesljivo izvedbo operacije ali drugih oblik zdravljenja. Pri tem CT opravijo po delih, na katerih bi utegnili potekati bolezenski proces (Bioforum, 2008).

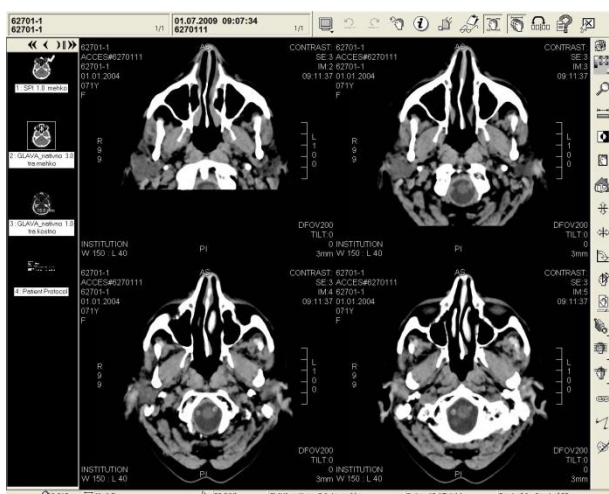
Ker je pacienta potrebno presvetliti z rentgensko svetlobo z vseh strani, je doza prejetega sevanja ogromna. Pri preiskavi glave prejme pacient dozo, ki ustreza 10 mesecem naravnega sevanja, pri preiskavi trupa pa dozo, primerljivo 4 letom naravnega sevanja. Za tako preiskavo se odločamo le v primerih, ko je to nujno potrebno, npr. diagnosticiranje raka (Mali, 2000).

CT je postal razširjen v osemdesetih letih. Po nekaterih ocenah je zdaj po vsem svetu v uporabi skoraj 50 tisoč CT-skenerjev, od tega jih je 17 v Sloveniji. CT naprava je

prikazana na sliki 12, primer fotografije, ki jo dobimo iz te naprave pa na sliki 13 (Bioforum, 2008).



Slika 12: CT naprava (Interno gradivo OI, 2009)



Slika 13: Fotografija izdelana s CT napravo (Interno gradivo OI, 2009)

4.1.2 PET (Positron Emission Tomography)

Metoda PET je najnovejša sodobna diagnostična metoda, ki jo namerava v Slovenijo kmalu uvesti tudi slovenska nuklearna medicina. To je raziskovalna in diagnostična metoda, s katero ugotavljamo funkcije organov. Z metodo PET je znanstvenikom uspelo narediti viden celoten postopek presnove v telesu, kar vidimo tudi na sliki 15. Da bi pogledali v notranjost telesa, lahko poleg rentgenskih žarkov uporabimo tudi drugačno sevanje. Pri pozitronski emisijski tomografiji (PET - Positron Emission Tomography) vnesemo v pacienta radioaktivni izvor (najpogosteje se uporablja izotop fluora - F^{18}), ki razpada z beta pozitivnim razpadom. To pomeni da

radioaktivno jedro izseva pozitron - to je antidelec elektrona, ki nato reagira z elektronom - dobimo dva visoko energijska fotona - žarka gama. Pri PET-u izkoriščamo dejstvo, da morata zaradi ohranitve energije in gibalne količine imeti oba elektrona enako energijo (ki je enaka mirovni masi elektrona - 0,5 MeV) in se gibati v nasprotno smer. Ko v detektorju zaznamo dva 0,5 MeV fotona, lahko potegnemo premico in z veliko gotovostjo trdimo, da sta fotona nastala nekje vzdolž te premice. Pacienta preiščemo z vseh strani in iz meritev izračunamo porazdelitev radioaktivnega izvora (Bioforum, 2008).

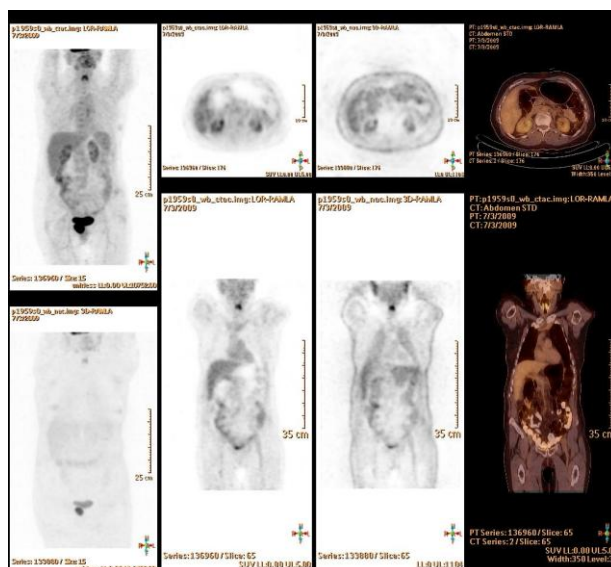
Radioaktivni izotop sorazmerno lahko vgradimo v biološke molekule (pogosto uporabljena snov je sladkor (glukoza), kjer enega od ogljikovih atomov nadomestimo z radioaktivnim fluorom).

Tako nastane metabolično aktivna molekula ^{18}F FDG (fluor-deoksi-glukoza). Med presnavljanjem namreč tkivo, obolelo za rakom, pospešeno vsrkava oz. porablja bistveno več, v krvni obtok vbrizganega, radioaktivnega sladkorja (npr. molekulo ^{18}F FDG). Na sliki je zato to območje temnejše, kot zdravo območje. Zato lahko s primerno izbiro molekule dosežemo, da se bo radioaktivna snov zbrala v tkivu, ki ga želimo preiskati. Pri metodi PET torej lahko aktivno izbiramo, katero tkivo si želimo ogledati. Prav tako lahko opazujemo časovni potek zbiranja radioaktivne snovi v tkivu in se iz tega naučimo kaj novega o metabolizmu ali funkciji kakega organa (Mali, 2000).

Metoda PET spada trenutno med najuspešnejše metode za odkrivanje metastaz različnih malignomov. Z njo je mogoče tudi dokaj hitro ugotoviti, ali določena vrsta kemoterapije pri posameznem rakavem bolniku sploh učinkuje. Metodo PET pri njenem uveljavljanju v Sloveniji ovira to, da je zelo draga in da v bližini ni dobavitelja. PET naprava je prikazana na sliki 14 (Bioforum, 2008).



Slika 14: PET naprava (Interno gradivo OI, 2009)



Slika 15: Fotografija izdelana s PET napravo (Interno gradivo OI, 2009)

Pri metodah CT in PET izkoriščamo ionizirajoče sevanje, ki je na splošno človeku lahko škodljivo. Obstajata pa tudi metodi, pri katerih ne potrebujemo ionizirajočega sevanja in sta po sedaj znanih podatkih zdravju popolnoma neškodljivi. To sta jedrska magnetna resonanca in ultrazvok.

4.1.3 NMR (Nuclear Magnetic Resonance ali MRI - Magnetic Resonance Imaging)

Jedrska magnetna resonanca je fizikalni pojav, ki je posledica interakcije magnetnih momentov atomskih jeder z zunanjim elektromagnetnim poljem, ki ima frekvenco enako lastni frekvenci teh jeder. Pri tem merimo magnetne lastnosti snovi posredno prek absorbiranega in izsevanega elektromagnetnega valovanja. NMR je

spektroskopska tehnika, s katero lahko določamo fizikalne, kemijske in elektronske lastnosti molekul. Služi tudi kot osnova za slikanje z magnetno resonanco. Pojav sta leta 1946 neodvisno odkrila Felix Bloch in Edward Mills Purcell.

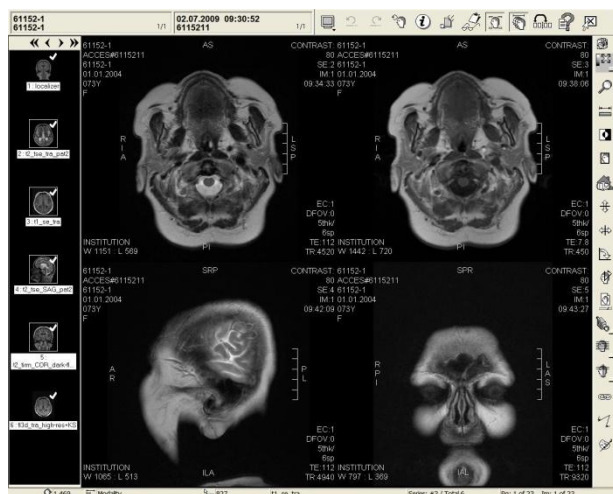
Pri jedrski magnetni resonanci vzorec atomskih jeder vstavimo v statično magnetno polje. Tuljava, ki obdaja ta vzorec, je v principu antena, ki ga obseva z radijskimi valovi. Pri določeni frekvenci atomskega jedra v vzorcu absorbirajo valovanje in ob tem preidejo iz osnovnega v vzbujeno stanje. Po določenem času se jedra vrnejo v osnovno stanje in pri tem izsevajo elektromagnetno valovanje, kar zazna tuljava. Merimo lahko, kolikšen del prejete energije so jedra izsevala nazaj ter po kolikšnem času. Za postopek jedrske magnetne resonance potrebujemo jedra, ki imajo od nič različen magnetni moment. Takšna jedra morajo imeti liha števila protonov ali nevtronov, npr. H^1 , C^{13} , N^{15} , F^{19} (Wikipedija, 2009).

Pri metodi jedrske magnetne resonance izkoristimo dejstvo, da se atomska jedra v določenem pogledu obnašajo kot magnetna igla (magnetnica). Tako, kot se magnetna igla v magnetnem polju postavi v smer polja (v zemeljskem magnetnem polju se postavi v smeri sever - jug), se tudi atomi v zelo močnem magnetnem polju uredijo. Take magnetnice lahko z ustrezno motnjo prisilimo v neke vrste kroženje. Vrteli bi se podobno kot vrtavka, pri tem pa bi bila hitrost vrtenja sorazmerna z močjo magnetnega polja. Vsaka vrteča magnetnica inducira električno napetost, ki pa je zelo majhna.

Z občutljivimi instrumenti lahko izmerimo, kakšna je inducirana napetost in iz tega izračunamo, kakšna je porazdelitev teh atomov po tkivu. S to metodo dobro vidimo porazdelitev vode po telesu. MRI napravo ter primer fotografije prikazujeta sliki 16 in 17 (Bioforum, 2008).



Slika 16: MRI naprava (Interno gradivo OI, 2009)



Slika 17: Fotografija izdelana z MRI napravo (Interno gradivo OI, 2009)

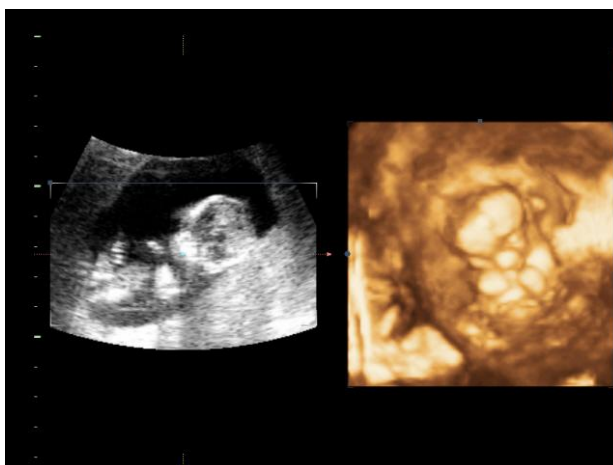
4.1.4 Ultrazvok

Pri tej metodi uporabljamo zvok z visoko frekvenco. Zvok je namreč valovanje, ki se širi po snovi. Lahko bi rekli, da z oddajnikom »kričimo« v pacienta in »poslušamo«, kako odmeva. Iz časa, ki preteče do odmeva, lahko sklepamo na sestavo določenega dela telesa ali organa, na meje med tkivi in podobno. Pri tem se frekvenca valovanja spremeni, če se valovanje odbije na premikajoči oviri.

Temu pojavu pravimo Dopplerjev pojav in ga uporabljajo tudi policisti, ki merijo hitrost avtomobilov. S tem načinom lahko merimo tudi hitrost pretoka krvi skozi žile, ki je precej pogosta preiskava v pozni nosečnosti. Ultrazvok je zelo dober za preiskave mehkih tkiv. Ultrazvok je prikazan na sliki 18, na sliki 19 pa vidimo fotografiji, narejeni z običajnim in 3D načinom.



Slika 18: Ultrazvok (Interno gradivo ZC, 2009)



Slika 19: Fotografija izdelana z ultrazvokom

Vse omenjene metode se uporabljajo za pogled v notranjost človeka. Metodi CT in PET delujeta na osnovi ionizirajočega sevanja, ki pa ga pri metodi NMR in ultrazvoku ni. Metode so med seboj komplementarne. Vsaka je nekako »specializirana« za svoje delo, vsaka nam odkrije nekaj drugega. Z NMR dobro vidimo razporeditev vode po telesu. Klasično rentgensko slikanje dobro loči med kostmi in mehkim tkivom.

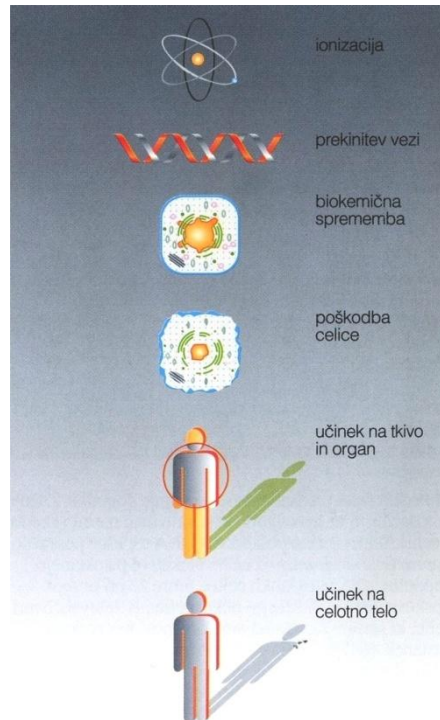
CT dobro loči tudi med mehкими tkivi in ponuja dobro prostorsko ločljivost. Pri PET-u pa lahko opazujemo tudi dinamično procesov, ultrazvok pa je zelo dober za preiskave mehkih tkiv.

Doze, ki jih prejmemo pri slikanju z ionizirajočim sevanjem so majhne. Pri slikanju zlomljene noge pacient prejme dozo, ki ustreza enemu dnevu naravnega sevanja, pri

slikanj zob pa dozo, ki ustreza trem dnevom naravnega sevanja. Z rentgenskim pregledom pljuč, ki ga vsi opravimo pred svojo prvo zaposlitvijo, pa dobimo dozo, ki ustreza enemu tednu naravnega sevanja. Izjema je CT, kjer je izpostavljenost sevanju res zelo velika (10 mesecev do 4 leta naravnega sevanja), vendar pa so takih preiskav deležni predvsem težki bolniki, kjer je koristnost take preiskave veliko večja od škodljivosti (Mali, 2000).

4.2 Učinki sevanja

Živi organizmi so, poleg številnim naravnim dejavnikom, izpostavljeni tudi takim, ki jih je ustvaril človek. Ti lahko s svojim vplivom na atome, molekule, celice in tkiva v organizmu povzročijo začasno in popravljivo odstopanje od normalnih življenjskih procesov, lahko pa tudi trajne in nepopravljive poškodbe. Eden takih dejavnikov, ki mu je človek že od nekdaj izpostavljen, so različne vrste sevanja. Naravnemu sevanju, ki izvira iz zemlje in vesolja, se ne moremo izogniti. Poleg naravnega sevanja pa smo izpostavljeni tudi ionizirajočemu sevanju v medicini, industriji in raziskovalni dejavnosti. Skoraj vsako čezmerno sevanje lahko škodi organizmu. Ionizirajoče sevanje ima krajšo valovno dolžino kot druga sevanja, zato pa večjo energijo in prodornost, saj v snoveh prodre tudi več metrov daleč. Pri ionizaciji pride v atomu do izbitja orbitalnega elektrona, zato se spremenita njegova struktura in reaktivnost. Čeprav pri ionizaciji prihaja samo do interakcij z elektroni v atomih, te povzročijo verižno reakcijo, prekinitev nekaterih vezi med molekulami, spremembe biokemičnih poti, transformacije celic, zato vplivajo tako na organe kot na celotno telo. Slika 20 prikazuje zaporedje dogodkov pri sevalni poškodbi od ionizacije v atomu do učinka na celotno telo. Vpliv ionizirajočega sevanja na žive snovi preučuje radiologija (Serša, 2004).



Slika 20: Zaporedje dogodkov pri sevalni poškodbi (Serša, 2004)

Ionizirajoče sevanje v bioloških snoveh povzroči zaporedje različno dolgih procesov, ki jih lahko razdelimo v tri faze in smo jih prikazali v tabeli 5:

- *Fizikalna faza* predstavlja interakcijo ionizirajočega sevanja z atomi, iz katerih je sestavljena biološka snov. Hitri elektroni potujejo skozi molekulo deoksiribonukleinske kisline (DNA) približno 10^{-18} sekunde, skozi celico sesalca pa 10^{-14} sekunde. Sevanje pri prehodu skozi snov reagira predvsem z orbitalnimi elektroni v atomih, kjer povzroči ionizacijo (izbitje elektronov) ali vzbujanje, kar imenujemo dvig elektrona na višji energetske nivo brez izbitja. Če imajo izbiti elektroni pri ionizaciji dovolj veliko energijo, lahko ponovno ionizirajo ali vzbujajo druge elektrone v sosednjih atomih, kar vodi v zaporedje ionizacijskih dogodkov.
- *Kemična faza* poteka, ko poškodovani atomi in molekule reagirajo z drugimi celičnimi sestavinami v hitrih kemičnih reakcijah. Ionizacije in vzbujanja prekinijo kemične vezi in povzročajo tvorbo prostih radikalov. Slednji so zelo reaktivne in kratkožive molekule, ki zato pogosto reagirajo z drugimi molekulami, njihove kemične reakcije pa trajajo približno 1 ms. V tej fazi je

pomembna navzočnost lovilcev prostih radikalov, ki z nevtralizacijo zmanjšajo učinek sevanja.

- *Biološka faza* se začne z encimskimi reakcijami, ki popravljajo nastalo škodo v celici. Popravljalni mehanizmi celice uspešno popravijo veliko večino poškodb na DNA. Ker pa nekatere poškodbe ostanejo nepopravljene, lahko celica umre že pri prvem poskusu delitve, ali pa šele po nekaj celičnih delitvah. Vzrok za nastanek zgodnjih poškodb po obsevanju, kot so poškodbe kože, kostnega mozga ali sluznice tankega črevesa, je prav smrt celic, ki skrbijo za obnavljanje organov. Pozneje se v nekaj letih po obsevanju pojavijo pozne reakcije, kot so fibroza, poškodbe hrbtenjače in krvnih žil, še kasneje pa rak zaradi sevalne kancerogeneze. Biološka faza tako lahko traja od nekaj dni pa do nekaj let po izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju (Serša, 2004).

Tabela 5: Časovni potek dogodkov, ki jih povzroči ionizirajoče sevanje (Serša, 2004)

Časovna skala	Biološki učinki	Faze procesov
Delček sekunde 10^{-12} do 10^{-15} s	Absorpcija energije Vzbujanje/ionizacija	Fizikalna faza
10^{-6} do 10^{-9} s 10^{-3} s	Tvorba prostih radikalov Difuzija prostih radikalov Kemična reakcija Začetek poškodbe DNA Poškodbe DNA	Kemična faza
Sekunde Ure Dnevi Leta	Popravljanje DNA Stabilizacija poškodbe Umiranje celic Mutacije Transformacija celic Kromosomske aberacije Teratogeni učinki Nastanek raka Dedni učinki	Biološka faza

4.2.1 Fizikalni in kemični učinki sevanja

Ionizirajoče sevanje lahko sprosti v majhnem prostoru zelo veliko energije, ko jo izražamo v enoti elektronvolt (eV). Pri eni ionizaciji se sprosti približno 33 eV energije. To je zelo velika energija, ki zadošča za prekinitev močnih kemičnih vezi v molekulah, zato vsaka ionizacija, ki se zgodi na kritičnih mestih v celici, povzroči veliko škodo.

Vse vrste ionizirajočih sevanj v snovi, skozi katere potujejo, oddajajo svojo energijo. Učinki, ki pri tem nastanejo, so odvisni od vrste in energije sevanja. Tu govorimo o absorbirani dozi, ki smo jo že omenili v drugem poglavju o dozi sevanja.

Različne vrste sevanj povzročajo različno pogostost ionizacij na poti skozi tkivo, in sicer:

- *gosto ionizirajoče sevanje* (sevanje, ki odda svojo energijo pri veliki gostoti ionizacij na kratki razdalji),
- *redko ionizirajoče sevanje* (sevanje, ki odda svojo energijo z redkejšimi ionizacijami na daljši razdalji).

Glede na to lahko ločimo sevanja z visokim in nizkim linearnim prenosom energije (LET - *Linear Energy Transfer*). LET je definiran kot količina oddane energije sevanja na enoto poti v snovi ($\text{keV}/\mu\text{m}$). Nevtroni in sevanje α imajo visok LET, žarki X in žarki γ ter elektroni pa imajo nizek LET. Zaradi različne gostote ionizacij je biološki učinek za različne vrste sevanja na tkiva različen. Pri določanju potencialne biološke škode pa moramo poleg različnih vrst sevanja upoštevati tudi različno radioobčutljivost posameznih tkiv. Prav zato se uporablja efektivna doza, ki je vsota ekvivalentnih doz za obsevana tkiva ali organe z upoštevanjem tkivnih utežnih faktorjev. Slednji predstavljajo relativni delež določenega tkiva ali organa pri skupni poškodbi, nastali zaradi obsevanja celotnega telesa. Tako je npr. tkivni utežni faktor najvišji za gonade (0,2) in nižji za kožo (0,01). Pri obsevanju celotnega telesa je seštevek vseh tkivnih utežnih faktorjev 1.

Biološki učinek ionizirajočega sevanja je predvsem posledica poškodbe DNA, ki je kritična tarča. Ko se ionizirajoče sevanje absorbira v biološkem materialu, lahko pride do poškodbe kritične tarče. Osnovna enota organizma je celica, ki je sestavljena iz citoplazme (celična tekočina, ki obdaja celično jedro, sestavljena predvsem iz vode in beljakovin) in celičnega jedra, ki je nosilec DNA. Pri fizikalnih in kemičnih učinkih sevanja ločimo posledice glede na:

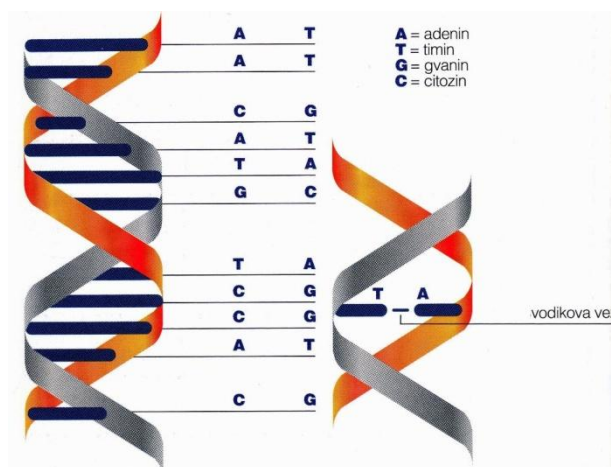
- *Direktne učinke sevanja*: Njihova posledica so ionizacije v molekuli DNA, na kateri je kodirana dedna informacija. Da bo prišlo do direktnega učinka sevanja je bolj verjetno pri sevanju z visokim LET. Direktne učinke sevanja na DNA so pogostejši pri gosto ionizirajočem sevanju.
- *Indirektne učinke sevanja*: Do indirektnega učinka sevanja pride pogosteje pri sevanju z nizkim LET. O njem govorimo, ko sevanje ne ionizira direktno kritične tarče. V tem primeru se energija odloži na drugih atomih in

molekulah, ki lahko nato posredujejo poškodbo na kritično tarčo. Poškodbe DNA so posledica tvorbe prostih radikalov, nastalih na drugih molekulah.

Poskusi, pri katerih so ločeno obsevali citoplazmo in celično jedro, potrjujejo domnevo, da je kritična tarča v celici DNA. Celično jedro, v katerem se nahaja DNA, naj bi bilo kar desetkrat bolj občutljivo na ionizirajoče sevanje kot citoplazma. Glede na to lahko razdelimo pomembnost tarč v celici, od katerih je najpomembnejša in najbolj občutljiva tarča DNA, sledi ji RNA, nato pa beljakovine, ogljikovi hidrati in maščobe, ki so najmanj občutljive (Serša, 2004).

4.2.2 Biološki učinki sevanja na celico

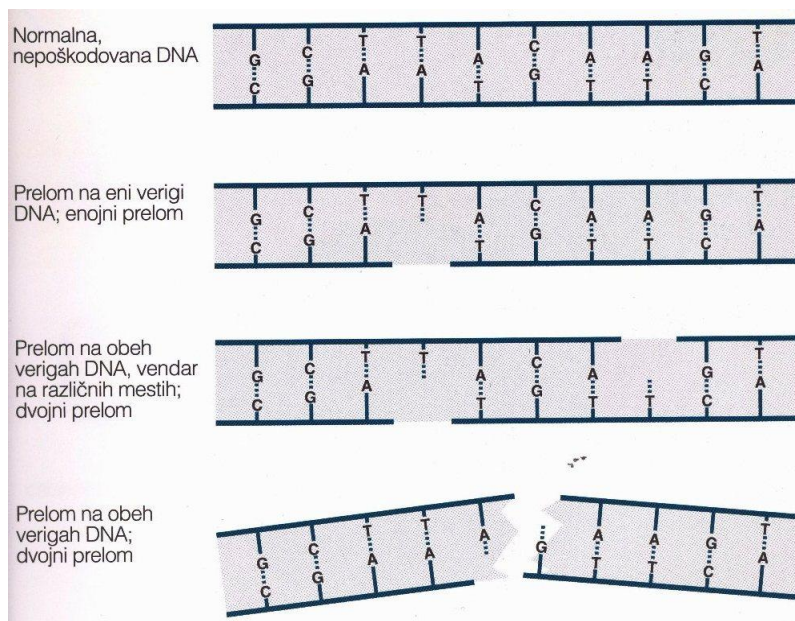
DNA je biološka makromolekula, sestavljena iz ponavljajočih se podenot, nukleotidov, ti pa so sestavljeni iz fosfatne skupine, baze in pentoze 2-deoksiriboze. V DNA so običajno štiri baze: adenin (A), gvanin (G), citozin (C) in timin (T) (slika 21).



Slika 21: Shema deoksiribonukleinske kisline - DNA (Serša, 2004)

Ionizirajoče sevanje lahko poškoduje DNA z direktnim in indirektnim delovanjem. Glede na to, ali je poškodovana ena ali obe verigi dvojne vijačnice DNA, govorimo o:

- enojnih prelomih verige DNA oz.
- dvojnih prelomih DNA.



Slika 22: Vrste poškodb DNA, ki jih povzroča ionizirajoče sevanje (Serša, 2004)

Na sliki 22 so prikazane vrste poškodb verig DNA. Najpomembnejši so prelomi obeh verig DNA, ki jih povzroči ionizirajoče sevanje. Dvojni prelomi, ki ostanejo nepopravljeni, se lahko odrazijo v smrti celice. To se zgodi v primeru, če je poškodba nastala na mestu, ki nosi zapis za funkcije, ki so pomembne za delovanje celice. Ko pa poškodbe nastanejo na nepomembnem delu DNA, se lahko odrazijo kot odlomljeni deli kromosomov celice. Pogostejši so enojni prelomi DNA in ker so tudi popravljalni mehanizmi pri teh prelomih bolj uspešni, so te poškodbe manj nevarne za celico. Celica ima veliko popravljalnih mehanizmov, ki izrežejo nastalo poškodbo in nadomestijo manjkajoče nukleotide. Za razliko od enojnih prelomov DNA so dvojni prelomi pomembnejši, saj lahko povzročijo kromosomske aberacije ali celično smrt. Aberacije, ki jih opazujemo v metafazi celične delitve kot posledico ionizirajočega sevanja, so lahko dveh vrst: kromosomske (nastajajo, kadar se je poškodba na DNA pojavila v interfazi, pred podvojitvijo DNA) in kromatidne (nastanejo po podvojitvi DNA).

Glede na vrsto in število poškodb na DNA celica lahko preživi ali umre. Razlikujemo različne načine umiranja celic po obsevanju, in sicer:

- *Apoptoza*: Je programirana smrt celice in se pojavlja predvsem v embrionalnem razvoju organizma, ko se tkiva preoblikujejo, pa tudi pri odraslih organizmih kot način umiranja celic v nekaterih normalnih tkivih in

tumorjih po obsevanju z ionizirajočim sevanjem in drugimi vrstami zdravljenj. Takojšnja apoptoza je značilna za timocite, splenocite, zarodne celice kostnega mozga, specifičnih celic v lasnih foliklih in kriptah tankega črevesa. Smrt teh celic se pojavlja pri akutnih patoloških spremembah normalnih tkiv po obsevanju. Pri krvnih in limfatičnih celicah pa je apoptoza prevladujoč način umiranja ne glede na dozo sevanja. Za celice, ki umirajo v apoptozi, sta značilni izguba kontakta s sosednjimi celicami in tvorba apoptotskih telesc, kjer se shranjujejo ostanki celice. Tak način umiranja je nadzorovan in energijsko varčen, saj omogoča uporabo preostalih snovi za potrebe drugih celic.

- *Nekroza*: Je nenadzorovan način umiranja celic, do katere pride, če je sevalna poškodba zelo velika. Pri nekrozi za razliko od apoptoze celica razpade neorganizirano in ne preda svojih preostalih elementov drugim celicam, pač pa le-te razgradijo makrofagi (celice z veliko sposobnostjo požiranja odmrlih celic).
- *Mitotska smrt*: Do katere pride, če celica takoj po obsevanju ne umre z apoptozo, ampak se lahko še nekajkrat deli in nato umre. Celice lahko umrejo že pri prvem poskusu delitve, ali pa se še nekajkrat delijo, a potem zaradi poškodb DNA, ki jih celica ni mogla uspešno popraviti, kljub vsemu umrejo.

Za že diferencirane celice, ki se ne delijo, npr. živčne ali mišične celice, pomeni celična smrt izgubo njihovih funkcij. Za celice, ki se delijo, npr. matične celice kostnega mozga, pa pomeni celična smrt izgubo reprodukcijske integritete (sposobnost nadaljnje delitve), kar imenujemo tudi reprodukcijska smrt celice. Vplive ionizirajočega sevanja lahko proučujemo *in vitro*. To pomeni, da umetno ustvarimo razmere, ki so potrebne za rast normalnih ali tumorskih celic. Pri tem uporabljamo test klonogenosti kot merilo za učinek sevanja na celice in primerjamo reprodukcijsko sposobnost obsevanih celic v primerjavi z neobsevanimi. Preživele klonogene celice, ki so ohranile reprodukcijsko integriteto, se namnožijo v klon ali kolonijo, njihovo število pa nam služi za ocenjevanje sposobnosti preživetja celic. Delež preživelih celic po določeni absorbirani dozi sevanja nam pove, kakšen je učinek sevanja na določeno vrsto celic oz. kako učinkovito je sevanje ubijalo celice v razmerah *in vitro* (Serša, 2004).

4.2.3 Biološki učinki sevanja na tkiva in organe

Organizem je sestavljen tudi iz tkiv, za katera je za ustrezno delovanje potrebno natančno uravnoteženo nadomeščanje nefunkcionalnih celic. Nekatera tkiva tvorijo zaključene enote, organe. Pri poškodbi se celice v mnogih tkivih nadomestijo iz zarodnih celic. Kakšne bodo posledice ionizirajočega sevanja pa je odvisno od radioobčutljivosti celic določenega tkiva in hitrosti delitve celic v tkivu. Nizke doze sevanja običajno ne prizadenejo funkcije tkiva, saj se pri tem poškoduje tako majhen delež celic, da to ne vpliva na delovanje organa. Prag, pri katerem se pojavijo spremembe v delovanju organa, in čas, ki je potreben, da se spremembe pojavijo, sta zelo različna za različna tkiva in organe, kar prikazuje tabela 6.

Stopnja poškodbe tkiva je odvisna od deleža prizadetih celic. Včasih se zgodi, da kljub temu, da popravljalnimi mehanizmi ni uspelo popraviti poškodb DNA, celica ne umre. Posledica tega je lahko sprememba v delovanju nekega gena, ki je zapisan na delu DNA, kjer je prišlo do poškodbe zaradi ionizirajočega sevanja. Temu pravimo, da je prišlo do mutacije. Le te se pojavijo z velikim, tudi večletnim časovnim zamikom. Glede na vrsto celic, na katerih mutacije nastanejo, lahko povzročijo nastanek rakavih celic, ali pa pride do dednih sprememb pri potomcih tistih, ki so bili obsevani. Pri maligni transformaciji celice se lahko katerakoli celica v organizmu spremeni v rakavo, mutacije, ki nastanejo v spolnih celicah, pa se prenašajo na potomce, ki podedujejo take gene in v tem primeru govorimo o genetsko podedovani bolezni.

Smrt celice kot posledica ionizirajočega sevanja običajno nastopi v fazi njene celične delitve. Zato spremembe prej opazimo v tkivih, kjer je celična delitev aktivnejša. Tako v tkivih, kot so npr. kostni mozeg in epitelij tankega črevesa, spremembe nastanejo že v nekaj urah, na koži in sluznicah v nekaj dnevih, v tkivih, kjer se celice redko delijo, kot so jetra in vezivno tkivo, pa spremembe nastanejo zelo pozno. Bolj radioobčutljiva so torej tista tkiva, ki imajo manj diferencirane celice, večjo obnovitveno sposobnost in se hitreje delijo (tabela 7).

Tabela 6: Učinki ionizirajočega sevanja glede na dozo (Agencija ARAO, 2009)

Doza	Učinek
50-200 mSv	Ni trenutnih učinkov, možni dolgoročni učinki, povečana verjetnost rakavih obolenj.
200-500 mSv	Ni očitnih simptomov, zmanjšanje števila rdečih krvnih celic.
500-1000 mSv	Glavobol, povečana občutljivost za infekcije zaradi oslabilve imunskih celic, možna začasna neplodnost moških.
1000-2000 mSv	Slabost in bruhanje, utrujenost, oslabiltev imunskega sistema in povečana verjetnost okužb, začasna neplodnost moških, spontan splav pri nosečnicah, 10 % smrtnost v 1 mesecu.
2000-3000 mSv	Slabost in bruhanje, utrujenost, hujšanje, zmanjšanje števila belih krvnih celic, možna trajna neplodnost žensk, 35 % smrtnost po 1 mesecu.
3000-4000 mSv	Slabost in bruhanje, utrujenost, zmanjšanje števila belih krvnih celic, možna trajna neplodnost žensk, krvavitve ustne sluznice, v ledvicah in podkožju, 50 % smrtnost po 1 mesecu.
4000-6000 mSv	Akutna sevalna bolezen: močna slabost in bruhanje, driska, utrujenost, izrazito zmanjšanje števila belih krvnih celic, običajno trajna neplodnost žensk, hujše krvavitve ustne sluznice, v ledvicah in podkožju, 60 % smrtnost v 1 mesecu, predvsem zaradi infekcij in notranjih krvavitev.
6000-10.000 mSv	Uničenje kostnega mozga, hude poškodbe sluznice prebavil, driska, močne notranje krvavitve, povišana telesna temperatura, hujšanje, skoraj 100 % smrtnost v 2 tednih.
10.000-50.000 mSv	Takojšnja huda utrujenost in slabost, uničenje kostnega mozga, celic sluznice prebavil, driska in krvavitve v prebavilih, izguba vode, delirij, koma zaradi motenj v krvnem obtoku, 100 % smrtnost v 1 tednu.
50.000-80.000 mSv	Koma nastopi najkasneje v nekaj minutah, smrt pa v nekaj urah zaradi neusklajenega delovanja živčevja.
> 80.000 mSv	Takojšnja smrt.

Tabela 7: Razvrstitev organov glede na radioobčutljivost (Serša, 2004)

Stopnja občutljivosti	Organ
visoka	limfoidno tkivo kostni mozeg spolne žleze
srednja	koža črevo ledvice
nizka	mišice možgani hrbtenjača

Posledice sevanja na tkiva in organe lahko razdelimo na:

- *Zgodnje ali akutne*: Pojavijo se v tistih tkivih oz. organih, v katerih se celice hitro obnavljajo in zato pogosto delijo. Odziv je v teh organih odvisen od doze prejetega sevanja, poškodbe pa se pojavijo v nekaj dneh oz. tednih. Zaradi hitre delitve celic se te posledice sevanja popravijo hitro in so pri zmernih dozah v celoti popravljive.
- *Kasne*: Pojavijo se šele po šestih mesecih, predvsem pri organih, kot so pljuča, ledvica, srce, jetra in centralni živčni sistem. Te posledice sevanja se popravijo le delno, nikoli v celoti, niti po daljšem času (Serša, 2004).

4.2.4 Deterministični in stohastični učinki sevanja

Deterministični učinki sevanja so odvisni od praga doze, kako resni bodo učinki pa je odvisno od prejete doze. Do njih zagotovo pride takrat, ko je telo obsevano nad določeno dozo. Ti učinki se pojavijo takoj ali v nekaj dneh po obsevanosti. Med deterministične učinke uvrščamo učinek na produkcijo spolnih celic, učinke sevanja na zarodek in plod, katarakto in poškodbe kože.

Stohastični učinki so tisti učinki, ki se lahko zgodijo, ni pa nujno. Odvisni so od naključja, ne pa od praga doze. Verjetnost za njihov nastanek je odvisna od prejete doze, resnost učinkov pa ni odvisna od prejete doze. Običajno se pojavijo šele po

daljšem času, lahko tudi po več letih, in takrat, ko telo že zdavnaj ni več izpostavljeno dodatnemu sevanju. Primera stohastičnega učinka sta sevalna kancerogeneza in mutacije.

Kancerogeneza:

Obstaja kar precej zgodovinskih podatkov, ki povezujejo ionizirajoče sevanje s pojavom raka. Ugotovljeno je, da je danes raka več tudi pri ljudeh, ki so bili poklicno izpostavljeni ionizirajočemu sevanju (npr. radiologi) in tistih, ki so bili temu sevanju izpostavljeni pri jedrskih nesrečah, ali pa so bili obsevani v času zdravljenja. Nastanek raka je počasen proces, ki se začne s spremembami na DNA. Te spremembe povzročijo, da se spremenijo proteini, ki jih ti deli DNA zapisujejo. Če so ti proteini povezani s procesi, ki vplivajo na rast ali diferenciacijo celic, lahko povzročijo nastanek raka. Za nastanek rakave celice je potrebnih več zaporednih dogodkov oz. mutacij DNA. Poleg kemičnih in bioloških dejavnikov je ionizirajoče sevanje samo eden od kancerogenih dejavnikov.

Čas, ki poteče od izpostavljenosti sevanju do nastanka raka, imenujemo latenca. Najkrajšo latenco ima nastanek levkemije oz. krvni rak. Npr. v Hirošimi in Nagasakiju se so se prvi primeri levkemije pojavili po nekaj letih, najpogosteje pa se je pojavila po petih do sedmih letih. Čvrsti tumorji imajo precej daljšo latenco, od deset do petdeset let. Ionizirajoče sevanje naj bi povzročalo predvsem akutne in kronične mieloične levkemije, raka na dojki, ščitnici, pljučnega, kostnega in kožnega raka in levkemijo pri otrocih, ki so bili že med nosečnostjo izpostavljeni sevanju.

Tveganje za nastanek raka je povezano tudi s starostjo, pri kateri so bili ljudje obsevani. Otroci in mladoletniki so veliko bolj občutljivi za sevalno kancerogenezo kot ljudje v srednjih ali poznih letih.

Dedni učinki sevanja:

Ionizirajoče sevanje vpliva tudi na produkcijo spolnih celic. Prag za prehodno sterilnost pri moškemu je pri enkratni obsevalni dozi 0,15 Gy, za stalno sterilnost pa obsevanje med 3,5 do 6 Gy. Sterilnost se pri moških nikoli ne pokaže takoj po obsevanju, ampak se poškodbe pokažejo po 64 dneh. To je čas, ki je potreben za nastanek novih spermijev in njihovo sproščanje v lumen tubulov testisov. Pri ženskih

zarodkih in mladih ženskah so najbolj radioobčutljivi jajčniki. Le ta je najmanjša med 20. in 30. letom, potem pa radioobčutljivost počasi spet narašča vse do menopavze. Prehodna sterilnost, ki jo povzroči obsevanje jajčnikov z 1,7 do 2,0 Gy, se običajno popravi v šestih mesecih. Stalna sterilnost se pojavi pri sevanju med 2,5 in 6 Gy. Prag za sterilnost je pri starejših ženskah nižji, se pa lahko nastale kromosomske poškodbe zaradi izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju prenesejo na potomce.

Izpostavljenost ljudi ionizirajočemu sevanju lahko povzroči zdravstvene posledice, ki se prenašajo na potomce zaradi mutacij v spolnih celicah. Veliko mutacij v zarodnih celicah ima zelo hude posledice in so največkrat smrtne za razvijajoči zarodek. Ionizirajoče sevanje sicer ne povzroča novih mutacij, povzroča pa večjo frekvenco mutacij, ki se pojavljajo spontano ali naravno. Tako lahko povzroča hemofilijo, Downov sindrom, Duchennovo mišično distrofijo, sladkorno bolezen. Verjetnost za nastanek mutacij je pri tem odvisen od prejete doze ionizirajočega sevanja.

Učinki sevanja na zarodek in plod:

Sevanje lahko pri novorojenčkih povzroči zaostalost v razvoju. Otroci mater, ki so imele med nosečnostjo obsevan trebuh, pa imajo manjšo lobanjo. Sevanje lahko povzroči tudi smrt zarodka, deformiranosti ali zaostanke rasti organov. Resnost učinkov je odvisna od prejete doze sevanja in od stopnje razvoja plodu. Smrt zarodka nastopi že zelo zgodaj, v prvih desetih dnevih, še preden se ugnezdi v maternico ali med ugnezdenjem. Ker plod nastaja iz prvih delečih se celic, je to najobčutljivejša faza plodu, vsaka poškodba pa ima zato nepopravljive posledice. Deformiranost oz. spremembe v rasti organov pa se pojavijo, če je zarodek obsevan v času organogeneze (6 do 42 dni) oz. v času rasti organov, to je po sedmem tednu. Obsevanje plodu v času nastajanja organov lahko povzroči tudi smrt otroka po porodu. Pri otrocih, ki so bili v času nosečnosti obsevani od 8. do 15. tedna nosečnosti, sta bili najpogostejši okvari zmanjšana velikost glave in mentalna zaostalost.

Za nosečnice, ki delajo z viri ionizirajočega sevanja, je predpisana dodatna dozna omejitev na trebuh za čas trajanja nosečnosti (1 mSv).

Sevalna katarakta:

Katarakta je sprememba v normalni prosojnosti očesne leče. Nastane zato, ker v očesni leči ni mehanizmov za odstranjevanje poškodovanih celic. Poškodovane celice tako potujejo proti zadnjemu delu očesne leče, kjer se katarakta začne. Le ta lahko povzroči le manjše spremembe, ali pa popolno motenost, ki povzroči slepoto. Do teh sprememb lahko pride zaradi starosti, poškodb ali vnetja očesa, lahko pa jo povzroči ionizirajoče sevanje. Minimalna enkratna doza sevanja, ki povzroči katarakto, je 2 Gy. Doze, pod katero ionizirajoče sevanje ne povzroča katarakte, pravzaprav ni, kljub temu pa obstaja za očesno lečo posebna omejitev 150 mSv ekvivalentne doze na leto. Stopnja katarakte je odvisna od doze prejetega sevanja.

Poškodbe kože:

Kožo uvrščamo med relativno radioobčutljive organe. Ionizirajoče sevanje povzroči različne stopnje poškodb. Večja kot je doza, večje so poškodbe. Omejitev ekvivalentne doze je 500 mSv na leto, ki se nanaša na povprečno površino kože 1 cm². Poškodbe lahko uvrščamo med deterministične učinke sevanja z zgodnjimi in kasnimi posledicami. Lahko jih razvrstimo po stopnjah:

- *Zgodnji eritem ali rdečina kože:* pojavi se že po nekaj dneh zaradi razširitve kapilar, ki jih povzroči sproščanje histamina.
- *Suha deskvamacija:* zaradi zmanjšane izločanja žlez v koži in poškodb žilja v koži se po nekaj tednih začne luščenje zgornjih plasti kože.
- *Kasni eritem:* zaradi poškodb žilja v koži in zmanjšane pretoka krvi se na koži pojavita rdečina in zatekanje.
- *Vlažna deskvamacija:* zaradi hudih poškodb žilja in veznega tkiva kože se pojavijo izpadanje dlak ali las, oteklina in infiltracija makrofagov.
- *Nekroza:* pri zelo visokih dozah je poškodovana koža in podkožno maščevje, pojavijo se infekcije in rane.
- *Kasne posledice:* po več kot enem letu se z znaki atrofije kože, fibroze, hiperpigmentacije in splošne izsušenosti kože pojavi dermatitis ali vnetje kože (Serša, 2004).

4.2.5 Sevanje v okolju in na delovnem mestu

Naš organizem je izpostavljen ionizirajočemu sevanju, ki izvira iz vesolja, zraka in zemlje. Sevanje je v naravnem okolju vedno prisotno, je pa odvisno od geografske lege. Tako ljudje, ki živijo v predelih, kjer je več radioaktivnih izotopov v zemlji, prejmejo več sevanja iz zemlje, tisti pa, ki živijo v krajih z veliko nadmorsko višino, prejmejo več kozmičnega sevanja. Velik del naše izpostavljenosti sevanju je posledica plina radona, ki izhaja iz zemeljske skorje in je prisoten v zraku, ki ga vdihavamo. Nekaj ionizirajočega sevanja pa je posledica človekove uporabe sevanja, predvsem slikovna diagnostika in interventna radiologija.

Popolnoma se ionizirajočemu sevanju ni mogoče izogniti, lahko pa se izognemo nepotrebni izpostavljenosti sevanju. Pri tem je potrebno upoštevati načelo ALARA. Z napravami, ki zaznavajo nizke doze naravnega in umetnega ionizirajočega sevanja, lahko sevanje tudi zaznamo (Serša, 2004).

5 RADIOTERAPIJA

5.1 Zgodovina

Nuklearna medicina se je začela razvijati okoli leta 1950. Do takrat so uporabljali predvsem visoko energijske pospeševalnike, npr. betatron, ki ga je leta 1940 razvil Donald Kerst za pospeševanje elektronov. Betatron je dobil ime po delcih beta, hitrih oz. pospešenih elektronih. Le ta se je uporabljal kot vir žarkov X in žarkov gama v industriji in medicini.

Okoli leta 1950 so začeli klinično testirati prve kobaltske naprave za obsevanje (kobalt-60) in naredili dve obsevalni napravi. Prva je bila pritrjena na dve roki, ki sta bili horizontalno pritrjeni na stojalo, in se je lahko premikala gor in dol. Naprava se je prižigala in ugašala z zračnim kompresorjem, ki je potisnil živo srebro v ali iz rezervoarja. Druga, Saskotoonova naprava, pa se je lahko premikala v več smereh in tako omogočala boljši in lažji način obsevanja. Ta se je uporabljala do leta 1972.

5.2 Teleterapija

Je najbolj pogost način radioterapije. Strojan navaja, da je radioterapija medicinska stroka, ki se ukvarja z zdravljenjem malignih in nemalignih bolezni z ionizirajočim sevanjem (Strojan, 2007). Zdravljenje se lahko izvaja samostojno, ali v kombinaciji z drugimi načini zdravljenja (kirurgijo, sistemskim zdravljenjem). Cilj zdravljenja z obsevanjem je aplicirati natančno določen odmerek sevanja na predhodno določen tarčni volumen tkiva ob čim manjši okvari tkiv v neposredni okolici tarče.

Izvor sevanja je pri teleterapiji izven telesa in je usmerjen točno na predel, kjer se nahaja tumor. Z obsevanjem uničujemo rakaste celice in poskušamo ohraniti čim več zdravega tkiva v okolici. Tak način zdravljenja se uporablja predvsem takrat, ko operativni poseg ni možen ali priporočen in v kombinaciji s kemoterapijo. Teleterapijo uporabljamo za zdravljenje različnih vrst rakavih obolenj. Rakasto tkivo obsevamo z žarki gama, rentgenskimi žarki ali elektroni, ki so natančno usmerjeni k rakastemu tkivu. Obsevamo jih večkrat z različnih strani tako, da je rakasto tkivo obsevano večkrat, tkivo v okolici pa samo enkrat. Doza, s katero je rakasto tkivo obsevano, je tako velika, da ga uniči.

Za teleterapijo so včasih uporabljali predvsem kobalt Co^{60} aktivnosti od 100 TBq do 500 TBq, ki seva žarke gama visokih energij. Uporabljali so tudi cezij Cs^{137} aktivnosti od 50 TBq do 100 TBq. Danes so namesto radioizotopov vedno bolj v uporabi linearni pospeševalniki (LINAC), ki proizvajajo rentgenske žarke visokih energij (od 4 MeV do 40 MeV). Vedno bolj so v uporabi rentgeni napetosti od 20 kV do 250 kV.

Viri sevanj, ki se uporabljajo pri teleterapiji, so izjemno nevarni. Obsevanje pacientov zato poteka v posebej zaščitenih prostorih z daljinskim upravljanjem, pri čemer je operater izven prostora, v katerem poteka obsevanje. Ko je izvor izven zaščitenega dela ohišja v položaju za obsevanje, morajo biti vključeni avtomatski alarmi in varnostna stikala.

Primer teleterapije bolnika z rakom oz. tumorjem: Pri tem teleterapija poteka stopenjsko. Najprej moramo določiti volumen (target volume) znotraj telesa. Ciljni volumen je področje tumorja. Nato skrbno preučimo zdrava tkiva v njegovi okolici, ki bodo zajeta v zdravljeni volumen (treatment volume). Pozorni moramo biti na kritične organe in upoštevati tudi celotni obsevalni volumen (irradiated volume).

Potek:

- Določimo ciljni volumen.
- Planiramo obsevanje. To pomeni, da izberemo ustrezno energijo in kvaliteto ionizirajočih žarkov in jih po najprimernejši poti usmerimo v področje tumorja.
- Preverimo načrtovani način obsevanja na posebnem rentgenskem aparatu - simulatorju.
- Da bi zagotovili ponovljivost obsevanja, na telo narišemo ustrezne točke, kjer žarki vstopijo v telo.
- Obsevamo z optimalno dnevno frakcijo in skupno dozo sevanja, ki omogoča najvišji odstotek ozdravitev in najmanjši odstotek komplikacij.
- Med obsevanjem ves čas kontroliramo bolnika in uravnavamo višino doze.
- Po končanem obsevanju redno pregledujemo bolnika, saj tako najhitreje ugotovimo morebiten neuspeh terapije (Vrhovec in Zule, 2008).

5.3 Kdaj obsevamo?

Zdravnik napoti bolnika na obsevanje takrat, ko tumorja ne more odstraniti v celoti oz. takrat, ko je pri patohistološkem pregledu med operacijo odstranjenega tkiva ugotovljena prisotnost t.i. negodnih napovednih dejavnikov, ki povečujejo verjetnost, da se bolezen ponovi. V obeh navedenih primerih radioterapija dopolnjuje operativno zdravljenje. Lahko pa se radioterapija uporablja tudi samostojno oz. v kombinaciji s kemoterapijo, brez predhodne operacije. To je predvsem takrat, ko je pri bolnikih bolezen že močno napredovala in operacija ni več tehnično izvedljiva ali smiselna ali takrat, ko bolnik zaradi spremljajočih obolenj ni primeren za operativni poseg v splošni anesteziji ali ga iz različnih razlogov zavrne (Strojan, 2009).

5.4 Obsevalne naprave teleterapije

Izbor obsevalne naprave, na kateri bomo bolnika obsevali, je odvisen od lege zasevka in njegove velikosti. Večino kostnih in možganskih zasevkov tako obsevamo z enostavnejšo napravo telekobalt, tumorje na koži s terapevtsko rentgensko napravo, ki tvori manj prodorne žarke, področje vratu, dimelj, pazduh, trebuha in prsnega koša pa z visokozmogljivim in visokoenergijskim linearnim pospeševalnikom. Povsod tam, kjer ni pričakovati razvoja otekline (področje glave in vratu, kožni zasevki), obsevamo z večjimi dnevnimi odmerki doze, kot jih sicer uporabljamo pri obsevanju drugih vrst raka. V drugih primerih (pazduhe, dimlje) je dnevni odmerek doze nižji, vendar še vedno višji, kot običajno (Strojan, 2009).

Onkološki inštitut Ljubljana je edina ustanova v Sloveniji, kjer se izvaja zdravljenje z ionizirajočim sevanjem. Leta 2004 je bilo na Oddelku za radioterapijo v enoti Teleterapija z obsevanjem zdravljenih 3253 bolnikov, pri katerih je bilo izvedenih 5186 obsevalnih ciklov (en obsevalni cikel vključuje od enega do sedemdeset obsevalnih odmerkov) (Vrhovec in Zule, 2008).

Po priporočilu Svetovne zdravstvene organizacije je potrebno število obsevalnih naprav v neki državi določeno s številčnostjo populacije in naj bi znašalo, odvisno od razvitosti radioterapevtske dejavnosti v državi oz. od kompleksnosti uporabljenih obsevalnih tehnik, med šest in sedem megavoltnih obsevalnikov na milijon prebivalcev (Pivec in Crnjac, 2009).

5.4.1 Telekobalt

Ker je to pretežno mehanska naprava, je razmeroma poceni, njeno vzdrževanje pa je preprosto. V glavi obsevalnika se nahaja radioaktivni izotop kobalta (Co^{60}), ki kontinuirano seva fotone (žarki γ). Pri radioaktivnem razpadu Co^{60} se sprostita dva fotona z energijama 1,17 MeV in 1,33 MeV (povprečna energija 1,25 MeV), ki ju izkoriščamo za obsevalno zdravljenje.

Pomanjkljivosti telekobaltne naprave so naslednje:

- Ni primerna za obsevanje tumorjev, ki ležijo globoko v telesu (npr. v prsnem košu, trebuhu, medenici), ker je energija fotonskega žarkovnega snopa sorazmerno nizka (srednja energija 1,25 MeV).
- Povzroča okvare kože in podkožnih struktur, kar je posledica tega, da se točka najvišje doze v tkivu nahaja 0,5 cm pod površino obsevalnega predela.
- Stalna prisotnost radioaktivnega izotopa Co^{60} na oddelku, kar s stališča varstva pred ionizirajočim sevanjem predstavlja potencialno nevarnost. Radioaktivni izvir namreč seva tudi takrat, ko ni v aktivnem položaju oz. ko ne obsevamo bolnikov.
- Ne omogočajo povezave s sistemi za načrtovanje obsevanja in s sistemi za preverjanje lege obsevalnih polj, ker niso opremljene z računalniškimi sistemi, ki bi to omogočali.
- Izvir je potrebno zamenjati vsakih štiri do pet let, kar pri vzdrževanju telekobaltnih naprav predstavlja pomemben strošek. Vzrok temu je stalno razpadanje radioaktivnega izotopa Co^{60} , kar zmanjšuje njegovo aktivnost in podaljšuje obsevalni čas (Vrhovec in Zule, 2008).

5.4.2 Linearni pospeševalnik

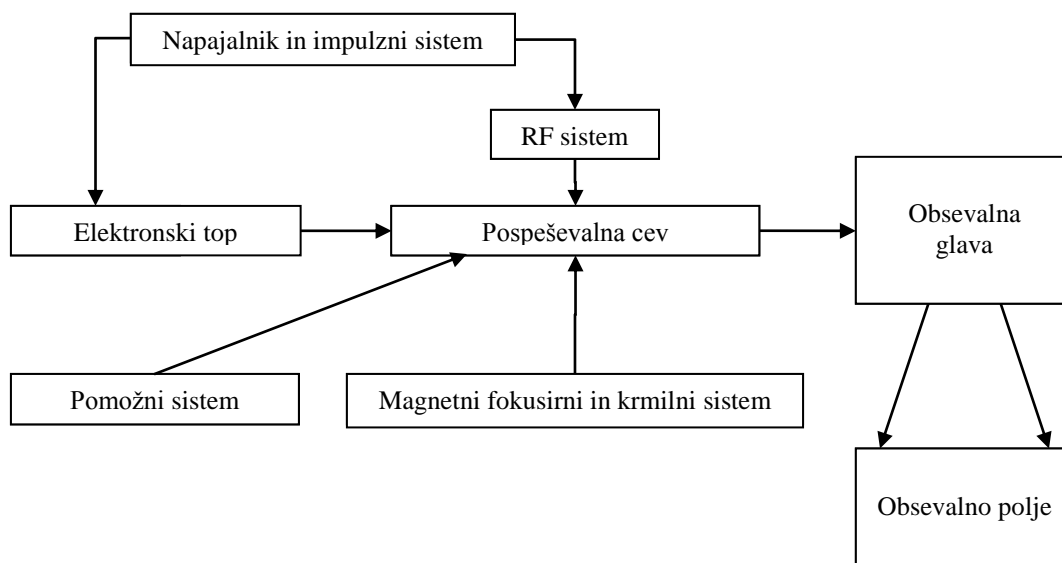
Je megavoltna obsevalna naprava (slika 23), katere temeljne prednosti pred telekobaltom so, da lahko tvori dve vrsti žarkovnih snopov različnih energij, elektronskega in fotonskega. Je tudi bolj natančen in varen. Izvir žarkovnega snopa je t.i. elektronski top, ki se nahaja v pospeševalni cevi, in ne več radioaktivni izotop. Ob segrevanju volframove nitke iz nje izparevajo elektroni, ki jih elektromagnetno

polje v cevi pospeši do zelo visokih energij. Visokoenergijski elektronski curek je na izhodu iz pospeševalne cevi oblikovan v ozek snop, ki je usmerjen na tarčo ali pa na sipalno folijo, ki ozek elektronski curek razprši v primerno širok snop. Enostavno shemo linearnega pospeševalnika vidimo na sliki 24.



Slika 23: Linearni pospeševalnik Varian Clinac 2100 C/D (Interno gradivo OI, 2009)

Fotonski in elektronski žarkovni snop se po svojih radiofizikalnih lastnostih močno razlikujeta. Temeljna razlika je v načinu predajanja energije vpadlega fotona oz. elektrona atomom tkiva, ki ga obsevamo. Kadar se tarča nahaja v globini telesa, uporabimo fotonski snop žarkov, saj njihova doza v obsevanem tkivu pada približno eksponentno z globino v tkivu. Ko pa se tarča nahaja na površini telesa ali tik pod kožo, takrat uporabimo elektronski snop žarkov. Doza le-teh namreč hitro in strmo pade do zanemarljive vrednosti (na manj kot 5 odstotkov izhodiščne vrednosti).



Slika 24: Shema linearnega pospeševalnika (Interno gradivo OI, 2009)

Prednosti linearnega pospeševalnika so:

- Ena sama naprava lahko tvori fotonski in elektronski žarkovni snop različnih energij, ki imata različne radiofizikalne značilnosti.
- Visokoenergijski žarkovni snopi omogočajo obsevanje tumorjev globlje v telesu.
- Doza na površini telesa nad tumorjem je nižja, ker je točka najvišje doze pomaknjena v globino obsevalnega tkiva, zato so okvare tkiv v tem predelu manjše.
- Nevarnost izpostavljenosti sevanju je omejena le na čas obratovanja naprave.
- So v celoti računalniško krmiljeni, kar omogoča računalniški nadzor izvedbe (Vrhovec in Zule, 2008).

5.4.3 Terapevtska rentgenska naprava

Ti obsevalniki so namenjeni obsevanju s fotoni nizkih energij v območju nekaj 10 do nekaj 100 keV. V osnovi je ta naprava podobna diagnostični rentgenski napravi z rentgensko cevjo kot ključnim sestavnim delom. V njej iz žareče katode izparevajo elektroni, ki jih napetost med elektrodama pospešuje proti tarči - anodi. Iz nje ob trku izhajajo fotoni (žarki X), ki jih uporabljamo v terapevtske namene.

Točka najvišje doze se nahaja na sami površini kože. Ker je njihova prodornost omejena, so kilovoltni žarki primerni le za obsevanje tumorjev na površini kože z omejenim prodorom v globino (od nekaj mm do nekaj cm, odvisno od energije). Prednost teh obsevalnikov je predvsem to, da so poceni, poceni je tudi njihovo vzdrževanje, izvedba obsevanja pa je preprosta.

Na Onkološkem inštitutu v Ljubljani že 15 let uporabljajo napravo Pantak-Terapax, na kateri obsevajo večino primarnih nemelanomskih kožnih tumorjev, zasevkov v koži in podkožju, pa tudi zasevke v rebrih ali povrhnje ležečih kosteh oz. nekatere benigne lezije in obolenja, npr. keloidi artritisa. Energijski spekter fotonskega snopa seže od 40 keV do 150 keV. Zaradi dotrajanosti naj bi to napravo v prihodnosti nadomestila sodobna in zmogljivejša, ki bo z energijami fotonskega snopa do 300 keV omogočala tudi obsevanje nekoliko debelejših površinskih tumorjev (Vrhovec in Zule, 2008).

5.5 Brahiterapija

To je terapija, ki se uporablja za zdravljenje širokega spektra rakastih obolenj. Obsevanje tkiva je lokalno, saj vir vstavijo neposredno v rakasto tvorbo. Obstajajo trije načini brahiterapije:

- *Intersticijska brahiterapija:* vir sevanja vstavijo v vodilo in ga kirurg operativno vstavi v tumor.
- *Intrakavitarna brahiterapija:* vir vstavijo v votel organ.
- *Površinska brahiterapija:* vir namestijo na površino telesa.

Za brahiterapijo se uporabljajo zelo različni viri sevanj, predvsem sevalci beta in sevalci beta - gama. V preteklosti so uporabljali predvsem radij (Ra^{226}), danes pa so ga nadomestile igle, ki vsebujejo cezij (Cs^{137}) aktivnosti 20 GBq, iridij (Ir^{192}) aktivnosti do 0,4 TBq, kobalt (Co^{60}) aktivnosti do 0,7 TBq in za površinsko terapijo stroncij (Sr^{90}) aktivnosti 1,5 GBq. Za trajno implantacijo uporabljajo zlato (Au^{198}).

Brahiterapija je visoko tvegana dejavnost. Če pride do kakršnega koli odstopanja, obstaja velika verjetnost prekomerne izpostavljenosti operaterjev (Koželj in drugi, 2006).

6 ZAŠČITA PRED SEVANJEM

Če hočemo doseči varno delo z viri ionizirajočih sevanj ali v okolju, kjer so prisotni viri sevanj, moramo poleg namena uporabe poznati lastnosti virov sevanj in načine obsevanj, ki jih ti viri povzročajo. Šele na osnovi tako zbranih podatkov se izdelava strokovna ocena, ki pokaže katere ukrepe varstva pred sevanji je pri določenih sevalnih dejavnosti in uporabi vira sevanja treba upoštevati in izvajati. V okviru zaščite pred sevanjem ločimo dva možna načina izpostavljenosti, in sicer *zunanjo* in *notranjo* obsevanost. Kadar je vir sevanja zunaj človeškega telesa govorimo o zunanji obsevanosti. Obsevano je lahko celo telo, ali pa le posamezen del telesa. Notranja obsevanost je posledica vnosa vira sevanja v organizem, ko sevanje neposredno zadeva občutljive celice posameznih kritičnih organov. Temu pravimo tudi interna kontaminacija. Zelo nevarna je kontaminacija s sevalci alfa in z nekaterimi sevalci beta. Načini, da pride do interne kontaminacije, so lahko: zaužitje kontaminirane hrane, vdihavanje kontaminiranega zraka in vnos radioaktivne snovi skozi kožo ali odprte rane (Koželj in drugi, 2006).

Pred zunanjim sevanjem se lahko zaščitimo na podlagi treh tehničnih parametrov varstva pred sevanji, in sicer:

- *Časovna omejitev*: pri tem omejimo čas izpostavitve sevanju. To je mogoče predvsem takrat, ko gre za izpostavljenost sevanju zaradi človekove uporabe. Dvakrat, trikrat hitreje opravljeno delo pomeni dvakrat, trikrat manjšo prejeto dozo.
- *Razdalja*: razdalja od vira sevanja je zelo pomembna, saj dlje kot smo od vira sevanja, manjšo dozo prejmemo. Dvakrat večja razdalja pomeni štirikrat manjšo prejeto dozo.
- *Ščit*: za zaščito pred prodornimi žarki γ se uporabljajo trdne snovi, svinec in beton, za zaščito pred nevtroni voda, za zaščito pred žarki β pa plast akrilnega stekla s kombinacijo svinca. Prav zato je radioaktiven material pogosto shranjen pod vodo, ali pa v posebnih zaščitnih prostorih (Serša, 2004).

6.1 Zaščita pred sevanjem nekoč

Ljudje se včasih niso zavedali, da je ionizirajoče sevanje lahko nevarno, zato so z viri ravnali brez kakršnihkoli varnostnih ukrepov. Do sredine 20. stoletja je bil glavni cilj varstva pred sevanji preprečiti takojšnje posledice obsevanosti, kot npr. vnetja in opekline na koži. Tako so preprečevali samo deterministične učinke, medtem ko stohastičnim učinkom, kot so rak in mutacije, zaradi nepoznavanja niso posvečali dovolj pozornosti. Omejitve za izpostavljenost delavce so bile opredeljene z deležem izpostavljenosti, ki povzroči vnetje kože.

Leta 1925 je ameriški fizik Arthur Mutscheller na podlagi podatkov o zdravstvenem stanju rentgenologov predlagal mesečno omejitev na ravni enega odstotka izpostavljenosti, ki povzroči vnetje kože. To izpostavljenost lahko približno ocenimo kot letno efektivno dozo 700 mSv. Po letu 1945 se je z razvojem jedrske industrije varstvo pred sevanji razširilo tudi na delovna področja izven zdravstva. Leta 1950 je bila ustanovljena Mednarodna komisija za varstvo pred sevanji (ICRP - International Committee for Radiation Protection). Ta je leta 1958 za poklicno izpostavljenost priporočila mejno vrednost letne doze 50 mSv, za izpostavljenost prebivalstva pa 1 mSv. Leta 1991 je bila vrednost za poklicno izpostavljenost znižana na 20 mSv, vrednost za prebivalstvo pa je ostala nespremenjena (Agencija ARAO, 2009).

6.2 Zaščita pred sevanjem danes

Glavni cilj sodobnega varstva pred sevanji je zagotoviti, da je izpostavljenih čim manj ljudi in da so njihove doze čim nižje. Posebna pozornost je namenjena tudi izpostavljenosti pacientov v diagnostične in terapevtske namene, kjer se spoštuje načelo, da naj bo doza tako nizka, kot jo je mogoče doseči ob doseganju ciljev in namena posega.

Temelj varstva pred sevanji danes predstavljajo Mednarodni temeljni varnostni standardi za varstvo pred ionizirajočimi sevanji in za varnost virov sevanja (International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources), ki jih pripravlja in dopolnjuje Mednarodna agencija za atomsko energijo (IAEA - International Agency for Atomic Energy) na Dunaju. V Evropski skupnosti urejajo varstvo pred sevanji predpisi s skupnim

imenom EURATOM. Oboji sledijo priporočilom komisije. V Sloveniji ureja področje varstva pred sevanji Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Ur. l. RS št. 102/2004), ki v slovenski pravni red prenaša vsebine evropskih direktiv o osnovnih standardih varstva pred sevanji, varstva preiskovancev v zdravstvu ter priporočila Mednarodne agencije za atomsko energijo. Sistem varstva pred sevanji je zasnovan večplastno:

- Za izvajanje sevalne dejavnosti ali uporabo radioaktivnega vira je najprej potrebno pridobiti dovoljenje, ki temelji na Oceni varstva izpostavljenih delavcev. Ta dokument izdela pooblaščen izvedenec varstva pred sevanji in vsebuje tudi priporočila za izboljšanje varstva pred sevanji.
- Imetniki virov sevanja morajo zagotoviti red in neodvisen strokovni nadzor nad njimi. V večini primerov mora neodvisni pooblaščen izvedenec varstva pred sevanji najmanj enkrat letno pregledati vsak vir sevanja.
- Izpostavljeni delavci morajo biti pod rednim zdravniškim nadzorom, vključeni morajo biti v sistem osebne dozimetrije in v redno izobraževanje. Če se predvideva, da letna izpostavljenost delavca lahko preseže 6 mSv, mora delavec opraviti zdravniški pregled vsako leto, če je predvidena letna izpostavljenost nižja, pa na vsake tri leta. Z osebno dozimetrijo se meri doze, ki jim je delavec izpostavljen v določenem času. Delavec mora dozimeter nositi ves čas, ko se nahaja v bližini vira sevanja ali pa z njim dela. Vsi, ki pri svojem delu uporabljajo vire sevanja, se morajo udeleževati rednega izobraževanja, ki ne zagotavlja le boljše usposobljenosti za ravnanje z virom, temveč tudi večjo osveščenost za upoštevanje načel varstva pred sevanji (Agencija ARAO, 2009).

Osnovna priporočila ICRP :

- Uporaba sevanja ni sprejemljiva, če ne pričakujemo neposredne koristi, oziroma, če korist ni večja od škode.
- V primeru, ko se ne moremo izogniti uporabi ionizirajočih žarkov, so zaščitni ukrepi usmerjeni na zmanjševanje obsevalnih doz. V tem primeru je osnovno pravilo opraviti zahtevano preiskavo s čim manjšo dozo.

- Med zaščitne ukrepe v najširšem pomenu sodi dobro organizirana in sistematična izobrazba vsega zdravstvenega in drugega osebja, ki bodisi neposredno dela bodisi odloča o delu z ionizirajočimi žarki.
- Efektivne ekvivalentne doze obsevanih posameznikov ne smejo presegati mejnih doz, ki jih priporoča ICRP (Zaščita, 2009).

Sestavni deli varstva pred sevanjem so vzgoja, izobraževanje, tehnični varnostni sistemi, administrativni ukrepi in načrtovanje ukrepov za primer sile. Zelo pomemben je tudi nadzor nad obratovanjem naprav, nad transportom, uvozom blaga, hrane (za kar skrbi država) ter raziskave in neodvisne varnostne analize domačih strokovnjakov (v pooblaščenih organizacijah). V ta namen je bila pri nas ustanovljena Uprava RS za jedrsko varnost (Sušnik, 2009).

6.3 Zaščita med rentgenskimi preiskavami

Med rentgensko preiskavo uporabljamo zaščitna sredstva različnih oblik, katero bomo uporabili, pa je odvisno od lege organa, ki ga pregledujemo. S kratkim predpasnikom, ki je iz umetnega pralnega materiala, v notranjosti pa ima svinčeno gumo, ščitimo spolne organe. Pri preiskavah z večjo žarkovno obremenitvijo pa, če preiskava to dopušča, ščitimo telo s svinčenim plaščem. Pri nekaterih preiskavah trebuha in medenice uporaba zaščitnih sredstev ni možna.

Pri ženskah je najpomembnejše preprečevanje obsevanja ploda v prvih tednih nosečnosti. Zato rentgenske preiskave pri ženskah v plodnem obdobju izvajajo v prvih desetih dneh menstrualnega ciklusa, med nosečnostjo pa le izjemoma. To je takrat, če je življenje nosečnice ogroženo in če z nobeno drugo preiskovalno metodo ne morejo razjasniti diagnostičnega problema. Za vse večjo varnost žene in otroka je pomembna vse pogostejša uporaba ultrazvoka, v zadnjem času pa tudi magnetne resonance (MR) (Zaščita, 2009).

Zaposleni v radiologiji pri svojem delu uporabljajo zaščitna sredstva, kot so svinčeni plašči oz. predpasniki, zaščitna očala s svinčenim steklom in svinčene rokavice. Poleg tega pa s skrajšanim delovnim časom, podaljšanim letnim dopustom in vsakoletnimi preventivnimi zdravniškimi pregledi zaposlene še dodatno ščitijo pred škodljivimi vplivi pri delu, ki ga opravljajo (Koželj in drugi, 2006).

6.4 Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list R. Slovenije št. 67 / 26.07.2002)

Ta zakon ureja varstvo pred ionizirajočimi sevanji z namenom, da se zmanjša škoda za zdravje ljudi in radioaktivna kontaminacija življenjskega okolja zaradi ionizirajočih sevanj. Določa tudi organizacijo pristojnih upravnih organov in Ministrstva za zdravje ter Ministrstva za okolje, prostor in energijo (Zaščita, 2009).

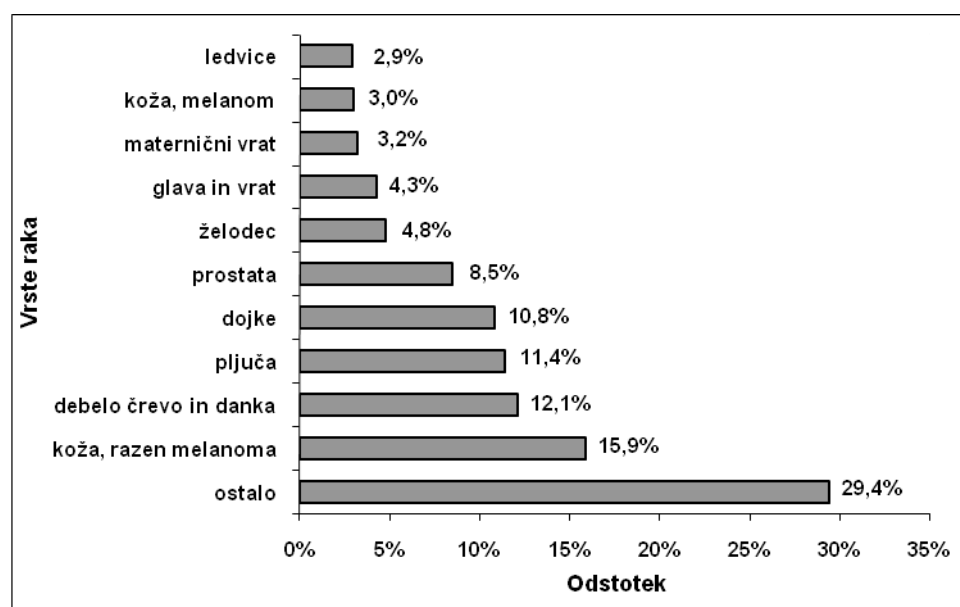
Nekaj pomembnih členov iz Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti - 50. člen (pogoji za izvedbo radiološkega posega):

- Posamezni radiološki poseg se lahko izvede samo, če ga predpiše napotni zdravnik, odobri pa zdravnik, odgovoren za radiološki poseg, ki nosi klinično odgovornost za radiološki poseg.
- Radiološki poseg za pravno - medicinske namene se lahko izvede, če zdravnik, odgovoren za radiološki poseg presodi, da bi poseg lahko koristil preiskovani osebi in oseba vanj privoli.
- Zdravnik, odgovoren za radiološki poseg, ob upoštevanju namena in cilja posega, v sodelovanju z radiološkim inženirjem določi takšne pogoje posega, da se ta opravi z najmanj škode za pacienta.
- Radiološki inženir oziroma izvajalec radiološkega posega izvede radiološki poseg skladno s pogoji dobre radiološke prakse.
- Pri radioloških posegih je treba zagotoviti, da:
 - je pričakovana korist zaradi posega upravičena v primerjavi s tveganjem ali škodo za zdravje ljudi,
 - je izpostavljenost pacienta pri diagnostičnih posegih optimizirana tako, da je prejeta doza tako nizka, kot je to razumno dosegljivo ob upoštevanju pričakovanih ciljev posega,
 - je prejeta doza v radioterapiji načrtovana za vsakega pacienta posebej in to tako, da je izpostavljenost izven kliničnih volumnov tako nizka, kot je to razumno dosegljivo in izvedljivo v skladu z namenom terapije,

- pri diagnostičnem posegu v povprečju niso preseženi odobreni diagnostični referenčni pogoji.
- Ministrstvo, pristojno za zdravje, zagotavlja uveljavljanje diagnostičnih referenčnih nivojev za vse standardne diagnostične radiološke posege s sistematičnim pregledovanjem značilnih doz pacientov pri teh posegih.
- Diagnostične referenčne nivoje določi minister, pristojen za zdravje, na podlagi rezultatov sistematičnega pregledovanja iz prejšnjega odstavka, ob upoštevanju mnenja strokovnega sveta za vprašanja varstva posameznikov pred ionizirajočimi sevanji, radioloških pogojev in uporabe virov sevanja v zdravstvu in veterinarstvu.
- Minister, pristojen za zdravje, podrobneje določi: pogoje glede izvajanja sistematične zgodnje diagnostike, bio-medicinskih in medicinskih raziskav, pravno-medicinskih posegov, posebnih radioloških posegov za otroke ter nosečnice in doječe ženske ter prostovoljne pomoči pri negi in oskrbi pacientov; vsebine obveznega izobraževanja in usposabljanja izvajalcev radiološkega posega; merila sprejemljivosti opreme za izvajanje radioloških posegov; posebne postopke za radiologijo, diagnostično in interventno radiologijo ter nuklearno medicino; programe zagotavljanja kakovosti in oblike strokovnega nadzora (Zaščita, 2009).

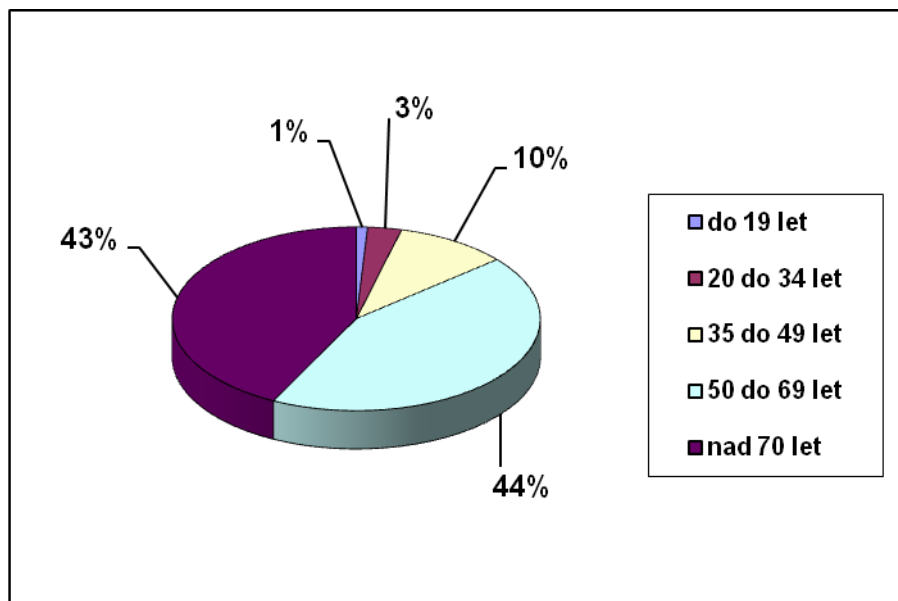
7 RAK V SLOVENIJI

Slovenija sodi med države s srednje visoko stopnjo obolevnosti in umrljivosti za rakom. Po številu umrlih za to boleznijo je na drugem mestu, takoj za boleznimi srca in ožilja. V letu 2007 je zaradi rakavih obolenj v Sloveniji umrlo 5.624 ljudi (3.194 moških in 2.430 žensk). V obdobju od leta 1996 do 2005 se je obolevnost za rakom v Sloveniji povečala med moškimi za 40 %, med ženskami pa za 35 %, umrljivost pa za 11 % pri moških in za 14 % pri ženskah. Pri moških je bil v letu 2005 najpogostejši rak prostate, to je 15,7 % vseh rakov, ugotovljenih pri moških. Pred tem je bil na prvem mestu pljučni rak, ki je bil pri moških najpogostejši do leta 1967. Pri ženskah je bil v letu 2005 najpogostejši rak dojke. Po podatkih Registra raka za Slovenijo se obolevnost za to vrsto raka povečuje od leta 1950. Pri obeh spolih se incidenca veča pri raku debelega črevesa in danke, malignem melanomu ter drugih kožnih rakih in trebušni slinavki. Pogostost različnih vrst in oblik raka je prikazana na sliki 25. V obdobju od leta 2001 do leta 2005 je bilo relativno petletno preživetje pri moških 51 odstotno, pri ženskah pa 65 odstotno. (Statistični, 2009).



Slika 25: Najpogostejše vrste raka v Sloveniji (Računsko, 2009)

Podatki omenjenega Registra kažejo, da je 87 % vseh bolnikov z rakom starejših od 50 let, kar prikazuje slika 26 (Statistični, 2009).



Slika 26: Pogostost raka glede na starost (Statistični, 2009)

Napoved za Slovenijo po podatkih Registra raka je, da bo do 74. leta starosti za rakom zbolel vsak tretji moški in vsaka četrta ženska, rojena leta 2005. Napoved za leto 2020 za Evropo pa je, da bo ob nespremenjenih trendih porast obolevnosti v primerjavi z letom 2002 20 % (Računsko, 2009).

8 INVESTICIJA V NOVO OBSEVALNO NAPRAVO (VARIAN CLINAC)

V Sloveniji so radioterapevtske zmogljivosti nezadostne. Na pomanjkanje teleradioterapevtskih obsevalnih naprav pri nas kaže predvsem dejstvo, da se v Sloveniji z obsevanjem zdravi le 38 % bolnikov, obolelih za rakom, kar je najmanj 12 % manj kot to zahtevajo mednarodna priporočila. To je predvsem rezultat pomanjkanja obsevalnih zmogljivosti v državi, pomanjkanje kadrov, pa tudi krčenja indikacij za obsevanje. Tudi čakalna doba na obsevanje je v Sloveniji predolga. Leta 2007 in 2008 je znašala štiri do pet tednov, kar je v nasprotju z mednarodnimi standardi. Ti namreč določajo, da naj bi med prvo predstavitvijo bolnika radioterapevtu in začetkom obsevanja ne preteklo več kot štirinajst dni. Na pomanjkanje obsevalnih naprav pri nas pa kaže tudi dejstvo, da letni prirast incidence raka v Sloveniji v zadnjem obdobju znaša 3 % letno (Pivec in Crnjac, 2009).

Na Onkološkem inštitutu Ljubljana je od januarja 2006 obratovalo šest megavoltnih obsevalnih naprav in ena terapevtska rentgenska obsevalna naprava (2 telekobalta, 4 linearni pospeševalniki in 1 terapevtska rentgenska obsevalna naprava) (Vrhovec in Zule, 2008).

Danes, v letu 2009, na Onkološkem inštitutu Ljubljana obratuje 1 telekobalt, povečalo pa se je število linearnih pospeševalnikov, in sicer na 6.

Tabela 8 prikazuje potrebe po megavoltnih obsevalnikih v Sloveniji do leta 2010 ob predpostavki, da se vsako leto število rakavih bolnikov poveča za 3 odstotke. Iz tabele je razvidno, kakšne bi bile te potrebe ob 11 - urnem obratovalnem času na dan, v primeru krajšega, 9 - urnega delavnika, pa bi bile te potrebe še veliko večje (Strojan, 2007).

Tabela 8: Potrebe po megavoltnih obsevalnih napravah v Sloveniji do leta 2010
(Interno gradivo OI, 2009)

Leto	Število obsevalnikov	
	Obratovalni čas 11 ur/dan	Obratovalni čas 9 ur/dan
2006	11,01	13,46
2007	11,34	13,86
2008	11,68	14,28
2009	12,03	14,70
2010	12,39	15,14

Metodologija zbiranja podatkov za ekonomsko analizo investicije je potekala tako, da smo s pomočjo vodstva Onkološkega inštituta v Ljubljani pridobili informacije o vrednosti nove obsevalne naprave. Posredovali so nam tudi cenik storitev radioterapije, na podlagi katerega smo izračunali celoletne prihodke. Nadalje so nam navedli vse glavne stroške, ki obsegajo stroške vzdrževanja naprave, stroške plač, strošek amortizacije, stroške energije ter ostale stroške. Informacije o tem, kolikšni so stroški zavarovanja obsevalne naprave, so nam posredovali strokovni delavci Zavarovalnice Triglav. Za izračun in oceno investicije smo uporabili ekonomsko metodo vrednotenja projekta in metodo vrednotenja učinkov.

8.1 Ekonomske metode vrednotenja projekta

Za uspešno in čimbolj realno vrednotenje nekega projekta imamo na voljo več metod. V našem projektu bomo uporabili metodi po namenu in po časovnem intervalu. Ti dve metodi upoštevata značilnosti vrednotenja učinkov, vrednotenja tveganja ter statične in dinamične metode (Bizjak, 1996).

8.1.1 Celotni stroški (naložbe in stroški)

Po podatkih Onkološkega inštituta v Ljubljani je cena nove obsevalne naprave, v tem primeru linearnega pospeševalnika znamke Varian Clinac 2100C/D, 3.200.000 €.

Stroški vzdrževanja naprave se z leti spreminjajo. Tako znašajo po podatkih Onkološkega inštituta v Ljubljani stroški vzdrževanja naprave v prvih dveh letih 0,5

odstotka nabavne vrednosti naprave (16.000 €), ker je le ta še v garanciji. Od tretjega do šestega leta se stopnja vzdrževanja poveča na 8 odstotkov (256.000 €), v sedmem in osmem letu pa znaša ta stopnja 14 odstotkov nabavne vrednosti (448.000 €).

Stroški plač obsegajo plače zaposlenih, katerih delo je povezano s to obsevalno napravo. To so specialist radioterapevt, inženir radiologije, fizik, elektro inženir in administrativno tehnični delavci. Ti stroški na letni ravni znašajo 375.090 €.

Strošek amortizacije predstavlja amortizacijo osnovnega sredstva, v tem primeru linearnega pospeševalnika, glede na njegovo amortizacijsko dobo. Izračunali smo jo na podlagi nabavne vrednosti investicije in ta strošek porazdelili na predvideno amortizacijsko dobo 8 let.

$$Sta = \frac{100\%}{Pda} \rightarrow Sta = \frac{100\%}{8\text{ l}} = 12,5 \frac{\%}{\text{l}} \quad (4)$$

Sta = stopnja amortizacije

Pda = povračilna doba amortizacije

Stopnjo amortizacije izračunamo po enačbi (4).

$$Am = \frac{Nv}{Ad} \rightarrow Am = \frac{3.200.000\text{ €}}{8\text{ l}} = 400.000 \frac{\text{€}}{\text{l}} \quad (5)$$

Am = strošek amortizacije,

Nv = nabavna vrednost investicije in

Ad = amortizacijska doba

Strošek amortizacije izračunamo po enačbi (5).

Stroški zavarovanja obsevalne naprave po podatkih Zavarovalnice Triglav d.d. znašajo v prvem letu 170.000 €, v drugem 180.000 €, nato pa do vključno osmega leta 200.000 €. Ne glede na dobaviteljevo dvoletno garancijo, je zavarovalniška premija prvo in drugo leto relativno visoka, saj zavarovalnice »nabirajo« varnostno premijo in »preizkušajo« resnost ter rizičnost posla. Zaradi garancije, pa je strojelomno zavarovanje vseeno za cca 15 % cenejše. Kar pa ne velja za požarno in vlomsko zavarovanje. Kasneje pa se lahko premije ob dobrem škodnem rezultatu tudi znižajo, vendar pri strojelomu ni več popusta na garancijo.

Stroške energije za delovanje obsevalne naprave smo upoštevali glede na dnevno porabo energije, ki znaša okrog 200 kWh. Po podatkih Elektra Ljubljana d.d. je cena za 1 kWh 0,12622 €. Pri tem je potrebno upoštevati tudi omrežnino, ki znaša 0,01827 €/ kWh.

$$\left(200 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 0,12622 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 220 \text{ d}\right) + \left(200 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 0,01827 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 220 \text{ d}\right) = 6.358 \text{ €} \quad (6)$$

Stroške energije smo izračunali po enačbi (6) in znašajo 6.358 €.

Ostali stroški zajemajo tiste stroške, ki niso vključeni v prej naštetih »ključne« stroške. Pod te stroške štejemo stroške pisarne ter stroške administracije pod katere spadajo telefon, faks, internet, ogrevanje in vzdrževanje pisarniških ter ostalih prostorov, stroški pisarniškega materiala, pisarniške opreme, stroški tiskanja gradiv, publikacij, oglaševanja in podobno. Te stroške smo ocenili okvirno in sicer na 24.000 € letno.

8.1.2 Prihodki

Tabela 9: Cenik storitev radioterapije (Interno gradivo OI, 2009)

Storitve	Število točk
Kurativno zdravljenje z obsevanjem s fotoni s 3D planiranjem s kontrastom	405,80
Kurativno zdravljenje z obsevanjem s fotoni s 3D planiranjem	346,30
Kurativno zdravljenje z obsevanjem s fotoni z 2D planiranjem in indiv. zaščito	252,72
Kurativno zdravljenje z obsevanjem z elektroni	81,90

V tabeli 9 so prikazane štiri najpogostejše vrste obsevanj, ki so točkovane glede na zahtevnost obsevanj. Po podatkih Onkološkega inštituta se prvi dve storitvi radioterapije uporabljata povprečno v 60 odstotkih, drugi dve pa povprečno v 40 odstotkih primerov obsevanj. Na dan povprečno opravijo 3,71 obsevanj na posameznem megavoltnem obsevalniku. Vrednost točke za opravljeno storitev znaša 6,76 €. V enem koledarskem letu, ki ima 220 delovnih dni, število obsevanj tako znaša približno 816 obsevanj.

Glede na te ugotovitve bi v povprečju letni prihodki od storitev radioterapije za en obsevalnik znašali 1.614.170 € in smo jih izračunali po enačbi (7).

$$\frac{(405,8t+346,3t)}{2} \cdot 0,6 \cdot 6,76 \frac{\text{€}}{t} \cdot \frac{3,71}{d} \cdot 220d = 1.244.916 \text{ €} \quad (7)$$

$$\frac{(252,72t+81,9t)}{2} \cdot 0,4 \cdot 6,76 \frac{\text{€}}{t} \cdot \frac{3,71}{d} \cdot 220d = 369.254 \text{ €}$$

Letni prihodki skupaj: 1.244.916 € + 369.254 € = 1.614.170 €

8.1.3 Viri financiranja

Onkološki inštitut v Ljubljani je javna ustanova, ki se financira iz proračunskih sredstev. Tako bomo kot vir financiranja upoštevali samo lastna sredstva inštituta.

8.1.4 Individualna diskontna stopnja

Individualna diskontna stopnja (IDS) je ponderirana vrednost obrestnih mer, upoštevajoč strukturo finančnih virov, s katerimi se financira investicija.

Za ceno lastnih virov smo uporabili 5 odstotno diskontno stopnjo (tabela 10), ki jo za takšne projekte kot okvirni kriterij priporoča Evropska komisija, Generalni direktorat za regionalno politiko, za investicijske projekte v javnem sektorju (Navodilo, 2006).

Tabela 10: Individualna diskontna stopnja

Vrsta finančnega vira	Znesek	Delež vira	Realna cena vira (obr. mera)	Ponderirana vrednost (pond. obr. mera)
Lastni viri	3.200.000 €	100,00 %	5,00 %	5,00 %
Skupaj	3.200.000 €	100,00 %		5,00 %

8.1.5 Bilanca uspeha

Iz bilance uspeha v tabeli 11 so razvidni čisti prihodki, odhodki, dobiček in čisti dobiček po odbitju davka na dobiček.

Tabela 11: Bilanca uspeha (v €)

struktura	Ekonomska življenjska doba projekta									
	leta	1	2	3	4	5	6	7	8 SKUPAJ	
I. ČISTI PRIHODKI	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
1. PRIHODKI OD STORITEV	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
2. PRIHODKI OD FINAN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. DRUGI PRIHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ODHODKI	0	991.448	1.001.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.453.448	9.945.584
4. POSL. ODHODKI	0	991.448	1.001.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.261.448	1.453.448	9.945.584
stroški vzdrževanja, materiala in storitev	0	16.000	16.000	256.000	256.000	256.000	256.000	448.000	448.000	1.962.000
amortizacija	0	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	3.200.000
stroški dela (plač)		375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	3.000.720
Zavarovanje naprave		170.000	180.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	1.560.000
Stroški energije		6.368	6.368	6.368	6.368	6.368	6.368	6.368	6.368	50.864
ostali stroški	0	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	192.000
5. ODHODKI FINANCIIRANJA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
obresti domačih kreditov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. DRUGI ODHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III. DOBIČEK	0	622.722	612.722	352.722	352.722	352.722	352.722	352.722	160.722	2.967.776
7. DAVKI IZ DOBIČKA	0	130.772	122.544	70.544	70.544	70.544	70.544	70.544	32.144	599.782
IV. ČISTI DOBIČEK	0	491.950	490.178	282.178	282.178	282.178	282.178	282.178	128.578	2.367.994

8.1.6 Bilanca realnega - ekonomskega toka

Realni - ekonomski denarni tok (tabela 12) je osnova za izračun učinkovitosti projekta. Investicija v novo obsevalno napravo se povrne v petem letu življenjske dobe projekta.

Tabela 12: Realni - ekonomski denarni toka projekta (v €)

struktura	Ekonomski življenjska doba projekta									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8 SKUPAJ	
leta										
A. PRILIVI (Sd)	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
1. ČISTI PRIHODKI	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
PRIHODKI OD STORITEV	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
PRIHODKI OD FINAN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRUGI PRIHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. OŠTANEK VRED. PROJEKTA										0
stalna poslovna sredstva										0
obratna sredstva										0
										0
B. ODLIVI (So)	3.200.000	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	1.085.592	10.545.366
I. INVESTICIJA	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
lastna sredstva	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
kredit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ODHODKI	0	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	1.085.592	7.345.366
3. POS. ODHODKI - brez amort.	0	591.448	601.448	861.448	861.448	861.448	1.053.448	1.053.448	1.053.448	6.745.584
stroški vzdrževanja, materiala it	0	16.000	16.000	256.000	256.000	256.000	448.000	448.000	448.000	1.952.000
stroški dela (plač)	0	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	3.000.720
Zavarovanje naprave	0	170.000	180.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	1.550.000
Stroški energije	0	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	50.864
ostali stroški	0	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	192.000
4. ODHODKI FINANCIRANJA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
anuitete domačih kreditov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5. DRUGI ODHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. DAVKI IZ DOBIČKA	0	130.772	122.544	70.544	70.544	70.544	32.144	32.144	32.144	599.782
										0
IV. NETO PRILIV	-3.200.000	891.950	890.178	682.178	682.178	682.178	682.178	528.578	528.578	2.367.994
V. KUMULAT. NETO PRILIV	-3.200.000	-2.308.050	-1.417.872	-735.694	-53.517	628.661	1.310.838	1.839.416	2.367.994	

8.1.7 Likvidnostni - skupni denarni tok projekta

Likvidnostni skupni denarni tok projekta služi za analizo likvidnosti projekta (tabela 13).

Tabela 13: Likvidnostni - skupni denarni tok projekta (v €)

struktura leta	Ekonomska življenjska doba projekta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
A. PRILIVI (Sd)	3.200.000	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	16.113.360
1. ČISTI PRIHODKI	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
PRIHODKI OD STORITEV	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
PRIHODKI OD FINAN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRUGI PRIHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. VIRI FINANC. INVEST.	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
lastna sredstva	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
kredit	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. OSTAINEK VRED. PROJEKTA									0
stalna poslovalna sredstva									0
obratna sredstva									0
B. ODLIVI (So)	3.200.000	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	10.545.366
1. INVESTICIJA	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
lastna sredstva	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
kredit	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ODHODKI	0	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	7.345.366
4. POS. ODHODKI - brez amort.	0	591.448	601.448	861.448	861.448	861.448	1.053.448	1.053.448	6.745.584
stroški vzdrževanja, materiala in	0	16.000	16.000	256.000	256.000	256.000	448.000	448.000	1.952.000
stroški dela (plač)	0	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	375.090	3.000.720
Zavarovanje naprave	0	170.000	180.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	1.550.000
Stroški energije	0	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	6.358	50.864
ostali stroški	0	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	192.000
5. ODHODKI FINANCIIRANJA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
anuitete domačih kreditov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. DRUGI ODHODKI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7. DAVKI Z DOBIČKA	0	130.772	122.544	70.544	70.544	70.544	70.544	32.144	599.782
IV. NETO PRILIV	0	891.950	890.178	682.178	682.178	682.178	682.178	528.578	5.567.994
V. KUMULAT. NETO PRILIV	0	891.950	1.782.128	2.464.306	3.146.483	3.828.661	4.510.838	5.039.416	5.567.994

8.2 Metode vrednotenja učinkov (statična in dinamična analiza projekta)

V našem projektu bomo za oceno ekonomske upravičenosti uporabili naslednje metode vrednotenja učinkov:

- doba vračanja oz. metoda odplačilne dobe - t,
- metoda donosa oz. dobička na enoto naložbe - d,
- metoda sedanje vrednosti projekta - SV in
- metoda interne stopnje donosnosti - ISD

8.2.1 Statična analiza

Doba vračanja projekta

Odplačilno dobo projekta izračunamo iz nediskontiranih vrednosti realnega - ekonomskega toka projekta. Najbolj enostaven način vrednotenja projekta je metoda odplačilne dobe, ki jo izračunamo po enačbi (8). Doba vračanja projekta mora biti krajša od življenjske dobe, saj pri tej metodi niso upoštevane diskontirane vrednosti prilivov in investicije. Če prej navedeno ne drži, potem projekt opustimo (Bizjak, 1996).

$$\text{Odplač. doba (t)} = \frac{\text{Naložba (N)}}{\text{Povp. letna vred. dobič. (d)}} = \frac{3.200.000 \text{ €}}{696.000 \frac{\text{€}}{1}} = 4,6 \text{ l} \quad (8)$$

To metodo navadno uporabljamo za grobe in hitre ocene. V našem primeru je odplačilna doba projekta 4,6 leta (v petem letu), življenjska pa 8 let kar nam prikazuje tabela 14. Ta podatek nam daje dobre obete za uspeh.

Tabela 14: Doba vračanja - odplačilna doba projekta (v €)

Ekonomska doba projekta - leta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	SKUPAJ
NETO PRILIV	-3.200.000	891.950	890.178	682.178	682.178	682.178	682.178	528.578	528.578	2.367.994
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KUMULA. NETO PRILIV	-3.200.000	-2.308.050	-1.417.872	-735.694	-53.517	628.661	1.310.838	1.839.416	2.367.994	0

Skupni donos na enoto naložbe

Skupni donos na enoto naložbe je statični kazalec, ki nam pove, koliko enot skupnega donosa na enoto naložbe nam prinese. Dobimo torej razmerje med nediskontiranim dobičkom in nediskontirano investicijo. V našem primeru je ta donos 1,74. To nam že nakazuje uspešnost našega projekta (tabela 15). Za vrednotenje naložb uporabljamo enačbo (9):

$$d = \frac{D}{N} = \frac{5.567.994 \text{ €}}{3.200.000 \text{ €}} = 1,74 \quad (9)$$

kjer je:

d = dobiček (donos) na enoto naložbe,

D = dobiček v celotnem obdobju projekta in

N = naložbe (investicija).

Tabela 15: Skupni donos na enoto naložbe

Čisti dobiček	5.567.994 €
Investicija	3.200.000 €
Skupni donos	1,74

Povprečni letni donos na enoto naložbe

Povprečni letni donos na enoto naložbe pa je prej opisan faktor, deljen s številom let trajanja projekta (tabela 16).

Tabela 16: Povprečni letni donos na enoto naložbe

Čisti dobiček	5.567.994 €
Investicija	3.200.000 €
Število let	8
Povprečni letni donos	0,22

Kmalu ugotovimo, da je tako poenostavljen (nediskontiran) izračun vprašljiv. Za bolj realne vrednosti aktualiziranega dobička na enoto naložbe je treba uporabiti metodo diskontiranja, ki je prikazana v tabeli 17. Za izračun uporabimo enačbo (10).

$$d = \frac{Da}{N} \rightarrow Da = D \cdot DF \rightarrow DF = \frac{1}{\left(1 + \frac{Ds}{100}\right)^n} \quad (10)$$

kjer je:

Da = diskontirani neto priliv

DF = diskontni faktor

Ds = diskontna stopnja

n = diskontno obdobje

Tabela 17: Metoda aktualiziranega dobička na enoto naložb po letih (v €)

struktura	leta	Ekonomski življenjska doba projekta								SKUPAJ
		0	1	2	3	4	5	6	7	
IV. NETO PRILIV	0	891.950	890.178	682.178	682.178	682.178	682.178	528.578	528.578	5.567.996
DS	5%									
DF	1	0,952	0,907	0,864	0,823	0,784	0,746	0,711	0,677	
Diskontirani neto prilivi	0	849.476	807.418	589.291	561.230	534.504	509.052	375.651	357.762	4.584.383

$$d = \sum \frac{Da}{N} = \frac{4.584.383 \text{ €}}{3.200.000 \text{ €}} = 1,43 \quad (11)$$

V življenjski dobi projekta nam enota naložbe prinese 1,43 aktualiziranega dobička, kar smo izračunali po enačbi (11).

8.2.2 Dinamična analiza

Izračun kriterijev učinkovitosti projekta po metodi SV projekta in metodi ISD

Za uporabo metode sedanje vrednosti projekta moramo imeti podatke z vsemi prilivi in odhodki tega projekta. Ta metoda je tudi najbolj natančna in temeljita glede časovnih preferenc sredstev in obresti. Uporablja se za ocenjevanje dolgoročnih naložb. Zapišemo jo z enačbo (12).

$$SV = \sum_{i=1}^n \frac{(Sd - So)_i}{(1 + r)^i} = 0 \quad (12)$$

kjer je:

SV = sedanja vrednost projekta,

Sd = skupni donosi projekta,

So = skupni odhodki projekta,

r = v naprej določena diskontna stopnja in

n = število obdobj v življenjski dobi projekta.

Če projekt izpolnjuje pogoj $SV > 0$, je sprejemljiv. To pomeni, da so diskontirane vrednosti skupnih prilivov večje od diskontiranih vrednosti skupnih odlivov, kar je razvidno iz tabele 18.

Tabela 18: Izračun sedanje vrednosti projekta po letih (v €)

struktura	leta	Ekonomska življenjska doba projekta								SKUPAJ	
		0	1	2	3	4	5	6	7		8
A. PRILIVI (Sd)		0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
B. ODLIVI (So)		3.200.000	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	10.545.366
DS		5%									
DF		1	0,952	0,907	0,864	0,823	0,784	0,746	0,711	0,677	
NSV skupni diskontirani prilivi		0	1.537.305	1.464.100	1.394.381	1.327.982	1.264.744	1.204.519	1.147.160	1.092.534	10.432.724
NSV skupni diskontirani odlivi		3.200.000	687.828	656.682	805.090	766.752	730.240	695.467	771.510	734.772	9.048.343

$Sd > So \rightarrow 10.433.995 \text{ €} > 9.049.236 \text{ €}$

$SV = 10.433.995 \text{ €} - 9.049.236 \text{ €}$

$SV = 1.384.759 \text{ €} > 0 \rightarrow$ pogoj je izpolnjen

Pomemben kazalnik učinkovitosti projekta je tudi interna stopnja donosnosti, kjer diskontne stopnje sicer v naprej ne poznamo, je pa mišljena kot tista diskontna stopnja (treba jo je šele izračunati), ki zagotavlja izpolnjevanje naslednjega pogoja (13):

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{(Sd - So)_i}{(1 + r)^i} \quad (13)$$

kjer je:

Sd = skupni donosi projekta,

So = skupni odhodki projekta,

r = ISD = interna stopnja donosnosti (diskontna stopnja) in

n = časovno razdobje v življenjski dobi projekta.

Diskontno stopnjo (r) izračunamo s postopkom diskontiranja in interpolacije. Uporabimo jo lahko tudi za oceno učinkovitosti projekta z vidika družbe in investitorja. Pri kazalniku interne stopnje donosa (ISD) iščemo, matematično gledano, tisto diskontno stopnjo (r) pri kateri je sedanja vrednost (SV) projekta enaka 0 (Bizjak, 1996).

Tabela 19: Izračun ISD z diskontiranjem in interpolacijo po letih (v €)

struktura	leta	Ekonomska življenjska doba projekta								SKUPAJ	
		0	1	2	3	4	5	6	7		8
A. PRILIVI (Sd)	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
B. ODLIVI (So)	3.200.000	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	10.545.366
DS	10%										
DF	1	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467		
NSV	skupni diskontirani prilivi	0	1.467.427	1.334.025	1.212.750	1.102.500	1.002.273	911.157	828.324	753.022	8.611.478
NSV	skupni diskontirani odlivi	3.200.000	666.563	598.341	700.220	636.563	578.694	526.085	557.081	506.437	7.959.984
NSV	skupna razlika Sd - So										651.494
DS	20%										
DF	1	0,833	0,694	0,579	0,482	0,402	0,335	0,279	0,233		
NSV	skupni diskontirani prilivi	0	1.345.142	1.120.951	934.126	778.438	648.699	540.582	450.485	375.404	6.193.828
NSV	skupni diskontirani odlivi	3.200.000	601.850	502.773	539.347	449.456	374.547	312.122	302.969	252.474	6.535.538
NSV	skupna razlika Sd - So										-341.710

Iz tabele 19 je razvidno pri katerih diskontnih stopnjah, ki jih določimo sami (v našem primeru 10 % in 20 %) se skupni diskontirani prilivi zelo izenačijo s skupnimi diskontiranimi odlivi. Iz te tabele opazimo, da se ravno med diskontnima stopnjama 10 % in 20 % spremeni predznak razlike skupnih diskontiranih prilivov in odlivov. To dejstvo nam pove, da v tem območju diskontnih stopenj s pomočjo interpolacije poiščemo pravo vrednost ISD, kar nam prikazuje izraz (14).

$$r = \text{ISD} = 10\% + (20\% - 10\%) \cdot \frac{651.494 \text{ €}}{651.494 \text{ €} - (-341.710 \text{ €})} = 16,56\% \quad (14)$$

Pri našem projektu sta neto sedanja vrednost (NSV) in relativno neto sedanja vrednost (RNSV) večji od nič, torej je naš projekt donosen. Interna stopnja donosnosti pa je tudi večja od individualne diskontne stopnje, zato je projekt učinkovit. ISD najlažje izračunamo s pomočjo programa MS Excel z matematično funkcijo IRR (Internal Rate of Return). Da bi potrdili dobljen rezultat smo ISD izračunali tudi s pomočjo tega programa. Na tak način dobljena vrednost le malenkostno odstopa od izračuna z diskontiranjem in interpolacijo, kar lahko razberemo iz tabele 20.

Tabela 20: Izračun kriterijev učinkovitosti projekta (v €)

Vsi izračuni kriterijev učinkovitosti so narejeni na osnovi:

- *- realnega - ekonomskega denarnega toka
- *- vrednosti naložbe
- *- individualne diskontna stopnje 5,00%

Ekonomska življenjska doba projekta										
leta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
INVESTICIJA	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
NETO PRILIV	-3.200.000	891.950	890.178	682.178	682.178	682.178	682.178	528.578	528.578	2.367.994
1-NSV naložbe	3.200.000									
NPV	0	<i>neto sedanja vrednost naložbe</i>								
	3.200.000									
2-NSV projekta	-3.200.000	<i>neto sedanja vrednost projekta</i>								
(donos)	4.584.382									
	1.384.382	je večja od 0				projekt je učinkovit				
		je večja od nič				projekt je učinkovit				
3-RNSV= 2/1	0,43	<i>relativno neto sedanja vrednost projekta</i>								
		prikaže neto donos na enoto investicijske naložbe								
4-IRR(ISO,ISR)	15,97%	je večja od ind. diskontne stopnje 5,00%								
		<i>interna stopnja donosnosti</i>								
		projekt je učinkovit								

Izračun kazalcev uspešnosti

Ekonomičnost nam pove koliko enot skupnega donosa (Sd) podjetje ustvari na enoto skupnega odhodka (So). Ekonomičnost mora biti večja od ena, kar v našem primeru tudi je. Rentabilnost je najsplošnejša mera za uspešnost poslovanja. *Rentabilnost naložbe* izračunamo iz razlike med skupnim donosom in skupnim odhodom (neto donos) na enoto investicijske naložbe (N). Ali drugače, pove nam, kakšna je relativna neto sedanja vrednost (RNSV) projekta in mora biti večja od nič. *Rentabilnost vseh sredstev* je razmerje med neto donosom projekta ter NSV skupnega odhodka. *Akumulativnost* pa je razmerje med NSV čistega dobička (d) in investicijsko naložbo (tabela 21).

Vse uporabljene metode so pokazale, da bo projekt investicije v novo obsevalno napravo uspešen.

Tabela 21: Izračun kazalcev uspešnosti projekta

struktura	Ekonomska življenjska doba projekta									SKUPAJ	
	leta	0	1	2	3	4	5	6	7		8
PRILIVI (DONOS)	0	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	1.614.170	12.913.360
ODLIVI (ODHODEK)	3.200.000	722.220	723.992	931.992	931.992	931.992	931.992	931.992	1.085.592	1.085.592	10.545.366
INVESTICIJA	3.200.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.200.000
ČISTI DOBIČEK	0	491.950	490.178	282.178	282.178	282.178	282.178	282.178	128.578	128.578	2.367.994
Diskontna stopnja je		5,00%									
NSV prilivov (Sd)		0									
+		10.432.724									
=		10.432.724									
NSV odlivov (So)		3.200.000									
+		5.848.343									
=		9.048.343									
NSV investicije (N)		3.200.000									
+		0									
=		3.200.000									
NSV čist. dobička (d)		0									
+		1.999.096									
=		1.999.096									
Ekonomičnost =											1,15
Rentabilnost naložbe =											43,26%
Rentabilnost vseh sredstev =											15,30%
Akumulativnost =											62,47%

8.3 Končna ocena investicije

Vsi ekonomski kazalniki kažejo, da bi bila investicija v novo obsevalno napravo uspešna. To dokazuje tudi dejstvo, da bi se investicija povrnila v petem letu od nakupa, življenjska doba obsevalne naprave pa je običajno 20.000 delovnih ur, kar znaša cca. 7,58 let ob upoštevanju 11 - urnega dnevnega obratovalnega časa. Bilanca uspeha projekta v normalnem letu poslovanja (peto leto) je pokazala čisti dobiček v višini 282.178 €.

Glede na to, da so vsi podatki, ki smo jih za izračun investicije uporabili realni, tako cene storitev, kot tudi celotni stroški, je ocena investicije povsem realna in v celoti uresničljiva v praksi.

9 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo izdelali in ocenili investicijo v novo obsevalno napravo. Najprej je bilo potrebno ugotoviti dejansko stanje obsevalnih naprav v Sloveniji, kar zajema njihovo število, starost in zmogljivost. Glede na mednarodna priporočila in standarde Evropskega združenja za radioterapijo (ESTRO) smo ugotovili, da v Sloveniji primanjkuje vsaj 40 odstotkov megavoltnih obsevalnih naprav. Iz tega izhaja, da so obsevalne naprave pri nas preobremenjene, dokaj zastarele in da je čakalna doba kar za dvakrat predolga in traja v povprečju 35 dni. Težava je tudi v pomanjkanju kvalificiranega kadra za delo z obsevalnimi napravami, kjer je kar od 50 do 70 odstotni primanjkljaj (Strojan, 2007).

Če bi v tem trenutku želeli doseči evropsko raven števila megavoltnih obsevalnikov na milijon prebivalcev in s tem primerljive čakalne dobe (največ 14 dni), bi potrebovali vsaj 12 takih obsevalnikov ob upoštevanju za evropski prostor neobičajno dolg 11 urni dnevni obratovalni čas naprav. Ob nakupu ene take naprave, bi se čakalna doba zmanjšala za 5 dni.

Pri oceni investicije v novo obsevalno napravo smo ugotovili, da je začetna naložba relativno draga 3,2 M €, vendar smo glede na vse stroške in prihodke realno izračunali, da se investicija povrne že v petem letu rednega obratovanja, torej precej pred iztekom življenjske dobe obsevalne naprave. Ta traja običajno 20.000 delovnih ur oz. cca 7,58 let ob upoštevanju 11 - urnega dnevnega obratovalnega časa (Strojan, 2007). Bilanca uspeha projekta v normalnem petem letu poslovanja je pokazala čisti dobiček v višini 282.178 €. Upoštevati je potrebno tudi nepredvidene okvare na že obstoječih megavoltnih obsevalnikih in morebitna dolgotrajna popravila le teh. Vsi ti pokazatelji nakazujejo, da bi bil nakup nove obsevalne naprave upravičen in prepotreben.

10 LITERATURA

Agencija za radioaktivne odpadke ARAO: Učinki ionizirajočega sevanja in varstvo pred sevanji. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 24.1.2009:

http://www.arao.si/index.php?option=com_content&task=view&id=100&Itemid=65

Amon, T. (2004). Učbenik in razlaga kviza za Rgames: Nekaj pomembnih osnov o sevanju in radioaktivnosti. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 27.1.2009:

<http://www.radiationgames.net/0Slo/CellTissueHumanBody6/O3aaklm/radiation.pdf>

Bioforum slikanje v zdravstvu in zakaj (2008). Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://www.bioigor.com/forum/viewtopic.php?p=29739&sid=55941858390ac84fafbe16f1261a4d60>

Bizjak, F. (1996). Tehnološki in projektni management. Nova Gorica: Grafika Soča

Dozimetrija (1996). Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://www.pfmb.uni-mb.si/didgradiva/strani/petelinsek/dozimet.htm>

ICJT, Institut Jožef Stefan (2009). Najpogostejša vprašanja in odgovori o radioaktivnih odpadkih. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 24.1.2009:

<http://www.icjt.org/tech/software/software.htm>

Jedrska magnetna resonanca (2009). Pridobljeno s svetovnega spleta dne 20.2.2009:

http://sl.wikipedia.org/wiki/Jedrska_magnetna_resonanca

Koželj, M., Erman, R., Istenič, R., Černilogar Radež, M. (2006). Delo z viri sevanj. 1. izdaja. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost.

Mali, T. (2000). Kako pogledati v človeško telo, ne da bi ga rezali? Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://www.kvarkadabra.net/article.php/tehnike-gledanja-v-telo>

Navodilo za uporabo metodologije pri izdelavi analize stroškov in koristi (2006), Evropska komisija, Generalni direktorat za regionalno politiko. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 19.4.2009:

http://www.svlr.gov.si/fileadmin/svlr.gov.si/pageuploads/KOHEZIJA/Tehnicna_pomoc/20070820_cba.pdf

Pivec, G., Crnjac, A. (2009). Strateški razvoj Univerzitetnega kliničnega centra Maribor 2007-2011. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 27.1.2009:

http://www.sb-mb.si/uploads/media/Strateski_razvoj_2007-2011.pdf

Projekt Forum EMS. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 16.4.2009:

http://www.forum-ems.si/gradiva/razumeti_ems/frekvencni_spekter.jpg

Računsko sodišče RS (2009). Kako se Republika Slovenija sooča s problematiko rakavih bolezni. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 29.6.2009:

<http://www.rs->

[rs.si/rsrs/rsrs.nsf/V/K40589BFE099A01FAC12575C300354835/\\$file/RAK_Predstavitvev.pdf](http://www.rs-rs.si/rsrs/rsrs.nsf/V/K40589BFE099A01FAC12575C300354835/$file/RAK_Predstavitvev.pdf)

Seliger, J. (2007). Valovanje. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://www.fmf.uni-lj.si/~seliger/valovanje2.pdf>

Serša, G. (2004). Biološki učinki ionizirajočega sevanja. Ljubljana: ZVD Zavod za varstvo pri delu d.d.

Statistični urad RS (2009). Teden boja proti raku 2009. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 29.6.2009:

http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?ID=2196

Strojan, P. (2007). Perspektive zdravljenja z obsevanjem v Sloveniji. Zdrav Vestn, 76, str. 810. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://vestnik.sz.d.si/st07-12/807-811.PDF>

Strojan, P. (2009). Revija Vita: Zdravljenje z obsevanjem. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 27.1.2009:

http://www.revijavita.si/Melanom/Zdravljenje_z_obsevanjem/zdravljenje_z_obsevanjem.html

Sušnik, J. (2009). Radioaktivnost in varnost pred sevanjem. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 24.1.2009:

<http://www.svo-rs.si/ARENA05/AEnergija&OkoljeVsebina.nsf/986e06ab949b49dac1256a4a006029a8/1e50186aec190179c1256f82003c21bb?OpenDocument>

Vrhovec, Z., Zule, R. (2008). Teleterapija. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

http://medfiz.fmf.uni-lj.si/Files/Sem_TELETERAPIJA.pdf

Zaščita pred sevanjem. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 24.1.2009:

<http://www.sb-mb.si/index.php?id=253>

Zupan, J., Derganc, J. (2009). Kvarkadabra - časopis za tolmačenje znanosti. Pridobljeno s svetovnega spleta dne 28.1.2009:

<http://www.kvarkadabra.net/index.html?/vprasanja/teksti/sevanje.htm>