

# Kemijski i biološki učinci ionizirajućeg zračenja - analiza rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici

---

Lugarić, Karlo

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:799170>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-08**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

Karlo Lugarić

**KEMIJSKI I BIOLOŠKI UČINCI  
IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA – ANALIZA  
RIZIKA IZLOŽENIH DJELATNIKA U  
OPĆOJ BOLNICI**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016

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

Karlo Lugarić

**CHEMICAL AND BIOLOGICAL EFFECTS  
OF IONIZING RADIATION – RISK  
ANALYSIS OF EXPOSED EMPLOYEES  
IN GENERAL HOSPITAL**

Final Paper

Karlovac, 2016

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

Karlo Lugarić

**KEMIJSKI I BIOLOŠKI UČINCI  
IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA – ANALIZA  
RIZIKA IZLOŽENIH DJELATNIKA U  
OPĆOJ BOLNICI**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Slaven Lulić, dipl. ing.

Karlovac, 2016

# ZAVRŠNI ZADATAK

I



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J. Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij: Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite  
(označiti)

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, rujan 2016.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Karlo Lugiarić

Matični broj: 0420414019

Naslov: Kemijski i biološki učinci ionizirajućeg zračenja – analiza rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici

Opis zadatka: Prilikom obavljanja svakodnevnih radnih zadataka u općoj bolnici, pojedini djelatnici izloženi su nekom obliku zračenja od uređaja za dijagnostiku. U teorijskom dijelu radu objasniti ćemo kemijske i biološke učinke zračenja na ljudski organizam, a u eksperimentalnom dijelu provest ćemo istraživanje o riziku izloženih radnika.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

5/2016

9/2016

9/2016

Mentor:

Slaven Lulić, dipl. ing.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Ivan Štedul, prof.

## PREDGOVOR

II

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

*Zahvaljujem svom mentoru Slavenu Luliću, dipl. ing. na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada.*

*Također se zahvaljujem Općoj bolnici Karlovac, na čelu s tadašnjim sanacijskim upraviteljom mr. sc. Suadom Crnicom, dr. med. zbog odobrenja za korištenje podataka u svrhu izrade eksperimentalnog dijela rada te voditelju Odsjeka za zaštitu na radu i zaštitu od požara Marijanu Mariću, struč. spec. ing. sec. na nesebično pruženoj pomoći.*

***Na kraju, posebno bih zahvalio svojim roditeljima na razumijevanju, potpori i pomoći tijekom cijelog studija.***

## SAŽETAK

Ovaj rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu definirani su koncepti i termini vezani za djelovanje ionizirajućeg zračenja, kemijske i biološke učinke zračenja te zaštitu od zračenja. Eksperimentalni dio temelji se na petogodišnjem praćenju primljenih doza zračenja prema vrsti poslova i radnih zadataka za svakog od 111 djelatnika. Također, prikazane su brojčane vrijednosti primljenih doza za svakog djelatnika prije kontrolnog intervala te je dana usporedba svih službi i odjela s količinom primljenih doza zračenja. U radu je prikazano stanje rendgen uređaja i radnog okoliša opće bolnice. Rezultati istraživanja pokazali su da je rizik za izložene djelatnike sveden na najmanju mjeru, uz uvjet da se svi pridržavaju osnovnih mjera zaštite od zračenja, zakonskih propisa i pravila struke.

Ključne riječi: ionizirajuće zračenje, kemijski učinci zračenja, biološki učinci zračenja, zaštita od zračenja, rizik izloženih djelatnika

## SUMMARY

This paper contains theoretical and experimental part. Concepts and terms related to effects of radiation, chemical and biological effects of radiation and radiation protection are defined in theoretical part. Experimental part is based on the observation during the period of five years in which the received doses of radiation are measured according to type of work assignments for each of 111 employees. Also, totally received doses for period before the control interval for each employee and comparison of all departments and divisions with received amount of radiation are given. The condition of X-ray units and work environment in general hospital are given in this paper. The research results, which are shown in this paper, indicate that the risk for the exposed employees is reduced to minimum, provided that everyone abides basic measures of protection, legislation and regulations of profession.

Key words: ionizing radiation, chemical effects of radiation, biological effects of radiation, radiation protection, risk of exposed employees

# SADRŽAJ

# IV

ZAVRŠNI ZADATAK	I
PREDGOVOR	II
SAŽETAK	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD .....	1
1.1. Predmet i cilj rada .....	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja .....	1
1.3. Sadržaj i struktura rada .....	2
2. DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA.....	4
2.1. Uvod u predmetno područje .....	4
2.2. Radioaktivnost.....	5
2.3. Radioaktivni raspad.....	5
2.3.1. Zakon radioaktivnog raspada.....	6
2.3.2. Vrste radioaktivnog raspada .....	7
2.3.2.1. Alfa raspad .....	7
2.3.2.2. $\beta^-$ raspad.....	8
2.3.2.3. Gama raspad.....	8
2.4. Kemijski i fizički principi djelovanja .....	8
2.4.1. Fotoelektrični efekt.....	10
2.4.2 Comptonov efekt.....	11
2.4.3. Tvorba para elektron – pozitron .....	12
2.4.4. Relativna vjerojatnost interakcije zračenja i materije.....	13
2.4.5. Ateunacija fotonskog zračenja .....	13
3. KEMIJSKI UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	15



3.1. Fizička faza djelovanja .....	16
3.2. Fizikalno-kemijska faza djelovanja .....	17
3.3. Kemijska faza djelovanja.....	18
3.3.1. Monte Carlo simulacija.....	19
3.3.1.1. Izračun putanja nabijenih čestica Monte Carlo metodom .....	21
4. BIOLOŠKI UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	23
4.1. Deterministički (nestohastički) učinci zračenja .....	24
4.2. Stohastički učinci zračenja .....	24
4.3. Odnos doze i učinka.....	25
4.4. Učinci zračenja na molekularnoj razini .....	27
4.4.1. Detekcija oštećenja DNA .....	29
4.4.1.1. Kromosomske aberacije .....	29
4.4.1.2. Mikronukleus-test .....	29
4.4.1.3. Komet-tehnika .....	29
5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA.....	31
5.1. Ciljevi zaštite od zračenja.....	31
5.2. Načela zaštite od zračenja .....	31
5.3. Zakonske osnove zaštite od zračenja .....	32
5.4. Osobna dozimetrija .....	34
5.4.1. Termoluminiscentna dozimetrija .....	34
6. RIZIK IZLOŽENIH DJELATNIKA U OPĆOJ BOLNICI – EKSPERIMENTALNI DIO.....	37
6.1. Izbor problema .....	37
6.2. Metodologija istraživanja .....	37
6.2.1. Instrument istraživanja .....	37
6.2.2. Uzorak istraživanja.....	38

6.3. Cilj istraživanja .....	38
6.4. Hipoteze .....	38
7. PRIKAZ PRIMLJENIH DOZA ZRAČENJA PREMA VRSTI POSLOVA I RADNIH ZADATAKA.....	39
7.1. Odjel za radiologiju.....	41
7.2. Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu .....	46
7.3. Služba za kirurgiju .....	51
7.4. Odjel za urologiju .....	57
7.5. Odjel za ginekologiju i opstetriciju .....	59
7.6. Odjel centralne operacije i sterilizacije .....	60
7.7. Služba za internu medicinu – Odjel za kardiologiju s koronarnom jedinicom .....	63
8. ZAJEDNIČKI POKAZATELJI OPĆE BOLNICE .....	65
9. ISPITIVANJE RENDGEN UREĐAJA I RADNOG OKOLIŠA S UTVRĐIVANJEM ČINJENIČNOG STANJA U SMISLU SIGURNOSTI .....	68
9.1. RTG uređaj POLYMOBIL 2 .....	68
9.2. RTG uređaj OPESCOPE WHA-50N .....	69
9.3. RTG uređaj OPESCOPE PLENO WHA-200 .....	72
9.4. RTG uređaj AXIOM ARTIS MP .....	73
9.5. RTG uređaj ICONOS MD .....	75
9.6. RTG uređaj LUNAR DPX-NT .....	76
9.7. RTG uređaj BUCKY DIAGNOST TH2.....	77
9.8. RTG uređaji ORTHOPOS 3 i TOMO BS, UD150L-RII .....	78
9.9. RTG uređaj CH-200 RADSPED .....	79
9.10. RTG uređaj YSIO .....	80
9.11. RTG uređaj SELENIA DIMENSIONS 3D .....	82

10. PROCJENA PREOSTALOG RIZIKA I ANALIZA OPASNOSTI NA RADNIM MJESTIMA PRIMJENOM AUVA METODE.....	83
11. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA.....	86
11.1. Utemeljenost prve hipoteze H1 .....	86
11.2. Utemeljenost druge hipoteze H2 .....	87
12. ZAKLJUČAK.....	88
LITERATURA.....	89
POPIS KRATICA I SIMBOLA.....	91
POPIS SLIKA .....	94
POPIS TABLICA .....	95
POPIS GRAFIKONA .....	96
PRILOG – SUGLASNOST SANACIJSKOG UPRAVITELJA .....	98

# 1. UVOD

## 1.1. Predmet i cilj rada

Tema ovog završnog rada jest *Kemijski i biološki učinci ionizirajućeg zračenja – analiza rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici*. Svrha teorijskog dijela je proučavanje aktualne literature te analiza djelovanja ionizirajućeg zračenja na ljudski organizam.

Eksperimentalni dio rada, odnosno provedeno istraživanje, obuhvaća prikaz podataka odnosa zračenja na ljudsko zdravlje. Također, dana je analiza primljenih doza zračenja po djelatnim kategorijama prema objektivnim uvjetima rada, vrsti poslova i radnim zadacima. Ispitivanjem rendgen uređaja i radnog okoliša utvrđeno je činjenično stanje u smislu sigurnosti.

Osnovni ciljevi rada su:

- definicija koncepata: radioaktivnost, zračenje, vrste zračenja i učinak na živa bića, radiobiološki i kemijski učinci zračenja,
- analiza rizika povezanih sa zračenjem, procjena i usporedbe rizika,
- zaštita od ionizirajućeg zračenja: ciljevi, načela i provedba,
- istraživanje aktualnog stanja izloženih radnika koji rade u sferi zračenja.

S obzirom da o temi postoji vrlo malo referentne literature na hrvatskom jeziku, očekivani doprinos ovog završnog rada jest aktualizacija problematike zaštite od ionizirajućeg zračenja.

## 1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja

Ovaj rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela pa su, s obzirom na to, korištene različite metode i izvori za njegovo pisanje. Za teorijski dio rada korištene su najrelevantnije knjige i članci iz područja prirodnih znanosti koje se bave zračenjem i učincima zračenja. Prikupljanje i proučavanje literature trajalo je nekoliko mjeseci, a najčešći izvori podataka bili su znanstvene i stručne domaće i strane publikacije.

Za eksperimentalni dio rada, odnosno istraživanje koje uključuje analizu rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici, korištena je metoda analize dostupne dokumentacije opće bolnice. Analiza istraživanja sastoji se od prikupljanja, sređivanja i obrade podataka. Podaci su prikupljeni u obliku godišnjih izvještaja o primljenim dozama (ispitivanje osobnog doznog ekvivalenta Hp (10)) za svakog djelatnika koji radi u sferi ionizirajućeg zračenja, kao i u obliku izvještaja o mjerenju i ispitivanju svakog izvora ionizirajućeg zračenja u općoj bolnici. Interval istraživanja obuhvatio je petogodišnje razdoblje (01.01.2011. – 31.12.2015.) kako bi se rezultati eksperimenta mogli smatrati relevantnim.

### **1.3. Sadržaj i struktura rada**

Završni rad sastoji se od dvanaest osnovnih glava koji su upotpunjeni popisom literature, kratica i simbola, slika, tablica i grafikona, sažetkom na hrvatskom i engleskom jeziku i predgovorom.

Uvodna, prva glava ukratko opisuje temu i ciljeve rada te izvore i metode prikupljanja podataka. Sadrži i objašnjene strukture zbog lakšeg pregleda rada.

Druga glava orijentirana je na djelovanje ionizirajućeg zračenja i u njoj se iznose osnovne definicije i koncepti vezani za ionizirajuće zračenje, objašnjava se radioaktivnost, radioaktivni raspad i vrste radioaktivnog raspada te se obrađuje pitanje kemijskih i fizičkih principa djelovanja zračenja.

Treća glava bazirana je na konceptu kemijskih učinaka zračenja, iznosi osnovne faze kemijskog djelovanja zračenja. Također, objašnjen je izračun putanje nabijenih čestica u vodi pomoću Monte Carlo simulacije.

Četvrta glava produbljuje tematiku djelovanja ionizirajućeg zračenja sa stajališta bioloških učinaka. U njoj se detaljno opisuju deterministički i stohastički učinci zračenja, odnos između doze i učinka te učinci na molekularnoj razini.

U petoj glavi diskusija je naglašena na zaštitu do zračenja, objašnjeni su ciljevi i načela zaštite od zračenja, navedeni su najbitniji zakonski i podzakonski akti te je iznešen sustav osobne dozimetrije.

Šesta glava sadrži opis izbora problema, metodologije i cilja istraživanja, kao i postavljene hipoteze eksperimentalnog dijela rada.

U sedmoj, osmoj i devetoj glavi prikazani su prikupljeni podaci i rezultati istraživanja vezani za rizik izloženih djelatnika u općoj bolnici.

Deseta glava daje pregled procjene preostalog rizika i analize opasnosti na radnim mjestima pomoću AUVA metode.

U jedanaestoj glavi analizirani su rezultati istraživanja te je opisana utemeljenost obje hipoteze.

Završna, dvanaesta glava, predstavlja zaključna razmatranja temeljena na eksperimentalnom dijelu rada.

## 2. DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

### 2.1. Uvod u predmetno područje

Ionizirajuće zračenje<sup>1</sup> je pojam koji se koristi za opis prijenosa energije kroz prostor u obliku subatomske čestice i elektromagnetskih valova koji imaju sposobnost ionizirati materiju. Proces u kojem atomi gube, katkad i dobivaju, elektrone i tako od neutralnih postaju električki nabijene čestice nazivamo ionizacijom. Takav prijenos energije je statistički proces, a prostorna raspodjela energije utječe na učinak zračenja.

Zračenje postoji svugdje u okolišu. Zbog svog dugog vremena poluraspada, najstarije radioaktivne tvari potječu još od prije postanka Zemlje. To znači da je određena količina zračenja oduvijek postojala na Zemlji. Zbog ljudskih faktora (testovi s atomskim oružjem i proizvodnja nuklearne energije), unazad posljednjih sto godina povišeno je zračenje u okolišu. Intenzitet zračenja ovisi o različitim čimbenicima: o području gdje živimo, sastavu tla, godišnjem dobu, geografskoj širini itd. U prirodi, medicini, industriji, znanstvenim i drugim istraživanjima, ionizirajuće zračenje pojavljuje se u obliku rendgenskih zraka (X zrake), gama zraka, elektrona i subatomske čestice.

Izlaganje zračenju od izvora koji su izvan tijela, npr. od rendgenskog uređaja ili nekog drugog uređaja koji proizvodi ionizirajuće zračenje, nazivamo vanjsko ozračenje. Unutarnje ozračenje ljudi nastaje kad radionuklidi uđu u tijelo prehranom, udisanjem ili izravnom apsorpcijom kože.

Nedvojbeno je da živimo u radioaktivnom okruženju, što znači da smo uronjeni u globalno polje ionizirajućeg zračenja. Ljudski mišići sadrže radioaktivni ugljik i kalij, radioaktivni polonij i radij u našim su kostima, a radioaktivni plemeniti plinovi i tricij nalaze se u našim plućima. Svakodnevno smo izloženi svemirskom zračenju i zračenju od prirodnih i umjetnih radioaktivnih tvari koje hranom i pićem unosimo u tijelo. Iako postoje brojne prednosti zračenja, mnogi ljudi boje se njegovog učinka. Javnost je najčešće zabrinuta zbog mogućih

---

<sup>1</sup> U tekstu će se uglavnom koristiti generički pojam *zračenje* koji se u cijelom radu odnosi na ionizirajuće zračenje osim ako nije posebno navedeno da se pojam odnosi i na druge vrste zračenja.

nuklearnih nesreća u vlastitoj državi ili u susjednim državama koje bi mogle ugroziti njihovo zdravlje i život. Ponekad je strah od zračenja opravdan, no najčešće je posljedica neznanja. Većina ljudi upoznata je s osnovama o zračenju, ali to je nedovoljno za zadovoljavajuće odgovore na brojna sumnjičava pitanja. Takvo nepotpuno znanje, kao i u mnogim drugim područjima, često proizvodi još veći strah.

## **2.2. Radioaktivnost**

Svako živo biće i predmet sastoji se od atoma. Odrasla osoba sastoji se od  $4 \cdot 10^{27}$  atoma kisika, ugljika, dušika, fosfora, kalija i ostalih elemenata.

U jezgri atoma sažeta je njegova masa. Jezgra zauzima tek neznatni dio ukupnog volumena cijelog atoma. Možemo reći da je prostor oko jezgre gotovo prazan jer se tamo nalaze sićušne čestice s negativnim električkim nabojem koje nazivamo elektroni, a koji rotiraju oko jezgre. Upravo elektroni određuju kemijska svojstva promatrane materije. Međutim, elektroni (orbitalni) nemaju ništa s fenomenom radioaktivnosti. Radioaktivnost je svojstvo koje ovisi o građi jezgre atoma.

Brojem protona u jezgri određena je vrsta elementa. Vodik ima jedan proton, helij dva, litij tri, berilij četiri, bor pet, a ugljik šest. Što je veći broj protona, jezgra postaje sve teža. Radioaktivnost jezgre ovisi o broju neutrona u jezgri. U većini slučajeva, da bi jezgra bila stabilna, broj neutrona mora biti tek nešto veći od broja protona. U stabilnoj jezgri neutroni i protoni povezani su nuklearnim silama toliko snažnim na kratkom doseg da se niti jedna čestica ne može odvojiti iz veze bez vanjskih utjecaja. No ako je broj neutrona neuravnotežen, situacija je značajno drugačija. U takvoj situaciji jezgra će se riješiti viška energije na različite načine u obliku elektromagnetskog vala i/ili struje čestica. Takvu emisiju nazivamo ionizirajuće zračenje.

## **2.3. Radioaktivni raspad**

Radioaktivnim raspadom nazivamo pojavu u kojoj nestabilna jezgra emitira višak energije. Iako jezgre, s nekoliko protona i neutrona, već i nakon jednog



raspada postaju stabilne. Pri raspadu npr. radija ili urana, odnosno teških jezgri atoma, raspadom nastala jezgra može i dalje biti nestabilna. Tek nakon niza raspada potomaka, postići će se stabilno stanje.

Uran-238, koji sadrži 92 protona i 146 neutrona ( $92 + 146 = 238$  čestica u jezgri), prilikom raspada uvijek gubi 2 protona i 2 neutrona. Dakle, poslije raspada broj preostalih protona jest 90, što znači da jezgra više nije uranova, već torijeva. To nam govori da je raspadom urana-238 nastala nova jezgra: torij-234. Takva jezgra je i dalje nestabilna i novim raspadom prelazi u protaktinij. Tek nakon četrnaestog raspada konačno će nastati stabilna jezgra: olovo. Uzrok radioaktivnih raspada je postojanje brojnih radionuklida (radioaktivnih jezgri) u okolišu.

Sposobnost neke tvari da emitira zračenje nazivamo radioaktivnost. Da bi mogli kvantificirati tu sposobnost, potrebno je definirati brzinu kojom se količina neke tvari koja sadrži radionuklide spontano raspada emitirajući zračenje. Aktivnost te tvari ujedno je i brzina raspada. Ako je u jednoj sekundi broj raspada jedan, onda je aktivnost tvari 1 bequerel [Bq]. Aktivnost isključivo ovisi o broju raspada u jedinici vremena, neovisno o masi ili volumenu tvari.

Vrijeme potrebno da se polovica radionuklida u uzorku tvari raspadne jest vrijeme poluraspada jedne vrste radionuklida. Vrijeme je različito za različite radionuklide – od djelića sekunde do više milijardi godina. U sukcesivnim razdobljima koja odgovaraju vremenu poluraspada početna aktivnost smanjuje se za  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$  itd. Ako znamo početnu aktivnost i vrijeme poluraspada, možemo predvidjeti preostalu aktivnost neke tvari u bilo kojem trenutku u budućnosti. [1]

### **2.3.1. Zakon radioaktivnog raspada**

Izrazom za brzinu smanjenja broja  $N$  radioaktivnih jezgara nekog izvora opisujemo proces radioaktivnog raspada:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N. \quad (1)$$

Rješenje navedene diferencijalne jednačbe jest eksponencijalna funkcija:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

gdje  $N_0$  predstavlja broj radioaktivnih jezgara prisutnih u vrijeme  $t = 0$ . Konstanta radioaktivnog raspada  $\lambda$  u vezi je s vremenom poluraspada  $T_{1/2}$ , odnosno s vremenom u kojem se raspala polovina od početno prisutnih jezgara:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (3)$$

Brzina promjene broja radioaktivnih jezgara:  $-dN/dt$  identična je aktivnosti radioaktivnog izvora  $A$ . Diferencijalnu jednačbu potrebno je nadopuniti ako za vrijeme radioaktivnog raspada nastane nestabilna jezgra, odnosno moramo uzeti u obzir stvaranje nove radioaktivne tvari:

$$\frac{dN(t)}{dt} = S(t) - \lambda \cdot t. \quad (4)$$

Brzinu stvaranja te radioaktivne tvari opisuje izraz  $S(t)$ .

### 2.3.2. Vrste radioaktivnog raspada

#### 2.3.2.1. Alfa raspad

Kod teških jezgara većeg masenog broja ( $A > 170$ ) najčešće se događa alfa raspad. Iz jezgre se emitira jezgra helija ( ${}^4_2\text{He}$ ), a sastoji se od dvaju protona i dvaju neutrona:



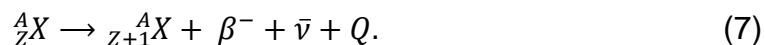
Takav raspad također rezultira pretvorbom elemenata kao npr.:



Između alfa čestice i novoformirane jezgre raspodjeljuje se energija transformacije. S obzirom da ta jezgra ima mnogo veću masu od alfa čestice, alfa čestice su približno monoenergijske i emitirane su energijama 4 – 8 MeV. Ako će nastala jezgra ostati u ekscitiranom stanju, rezidualna energija jezgre emitirat će se kao gama zračenje.

### 2.3.2.2. $\beta^-$ raspad

S obzirom na stabilni nuklid, radionuklidi s viškom neutrona stabilnost postižu  $\beta^-$  transformacijom neutrona u proton, a odašilje se  $\beta^-$  čestica (elektron), antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) i energija ( $Q$ ):



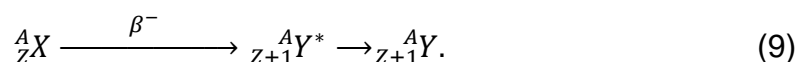
Elektron ( $e^-$ ) ili  $\beta$  čestica i antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) su izbačeni iz jezgre i zajedno dijele kinetičku energiju koja je oslobođena u tom procesu. Rezultat je transmutacija, odnosno pretvorba elementa kao npr.:



Neutrino je električki neutralna čestica bez mase ili točnije minimalne mase, samim time i slabe interakcije s materijom. To nam govori da ga nije jednostavno detektirati.

### 2.3.2.3. Gama raspad

Nakon  $\beta^-$  raspada jezgra potomak ostaje često u uzbuđenom stanju. Odašiljanjem elektromagnetnog zračenja ( $\gamma$ -zrake) jezgra trenutno prelazi u osnovno stanje i to na sljedeći način:



Prelazak u osnovno stanje događa se u nekoliko faza, pa odaslane gama zrake pokazuju diskretni linijski spektar. Gama zrake imaju vrlo kratke duljine vala i diskretne energije.

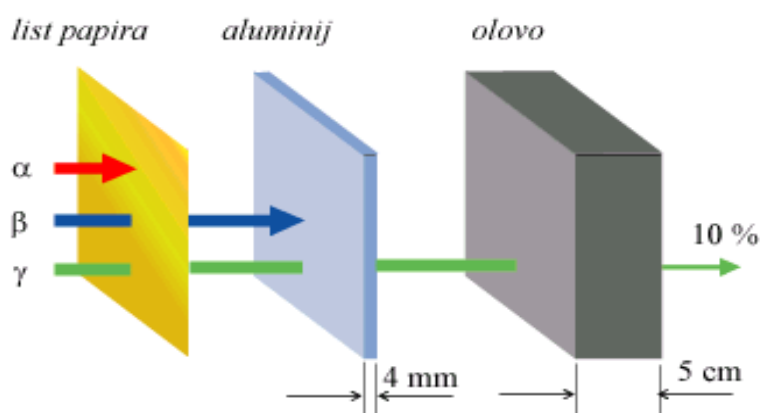
Od ostalih tipova radiaktivnog raspada treba spomenuti: metastabilno stanje, pozitronsku emisiju, elektronski zahvat i fisiju. [2]

## 2.4. Kemijski i fizički principi djelovanja

Prolaskom zračenja kroz materiju dolazi do ionizacije, pri čemu se energija zračenja prenosi na elektrone u atomima materije čime zračenje slabi dok ne nestane ili mu prodorna moć ne oslabi da više nije štetno. Interakciju zračenja s

biološkim materijalom možemo promatrati na temelju fizičkih i kemijskih principa, a učinke zračenja dijelimo na primarni i sekundarni efekt. Ozračenje izaziva molekularne promjene, a posljedica takvih poremećaja su biokemijske promjene te rane fiziološke promjene. Isto tako, postoji mogućnost da dođe do mutacije – genetske i somatske. Prve izazivaju promjene na potomstvu, a potonje su individualne tjelesne promjene (rak, leukemija, prijevremeno starenje i sl.) Stupanj oštećenja ovisi o: vrsti i količini zračenja kojoj je materija izložena, gdje se materija nalazi u trenutku zračenja, trajanju zračenja, bioloških karakteristika materije itd.

Prilikom čestičnog zračenja alfa i beta čestice imaju masu te se prolazom između atoma sudaraju s njim i pritom dio svoje kinetičke energije predaju elektronima. Broj ioniziranih atoma se povećava, a njihova se energija smanjuje. Kad predaju svu energiju, čestice se zaustave i utope u materiji. Alfa česticu mogu zaustaviti list papira, koža ili sloj zraka. Beta čestica ima manju masu te se rjeđe sudari s materijom, ali joj je zbog toga potreban dulji put da sudarima preda svu svoju kinetičku energiju prije nego se zaustavi. Znatno veću prodornost od alfa i beta čestica posjeduju gama čestice (slika 1). To su visoko energetski fotoni s jako kratkim valovima, manjim od 0.5 nm. Gama zračenje spada u najprodorniju vrstu zračenja, ali im je jačina ionizacije manja od alfa i beta čestica. [3]



Sl. 1. Prodornost alfa, beta i gama čestice

### 2.4.1. Fotoelektrični efekt

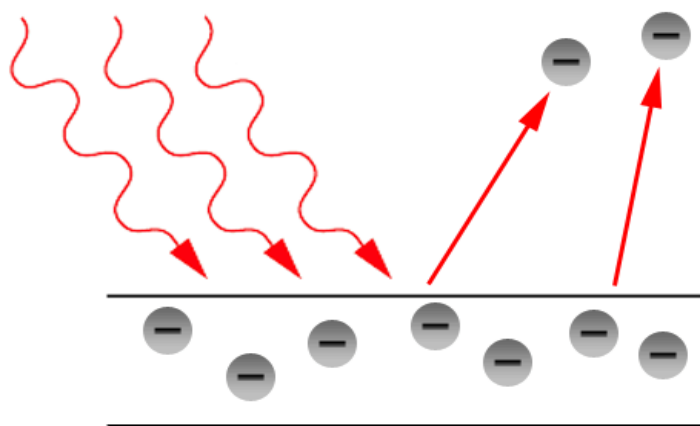
Kod zračenja sastavljenom od fotona nemamo čestice koje imaju masu, već pakete energije. Najvažniji mehanizmi interakcije fotona elektromagnetskog zračenja i materije, iako ne i jedini, su fotoelektrični efekt, Comptonov efekt i tvorba para elektron – pozitron.

Fotoelektrični efekt je proces interakcije fotona s atomom u kojem se foton potpuno apsorbira, a jedan elektron izbacuje iz atoma (slika 2). Dakle, foton se sudara s elektronom te mu predaje svu svoju energiju. Ako je ta energija veća od energije vezanja elektrona za atom, taj se elektron oslobađa, ostavljajući atom s jednim +1 nabojem. To znači da je foton nestao, odnosno da imamo ionizaciju. Treba napomenuti da energija fotona mora biti ispod određene granice. [2]

Po Einsteinovoj formuli svaki foton elektromagnetskog zračenja ima energiju:

$$E_k = h(f - f_0) = hf - W_0. \quad (10)$$

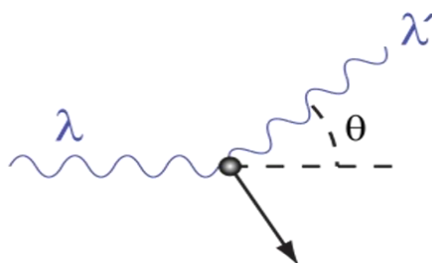
Planckova konstanta  $h$  iznosi  $6.62 \cdot 10^{-34}$  Js. Granična frekvencija  $f_0$  ovisna je o materijalu, dok  $f$  predstavlja frekvenciju ulazne svjetlosti. Izlazni rad materijala označen je s  $W_0$ .



Sl. 2. Fotoelektrični efekt

### 2.4.2 Comptonov efekt

Kao i kod fotoelektričnog efekta, foton se također sudara s elektronom u omotaču. No prilikom Comptonovog efekta, predaje mu dio svoje energije i izbaci ga iz omotača te tako ionizira atom (slika 3). Zatim otklonjen za neki kut od upadnog smjera nastavlja put s umanjenom energijom. Time je energija samo smanjena, ali foton nije nestao. Tako nastaje raspršeno, sekundarno zračenje koje je veliki problem u zaštiti od zračenja. Comptonovo raspršenje pojavljuje se u svim materijalima, većinom s fotonima energije od otprilike 0.5 do 3.5 MeV. [4]



Sl. 3. Comptonov efekt

Konačni rezultat je Comptonova jednačba raspršenja:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta), \quad (11)$$

gdje je:

$\lambda'$  – valna duljina fotona poslije raspršenja,

$\lambda$  – valna duljina fotona prije raspršenja,

$h$  – Planckova konstanta,

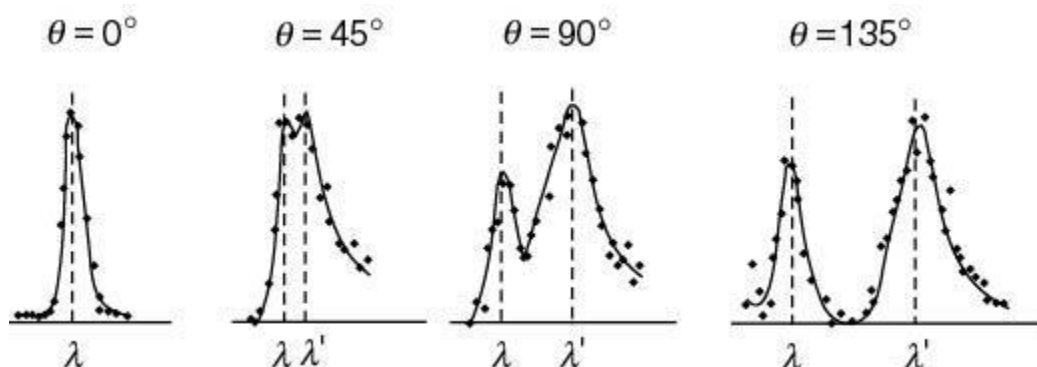
$m_e$  – masa elektrona ( $9.109 \cdot 10^{-31}$  kg),

$c$  – brzina svjetlosti ( $2,99792458 \cdot 10^8$  m/s),

$\frac{h}{mc}$  – Comptonova valna duljina,

$\theta$  – kut pod kojim se rasprši foton.

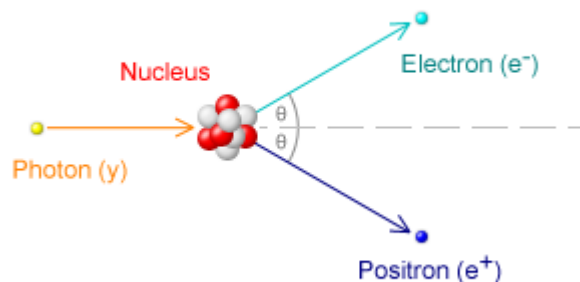
Proporcionalno rastu kuta raspršenja, valna duljina raspršenih zraka postaje veća. Svaki graf Comptonovog rezultata za kuteve raspršenja od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $135^\circ$  predstavlja intenzitet X zraka kao funkciju valne duljine (slika 4). [2]



Sl. 4. Comptonovi rezultati za kuteve raspršenja

### 2.4.3. Tvorba para elektron – pozitron

Prilikom procesa stvaranja parova dolazi do međudjelovanja fotona s poljem koje okružuje jezgru atoma. Cjelokupna energija fotona pretvara se u masu i kinetičku energiju pozitivno i negativno nabijenog elektrona. Minimalna energija upadnog fotona koja omogućuje odvijanje ovakvog procesa jednaka je masi dvaju elektrona:  $2 m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ . Prosječni smjer para pozitron – elektron blizak je smjeru upadnog fotona, dok je pri višim energijama prosječan kut između smjera elektrona (ili pozitrona) i upadnog fotona obrnuto proporcionalan energiji elektrona (ili pozitrona). Elektron i pozitron mogu međusobno izmjenjivati kinetičku energiju. Stvaranje parova može se odvijati i u polju elektrona s vjerojatnošću koja je proporcionalna broju elektrona. Prag za takvu interakciju je  $2.04 \text{ MeV}$ . Kada se pozitron uspori dolazi do anihilacije s elektronom, odnosno procesa u kojem se čestica sudara sa svojom antičesticom. Na taj način nastaju dva fotona energije  $0.51 \text{ MeV}$  koji se nastavljaju kretati u suprotnim smjerovima (slika 5). [4]



Sl. 5. Tvorba para elektron – pozitron

#### 2.4.4. Relativna vjerojatnost interakcije zračenja i materije

S promjenom atomskog broja ( $Z$ ) i energije fotona, mijenja se vjerojatnost triju najvažnijih interakcija zračenja s materijom.

Fotoelektrične interakcije prevladavaju u svim materijalima prilikom ozračivanja fotonima s dovoljno niskom energijom. Dakle, fotoelektrični efekt je najvjerojatniji za materijale visokog atomskog broja ( $Z$ ) i niskoenergijske fotone. Vjerojatnost fotoelektričnog efekta opada porastom energije fotona i to mnogo brže nego što Comptonov efekt postaje dominantan.

Kod interakcije fotona, čije su energije između 1 MeV i 5 MeV, s materijalima visokog atomskog broja prevladava Comptonov efekt. Atomski udarni presjek za Comptonov efekt proporcionalan je atomskom broju ( $Z$ ). Važnost Comptonovog efekta opada s daljnjim porastom energije fotona.

Tvorba para elektron – pozitron ima najveći doprinos između interakcije zračenja i materije onda kada energija fotona prelazi nekoliko MeV. [5]

#### 2.4.5. Ateunacija fotonskog zračenja

Prilikom prolaska fotona kroz apsorber, vjerojatnost interakcije ovisi o energiji fotona i sastavu te debljini apsorbera. Uski snop monoenergijskih fotona atenuira se prema eksponencijalnoj jednadžbi:



$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu \cdot t}, \quad (12)$$

gdje je:

$I(0)$  – ulazni intezitet snopa,

$I(x)$  – intenzitet snopa nakon prolaza kroz apsorber,

$\mu$  – linearni koeficijent atenuacije apsorbera za određenu energiju.

Apsorpcijski procesi kao što su fotoefekt, Comptonov efekt i stvaranje parova uzrokuju atenuaciju fotona. Maseni atenuacijski koeficijent možemo rastaviti u komponente:

$$\mu_m = \tau + \sigma + k, \quad (13)$$

gdje se  $\tau$  odnosi na fotoelektrični efekt,  $\sigma$  predstavlja Comptonovo raspršenje, a  $k$  prikazuje efekt stvaranja parova. Fotoelektrična komponenta brzo opada porastom energije fotona, dok se brzo povećava porastom atomskog broja apsorbera. Komponenta Comptovog efekta polako opada porastom energije upadnog fotona i porastom atomskog broja apsorbera. Komponenta stvaranja parova pojavljuje se tek za veće energije od 1.02 MeV, a potom porastom energije fotona i atomskog broja apsorbera raste logaritamski. [2]

### 3. KEMIJSKI UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Da bi mogli shvatiti biološke učinke ionizirajućeg zračenja, prvo moramo znati opisati kemijske promjene koje su posljedica zračenja u tekućoj vodi. Osnovni element svih živih bića je stanica. Stanica se sastoji od jezgre, citoplazme i membrane, a sadrži ~ 70-85 % vode, ~ 10-20 % proteina, ~ 10 % ugljikohidrata i ~ 2-3 % lipida. Ovisno o vrsti tkiva, veličina stanice varira. Nabijene čestice i elektromagnetsko zračenje, pri prolazu kroz materijal, djeluje na elektrone i vrše ionizaciju otkidajući ih od atoma i molekula za koje su vezani. Ioniziraju se molekule tijela i one postaju aktivne u kemijskom smislu i počinju djelovati na organske makromolekule tijela. Upravo na taj način zračenje može dovesti do mijenjanja, oštećenja ili razaranja tih molekula. To uzrokuje nastanak kompleksnih fizikalno-kemijskih procesa i bioloških promjena čiji je rezultat biološka reakcija na zračenje. Biološka reakcija je proporcionalna količini energije zračenja koja je apsorbirana u tijelu. [6]

Zračenje uništava žive stanice, posebice djelovanjem na DNA. Takvo djelovanje može biti izravno – na atome koji izgrađuju molekule žive tvari ili posredno – na atome okolnog sustava, većinom vode. Prodirući kroz visoko organiziranu mikroheterogenu strukturu žive stanice, zračenje s određenom vjerojatnošću predaje dio svoje energije pojedinim molekulama raspoređenima duž putanje čestica. Ta je vjerojatnost određena sumarnom elektronskom gustoćom i ne ovisi o strukturi molekula. Elektronska gustoća ima približno jednake vrijednosti za različite biomolekule i vodu, a to znači da u stanici nema strukture koja je preodređena za primanje energije zračenja. Nakon što apsorbiraju energiju zračenja, molekule prelaze u različita pobuđena stanja od kojih dio završava ionizacijom. U pobuđena stanja ionizacije mogu dospjeti proteini, nukleinske kiseline, lipidi, ugljikohidrati, molekule vode i različiti organski spojevi.

Apsorpcija energije, stvaranje ekscitiranih i ioniziranih molekula te slobodnih radikala karakterizirano je međudjelovanjem zračenja i ozračene materije. Krajnja oštećenja DNA uzrokovana zračenjem nastaju izravno (ionizacije same mete) ili neizravno (ionizacija vode i slobodnih radikala). Uzrok prekidanja jednog ili obaju lanaca DNA jest neposredno, odnosno izravno međudjelovanje

zračenja i makromolekule DNA. Ukupni broj nastalih lomova u stanici, što uključuje i krivulje preživljavanja stanica, moguće je opisati matematički i to linearnim, kvadratičnim i linearno-kvadratičnim funkcijama.

Neizravno djelovanje zračenja na DNA odvija se preko slobodnih radikala, tj. raznih atomskih, visokoreaktivnih tvorevina kiska, vodika i slobodnih elektrona što na sebe vežu normalne molekule vode. Takve tvorevine su vrlo kratkog vijeka trajanja jer u nekoliko pikosekundi reagiraju s okolinom. [7]

### 3.1. Fizička faza djelovanja

Prva faza djelovanja zračenja na stanicu jest fizička faza i traje od  $10^{-18}$  do  $10^{-13}$  sekundi. Pojava ioniziranih i pobuđenih molekula neravnomjerno razdijeljenih duž putanje zračenja rezultat je prve faze. Zračenje potom svojim djelovanjem uzrokuje radiolizu vode, odnosno rastvaranje vode. Te procese ionizacije i pobuđivanja molekula nemoguće je izravno mjeriti niti ih je moguće modificirati. Treba napomenuti da je broj ionizacija i pobuđenja određen isključivo svojstvima zračenja, a ne i stanjem stanice. [6]

Radioliza vode iznimno je značajna za indirektno djelovanje zračenja zbog visokog sadržaja vode za većinu bioloških sustava. Nakon primarne ionizacije molekule vode radiolizom:



oslobođeni elektron izgubio je kinetičku energiju (još u polju matičnog iona, tj. ionizirane molekule vode), a zatim se ponovno rekombinira s ionom od kojeg je otpušten:



Pritom uzrokuje stvaranje pobuđene molekule vode  $H_2O^*$  koja se disorica na radikale:



Druga mogućnost je situacija gdje elektron pomalo gubi energiju te se za vrijeme te „termalizacije“ udalji oko 15 nm od iona na način da rekombinacija u polju matičnog iona nije vjerojatna. Elektron zatim biva „okružen“ omotačem orijentiranih vodenih dipola koji snažno smanjuju reaktivnost takvog „hidratiziranog“ elektrona:



Molekula vode izgubila je elektron pa disocira na:



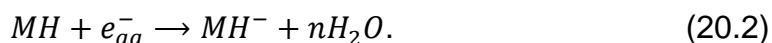
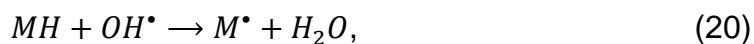
dok „hidratizirani“ elektron  $e_{aq}^-$  reagira s  $H^+$  ionom:



Ovdje također kao glavni produkti nastaju radikali  $H^\bullet$  i  $OH^\bullet$  koji se razlikuju samo po prostornoj razdiobi od radikala koji nastaju izravno. Radikali  $H^\bullet$  i  $OH^\bullet$  u oba slučaja sadrže dovoljnu kinetičku energiju da slobodno difundiraju i da mogu reagirati s trećim partnerom u reakciji.

### 3.2. Fizikalno-kemijska faza djelovanja

Fizikalno-kemijska faza je druga faza djelovanja zračenja, a karakteriziraju je radijacijsko-kemijske reakcije slobodnih radikala iona i ekscitiranih molekula te promjena strukture biomolekule. Budući da nemaju jedan elektron u vanjskoj ljusci, radikali stvoreni radiolizom vode posebno su reaktivni. Primjeri reakcija takvih radikala s organskim molekulama (biomolekulama, odnosno makromolekulama: DNA, proteini, polisaharidi, lipoproteini itd.), oblika MH, jesu:



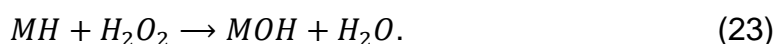
Međutim, moguće se i sljedeće reakcije:



Izravnim djelovanjem zračenja nastaje sljedeća reakcija:



Među molekularnim produktima reaktivan je  $H_2O_2$ :



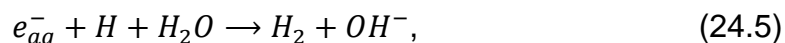
Možemo zaključiti da zbog posljedice radiolize vode prevladavaju reakcije oksidacije, koje potom razaraju molekule. [7]

### 3.3. Kemijska faza djelovanja

U vodi zračenje u velikoj mjeri proizvodi sekundarne elektrone čija je energija reda  $\sim 10$ -70 eV. Predajući svoju energiju molekulama vode, oni usporavaju vrlo brzo i tako ih ioniziraju sve dok im energija ne padne ispod  $\sim 7.4$  eV (energija ekscitacije za tekuću vodu). Time su se stvorili ioni  $H_2O^+$  i  $H_2O^-$  prikazanim u reakcijama (14) i (15). Na vremenskoj skali manjoj od  $10^{-15}$  sekundi, dvije neutralne molekule vode efektivno prelaze u par iona. Ioni se zatim brzo raspadaju (između  $10^{-15}$  s i  $10^{-12}$  s) i formiraju tzv. radikale što je prikazano u reakciji (16).

Radikali  $OH$  i  $H$  električki su neutralni, ali imaju slobodne valencije pa su zato kemijski vrlo aktivni. U fazi koja se događa u vremenskom intervalu  $\sim 10^{-12}$  s do  $10^{-6}$  s dolazi do kemijskog djelovanja, odnosno do difuzije iona i radikala koji se rekombiniraju ili udaljuju od mjesta interakcije zračenja. Reakcije su sljedeće:





Radikali ulaze u kemijske reakcije s makromolekulama, a ioni se brzo neutraliziraju. Eksperimenti na virusima pokazali su da za oštećenje jedne makromolekule treba oko tisuću radikala. [6]

### 3.3.1. Monte Carlo simulacija

Prije rasprave o biološkim učincima zračenja, prikazat ćemo neke primjere detaljnih izračuna putanja nabijenih čestica u vodi pomoću Monte Carlo simulacije. Kako bi mogli shvatiti o čemu se radi, za početak ćemo na najjednostavnijem primjeru objasniti kako funkcionira Monte Carlo metoda.

Monte Carlo simulacija odnosi se na široki spektar matematičkih modela i algoritama čija je glavna značajka upotreba nasumičnih brojeva u rješavanju različitih problema. Najčešće je riječ o matematičkim problemima čija se rješenja ne mogu odrediti analitički ili za to ne postoje učinkoviti numerički algoritmi. Ukratko, matematički model u Monte Carlo eksperimentu odvija se po istom uzorku:

- određuje se domena ulaznih podataka,
- generiraju se ulazni podaci nasumično iz domene,
- potrebno je izvesti determinističku računicu koristeći ulazne podatke,
- pronalazak srednje vrijednosti svake pojedine računice.

Ideju iza Monte Carlo metode najjednostavnije je prikazati tako što ćemo pokušati odrediti iznos Ludolfovog broja  $\pi$ .

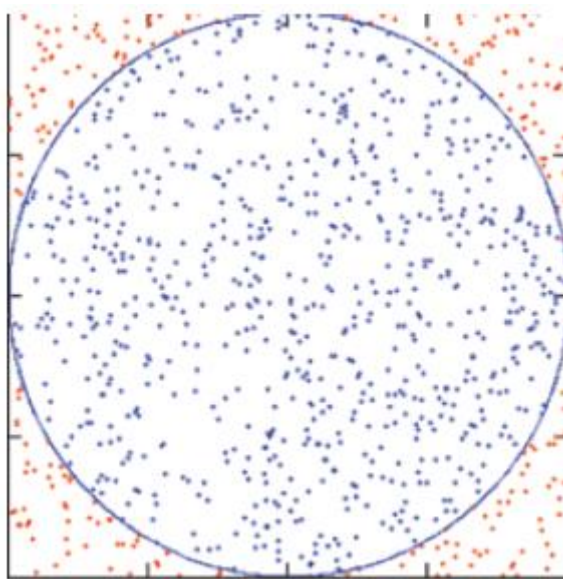
Ako nasumce odaberemo točku u kvadratu stranice  $2r$ , u kojem se nalazi krug polumjera  $r$ , vjerojatnost da se ona nalazi unutar kruga je  $\frac{\pi}{4}$ :

$$\frac{P_k}{P_{\zeta}} = \frac{r^2 \pi}{4r^2} = \frac{\pi}{4}. \quad (25)$$

Isto tako, tu vjerojatnost možemo i procijeniti. Zakon velikih brojeva nam govori da će omjer broja točaka koje su završile unutar jedinične kružnice i ukupnog broja točaka biti približno jednak traženoj vjerojatnosti – pod uvjetom da izaberemo dovoljno velik broj točaka. Dakle, što je veći broj odabranih točaka to je i naš rezultat bliže točnoj vrijednosti. Jedina nepoznanica u jednadžbi (25) je broj  $\pi$ . Možemo napisati:

$$\pi = \frac{4n}{i}, \quad (26)$$

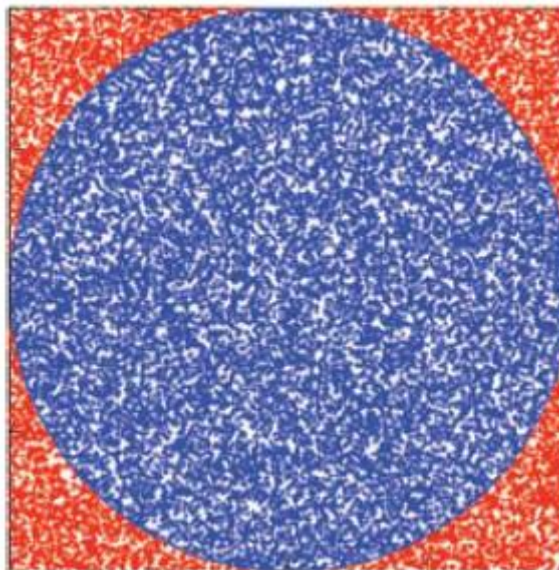
gdje  $n$  predstavlja broj točaka unutar jedinične kružnice, a  $i$  ukupan broj odabranih točaka. Ishod jedne simulacije uz tisuću odabranih točaka daje nam sljedeći rezultat:  $\pi = 3.108$  (slika 6).



Sl. 6. Simulacija s 1000 točaka

Iz ovog možemo zaključiti da nam ovakav način procjene nije vrlo precizan. Odaberemo li npr. sto tisuća točaka, poboljšat ćemo algoritam (slika 7). Krajnji rezultat takvog algoritma je precizniji rezultat:  $\pi = 3.1420$ . Ako stotinu puta ponovimo algoritam sa sto tisuća točaka, pohranimo svaki dobiveni rezultat i uzmemo srednji rezultat svih ponavljanja, dobit ćemo sljedeću vrijednost:

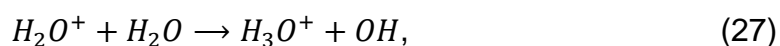
$\pi = 3.141519$ . Ako su nam dovoljne prve tri ili četiri decimale, dobili smo vrlo dobar rezultat. [8]



Sl. 7. Simulacija sa 100 000 točaka

### 3.3.1.1. Izračun putanja nabijenih čestica Monte Carlo metodom

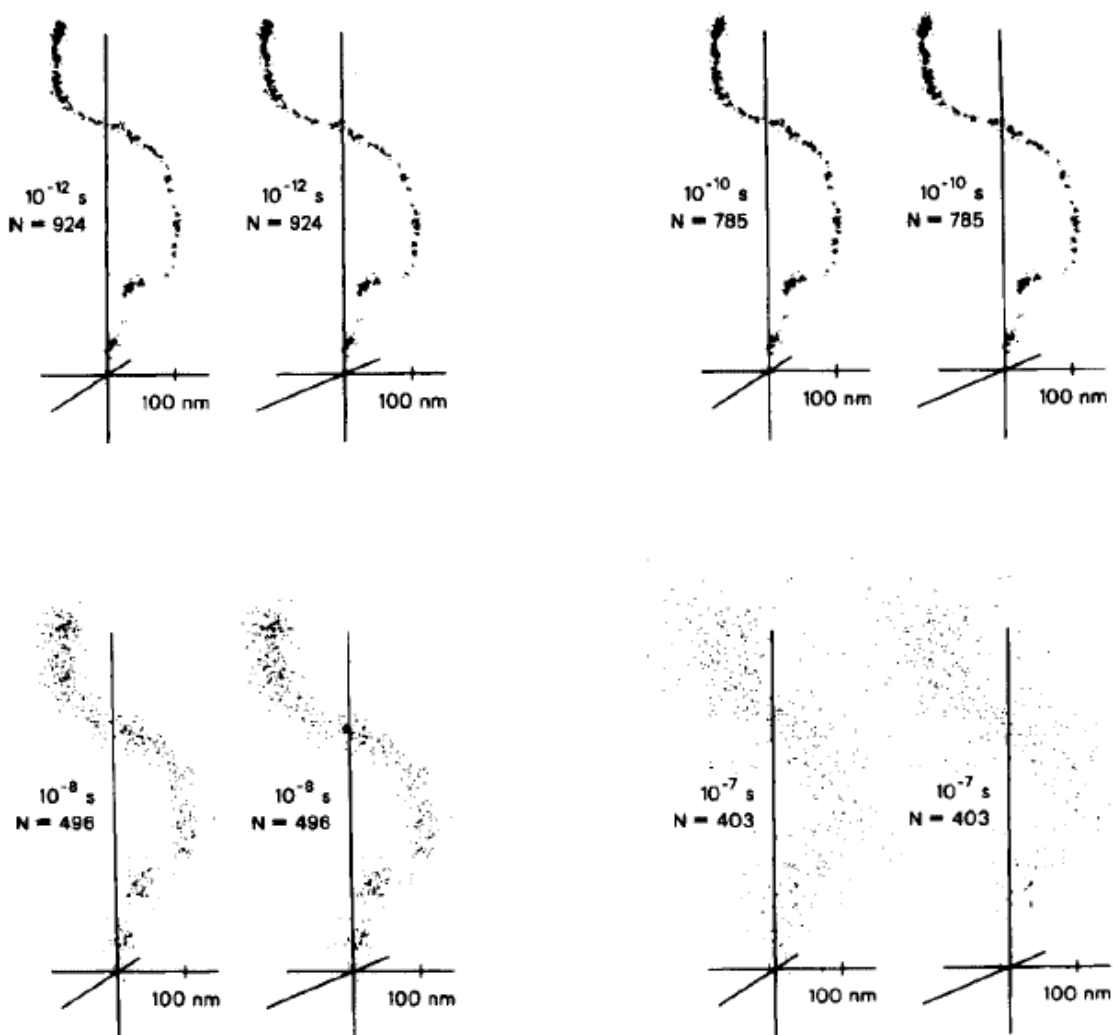
Za izračun prolaska nabijene čestice u vodi potrebno je konstruirati posebne Monte Carlo računalne kodove. U takvim izračunima, individualnoj čestici dozvoljen je gubitak energije i generiranje sekundarnih elektrona na statističkoj bazi, na način kao što se događa i u prirodi. Tamo gdje je to moguće, u izračunu su korištene eksperimentalne vrijednosti presjeka energetskih gubitaka. Sekundarnim elektronima dozvoljeno je stvaranje ostalih sekundarnih elektrona dok im energija ne dosegne razinu manju od 7.4 eV. Monte Carlo kodovi prikazuju nam potpuno detaljnu poziciju i identitet svakog reaktanta  $H_2O^+$ ,  $H_2O^*$  i elektrona duž putanje. Takvim je spojevima dozvoljen razvoj prema reakcijama (14) i (16), ali i reakcijama:



kako bi dobili prikaz pozicije i identiteta svakog od reaktivnih spojeva  $OH$ ,  $H_3O^+$ ,  $e_{aq}^-$  i  $H$  u vremenu od  $10^{-12}$  s.



Kodovi zatim izvrše nasumičnu simulaciju difuzije tako da svakom reaktantu dozvole mali skok u nasumičnom smjeru. Oni koji mogu reagirati reagiraju i uklonjeni su iz daljnjeg razmatranja, osim u slučaju kada nastaje  $H$  prikazanom u reakciji (24.3). Ostali ponove skok s novih pozicija i postupak se ponavlja do razvoja putanje (slika 8).



Sl. 8. Putanja elektrona u vodi izračunata pomoću Monte Carlo simulacije

Svaka točka predstavlja lokaciju jednog od aktivnih radiolitskih spojeva  $OH$ ,  $H_3O^+$ ,  $e_{aq}^-$  ili  $H$  u određenim vremenskim intervalima. Možemo vidjeti da se u vremenu od  $10^{-12}$  s do  $10^{-7}$  s početna struktura putanje bitno promijenila. Nakon vremena od  $10^{-7}$  s, preostali spojevi nastavljaju se širiti dalje s relativno malo dodatnih kemijskih reakcija. [6]

## 4. BIOLOŠKI UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Prvi biološki učinci zračenja pojavljuju se već oko  $\approx 10^{-3}$  sekundi kada završe reakcije s biomolekulama. Pri vremenu od  $\approx 1$  sekunde počinju se događati prve biokemijske promjene. Nakon nekoliko minuta slijede stanične promjene, a za promjenu gastrointestinalnog i centralnog živčanog sustava potrebno je nekoliko dana. Genetski učinci vidljivi su nakon nekoliko godina. [6] Ukratko, biološki učinci zračenja su promjene na živim stanicama, organima ili cijelom tijelu koje nastaju prolaskom zračenja kroz živa bića. Pobudom ili ioniziranjem atoma u živoj stanici zračenje djeluje na životne funkcije stanice, a samim time i na živa tkiva, organe i organizme. [9] S obzirom da biološki učinci zračenja potječu od promjena koje ono uzrokuje u kemijskom sastavu stanice, posljedice za organizam obično ovise o vrsti oštećenja, tipu i funkciji stanice te o broju oštećenih stanica. [7] Osjetljivost pojedinih vrsta stanica na zračenje nije jednaka. Manje osjetljiva tkiva sastavljena su od već diferenciranih stanica, a mnogo više osjetljive su nediferencirane, mlađe stanice, odnosno tkiva i organi koji se obnavljaju. [9]

Ukupne učinke zračenja na žive jedinki dijelimo na somatske i genetske. Ovisno o dozi, posljedice somatskog učinka u ljudi mogu biti poremećaji krvne slike, oštećenje kože, ali i dugoročne posljedice kao što su leukemija, razne vrste zloćudnih bolesti, smanjenje plodnosti te posljednično skraćenje životnog vijeka. Učinak velikih doza na čovjeka ovisi o ritmu ozračivanja (kratko ili dugo, jednokratno ili višekratno).

Biološke učinke zračenja možemo promatrati na različitim razinama biološke organizacije: na razini cijele populacije, na razini organizma, tkiva ili organa, na staničnoj razini, na razini struktura manjih od stanice i na molekularnoj razini. Na razini populacije se djelovanjem zračenja pojavljuju promjene genskih karakteristika nastale zbog genskih i kromosomskih mutacija pojedinih jedinki vrste.

Na staničnoj razini dolazi do kočenja diobe stanice, stanične smrti ili prijelaza stanice u maligna stanja.

Posljedice molekularne razine zračenja su oštećenje makromolekula DNA, RNA i enzima te promjene u metaboličkim putevima.

Prema pogibeljnosti, biološke učinke zračenja dijelimo u dvije grupe: determinističke (nestohastičke) i stohastičke.

#### **4.1. Deterministički (nestohastički) učinci zračenja**

Deterministički (nestohastički) učinci zračenja pojavljuju se onda kada je primljena dostatno velika doza i za njih postoji prag. To znači da se za nestohastičke učinke može propisati sigurnosna granica.

Primjeri determinističkih učinaka su nemaligne ozljede kože (eritemi), smanjenje broja stanica u koštanoj srži, fibroze, zamućenje očne leće, akutni radijacijski sindrom itd. Ovisno o pragu dozu i vremenskom periodu nakon ozračivanja, različiti su deterministički učinci zračenja.

Radijacijski sindrom, odnosno akutna radijacijska bolest, ima veliki broj oblika koji ovise o mnogim čimbenicima poput vrste zračenja, primljene doze, duljine vremena izlaganja zračenju, osjetljivosti pojedinih organa, tkiva ili cijelog organizma na zračenje, dobi, spolu itd. [7]

#### **4.2. Stohastički učinci zračenja**

Kao što im ime implicira, stohastički učinci su statistički izvjesni, ali im je razdioba slučajna. [6]

Smatra se da je vjerojatnost pojavljivanja stohastičkih učinaka zračenja razmjerna dozi bez praga. To znači da ne postoji neka minimalna doza ispod koje se takvi učinci ne pojavljuju. Drugim riječima, bilo koji iznos doze, bez obzira na to koliko ona bila malena, povećava rizik koji donose stohastički učinci. Upravo ta hipoteza čini osnovu ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principa prema kojem izlaganje zračenju mora biti onoliko nisko koliko se to na razuman način može postići.

Vjerojatnost da se takvi učinci pojave izražava se kao rizik koji je proporcionalan primljenoj dozi.

Pod stohastičkim učincima podrazumijevamo genetička oštećenja i pojavu raka.

Postojeće znanje o zdravstvenim učincima zračenja zasniva se na informacijama prikupljenim iz epidemioloških studija populacija izloženih visokim dozama zračenja. Općenito, epidemiološke studije koje bi sa sigurnošću upozorile na odnos između doze i rizika na niskim dozama morale bi trajati barem koliko i prosječan životni vijek, a zbog izrazito malih učinaka zahtijevale bi ogroman broj ispitanika. Zbog nepraktičnosti i goleme cijene, takve su studije praktički isključene. Dok jedni smatraju da su rizici preniski, mnogi stručnjaci smatraju da su previsoki. Postoje stručna mišljenja da male doze zračenja nisu štetne, nego čak mogu djelovati blagotvorno. Takva mišljenja su demonstrirana u nekim pokusima na staničnoj razini (cellular studies). Hipoteza je poznata pod nazivom radijacijska hormeza (hormesis učinak) ili adaptivni odziv.

Učinci malih doza ne mogu se mjeriti s dostatnom statističkom pouzdanošću. Stoga je za procjenu rizika ključno razumijevanje celularnih mehanizama karcinogeneze. Sve to dovodi tzv. linearnu hipotezu u pitanje, po kojoj i pri najmanjim dozama zračenja postoji linearan odnos između doze i njezina učinka, a koji je proporcionalan riziku. Ozbiljni epistemološki problem nemogućnosti pronalaska štetnih učinaka zračenja pri malim dozama, pri postuliranju LNT hipoteze u važeći sustav zaštite od zračenja, naprosto je ignoriran. [7]

### **4.3. Odnos doze i učinka**

Velikim dijelom biološki učinci zračenja ovise o primljenoj apsorbiranoj dozi tj. količini energije zračenja koja je apsorbirana u jedinici mase tijela. Apsorbirana doza ( $D$ ) je omjer predane energije ( $E_D$ ) koju je zračenje predalo nekoj tvari i mase te tvari:

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}. \quad (28)$$

Jedinica za apsorbiranu dozu je gray [Gy].

Predana energija  $E_D$  razlika je ukupne energije  $E_U$  svih čestica koje su ušle u promatrani element tvari i energije  $E_I$  svih čestica koje su ga napustile, umanjena za defekt mase.

Mjera za biološke učinke koja uzima u obzir njihovu ovisnost o apsorbiranoj energiji i vrsti zračenja je ekvivalentna doza ( $H_T$ ). Ekvivalentna doza apsorbirana nekim tkivom ( $T$ ) jednaka je produktu apsorbirane doze u tkivu ( $T$ ) zbog vrste radijacije ( $R$ ) i težinskih faktora koji uzimaju u obzir razne kvalitete primljenog zračenja ( $W_R$ ):

$$H_T = \Sigma W_R \cdot D_{T,R}. \quad (29)$$

Ekvivalentna doza izračuna se pomoću apsorbirane doze, a mjeri se instrumentima (dozimetrima). Zbog opasnosti za život i zdravlje ljudi koja bi mogla uslijediti zamjenom apsorbirane i ekvivalentne doze, ekvivalentna doza dobila je posebnu jedinicu sievert [Sv]. Sievert je, kao i gray, posebni naziv za joule po kilogramu [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]. [10]

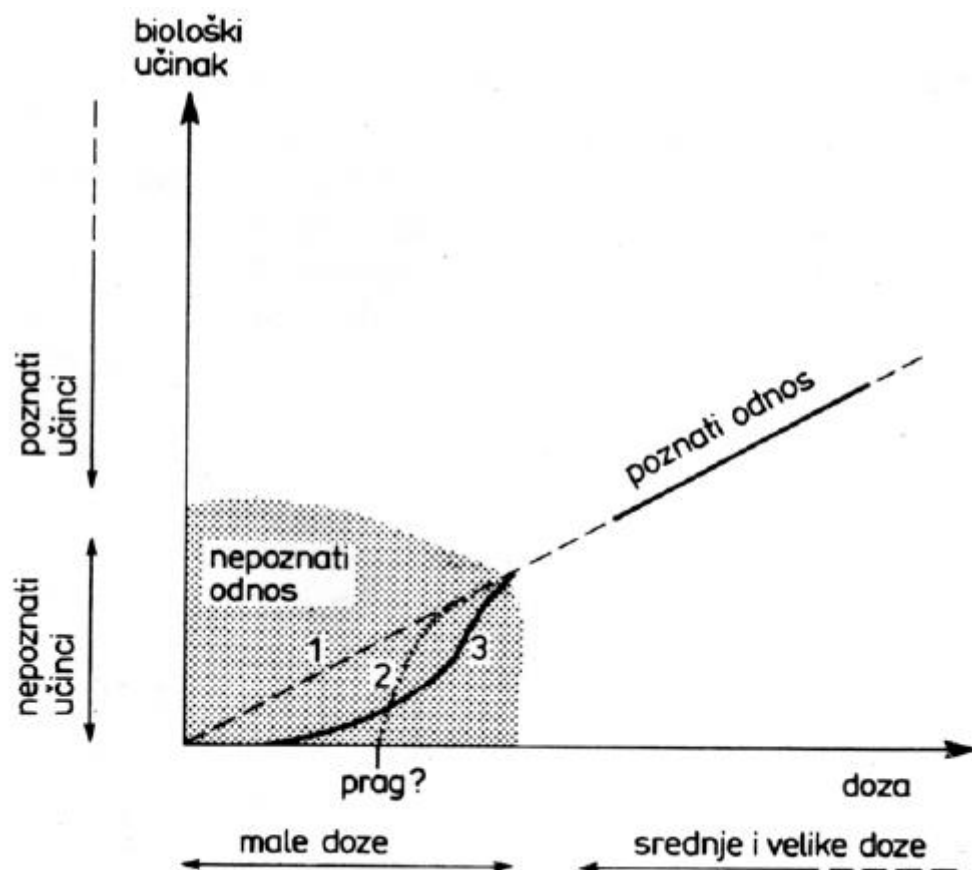
Konačna dozimetrijska veličina koja opisuje rizik od ozračivanja žive tvari jest efektivna doza ( $E$ ). Sumiranjem ekvivalentnih doza po organima ili tkivima korigiranim težinskim faktorima ozračivanja tkiva ( $W_T$ ), efektivnu dozu možemo definirati sljedećom relacijom:

$$E = \Sigma W_T \cdot H_T. \quad (30)$$

Vrijednosti težinskih faktora ( $W_T$ ), za razliku od težinskih faktora ozračivanja  $W_R$ , ne ovise o energiji i vrsti zračenja, već su ovisni o organu ili tkivu. [7]

Za srednje i velike doze odnos između primljene doze i bioloških učinaka zračenja je linearan. Dakle, koliko je puta veća primljena doza, toliko je puta veći i biološki učinak. Za područje malih doza takav odnos nije poznat, no postoje sljedeće pretpostavke (slika 9):

- 1) pretpostavka linearne ovisnosti,
- 2) pretpostavka praga učinka,
- 3) pretpostavka linearno-kvadratične ovisnosti. [6]



Sl. 9. Ovisnost bioloških učinaka o primljenoj dozi

#### 4.4. Učinci zračenja na molekularnoj razini

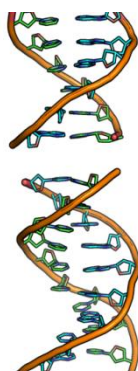
Na molekularnoj razini najopasnija su oštećenja makromolekula DNA. Zračenje na strukturu makromolekule DNA može djelovati na dva načina: neposredno i posredno.

Neposredno djelovanje zračenja na makromolekulu DNA podrazumijeva tri moguća mehanizma.

U prvoj situaciji, jedna zraka u međudjelovanju s molekulom DNA prekida oba lanca i uzrokuje dvolančani lom (slika 10). Tako nastala lezija naziva se jednodogađajna lezija ( $\alpha D$ ). Mogućnost njezinog popravka rekombinacijom iznimno je mala i vrlo vjerojatno nastupa smrt stanice. Broj dvolančanih lomova izravno ovisi o dozi ( $D$ ).

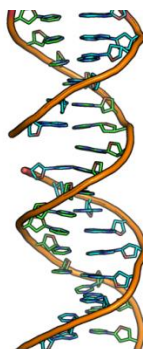
Kod drugog slučaja, jedna zraka pogodi jedan lanac molekule DNA, a zatim druga zraka pogodi drugi lanac iste molekule DNA. Opet nastaje dvolančani lom, ali je on ovog puta posljedica interakcije DNA s dvije različite zrake. Tako nastalu leziju nazivamo dvodogađajnom lezijom ( $\beta D^2$ ). Nakon apsorpiranja određene doze zračenjem ukupni broj nastalih lančanih lomova u stanici možemo prikazati na sljedeći način:

$$N = \alpha D + \beta D^2. \quad (31)$$



Sl. 10. Dvolančani lom molekule DNA

Treći mehanizam oštećenja podrazumijeva pojavu međudjelovanja zračenja i molekule DNA u kojoj dolazi do pucanja samo jednog lanca DNA, odnosno do jednolančanog loma (slika 11). Ovakva vrsta oštećenja može se popraviti.



Sl. 11. Jednolančani lom molekule DNA

Posrednim djelovanjem zračenja nastaje radioliza vode, a to uključuje slobodne radikale vode kao posrednike u prijenosu energije zračenja na biološke molekule. Slobodni radikali reagiraju s molekulama DNA, proteinima i drugim

biološkim makromolekulama tako što daju nove, sekundarne, radikale i molekule  $H_2O$  i  $H_2$ . Također mogu reagirati i s molekulama kisika te tako stvarati radikale vodikova peroksida koji će u narednim reakcijama uzrokovati oštećenje važnih organskih molekula.

#### **4.4.1. Detekcija oštećenja DNA**

U svrhu detekcije oštećenja DNA najčešće primjenjujemo citogenetičke tehnike: analizu strukturnih kromosomskih aberacija, mikronukleusni test i komet-tehniku. [7]

##### **4.4.1.1. Kromosomske aberacije**

Kromosomske aberacije ili anomalije su odstupanja u strukturi ili broju kromosoma u stanici. [11] Konstitucijska kromosomska aberacija može se naslijediti od roditelja nositelja ili se pojavljuje u vrijeme gametogeneze i prisutna je u svim tkivima nositelja. [12] Poznato je da neke od njih mogu stvoriti predispoziciju za razvoj leukemije kao npr. trisomija 21. kromosoma. [13]

Analiza strukturnih oštećenja kromosoma u limfocitima periferne krvi uključuje analizu strukturnih kromosomskih aberacija. Pregledavaju se stanice u metafazi kada su kromosomi najjače kondenzirani tj. najbolje vidljivi, pa stoga i najprikladniji za analizu.

##### **4.4.1.2. Mikronukleus-test**

Ovom metodom otkrivamo strukture u binuklearnim stanicama koje izgledom i optičkom gustoćom nalikuju jezgri – mikronukleuse. Mikronukleusi potječu od acentričnih fragmenata ili čitavih kromosoma, koji se nisu prihvatili za vlakna diobenog vretena ili zaostaju u anafazi. Analiza se provodi na binuklearnim stanicama za vrijeme prve mitotičke diobe. [7]

##### **4.4.1.3. Komet-tehnika**

Tehnika analize pojedinačnih stanica bila je prvi pokušaj izravnog mjerenja oštećenja DNA. U analizi su se limfociti lizirali pod blago lužnatim uvjetima kako bi došlo do djelomičnog odmotavanja molekule DNA. Nakon neutralizacije



preparata, stanice su bile obojene bojom i na temelju različitog intenziteta fluorescencije dvolančane i jednolančane molekule moguće je bilo izmjeriti oštećenje DNA. Kako bi se poboljšala osjetljivost ove tehnike, u protokol je uvedena elektroforeza stanica fiksiranih u mikrogelu nakon liziranja. Oštećene stanice pokazuju pojavu „kometa“ s jasnom fluorescentnom glavom i repom, pa od tada nosi naziv komet-tehnika. [14]

## **5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

Uporaba izvora ionizirajućeg zračenja može dovesti do nepopravljivih štetnosti, pa je posve razumljivo da je posebno potrebno poduzimanje mjera koje će spriječiti nastanak takvih štetnosti. Dakle, zaštita od ionizirajućeg zračenja predstavlja skup mjera kojima je svrha očuvati život i zdravlje čovjeka kao i njegova okoliša od štetnog djelovanja zračenja. [1]

Srž zaštite od zračenja je primjena suvremenih sredstava i znanja iz ovog područja na način da djelatnicima osigura siguran rad na radnim mjestima te da oni u bilo kojem trenutku ili situaciji ne prime veću količinu zračenja od dozvoljene.

### **5.1. Ciljevi zaštite od zračenja**

Pri obavljanju djelatnosti do kojih dolazi do izlaganja zračenju, potrebno je osigurati da to izlaganje bude opravdano. [3] To su djelatnosti koje čovjek drži toliko korisnim za sebe da je voljan izložiti se riziku koji je uz njih povezan. Pritom se taj rizik ne smatra fatalističkim, već se čovjek trudi umanjiti ga ili čak u potpunosti isključiti. Krajnji cilj je postizanje neto koristi za pojedince i društvo u cjelosti od bilo koje djelatnosti.

Ciljevi zaštite od zračenja su:

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

### **5.2. Načela zaštite od zračenja**

Međunarodne preporuke za zaštitu od ionizirajućeg zračenja zasnivaju se ne sljedećim temeljnim načelima:

- 1) opravdanost djelatnosti – moramo biti sigurni da ćemo dobiti veću korist za izložene pojedince ili društvo od štete koju ta izloženost može prouzročiti,

- 2) optimizacija djelatnosti – svako izlaganje mora biti toliko nisko koliko je to moguće postići uvažavajući društvene i ekonomske čimbenike (ALARA),
- 3) granica doze – niti jedna osoba ne smije primiti dozu iznad utvrđenih gornjih granica izlaganja u datim uvjetima.

Sva tri načela odnose se na zaštitu profesionalno izloženih djelatnika i na zaštitu ostalih osoba. [1]

### **5.3. Zakonske osnove zaštite od zračenja**

Znanstvene spoznaje i razne tehničke prijedloge potrebno je zaodjenuti u formu pravnih propisa i na taj način ih učiniti opće obvezatnim.

Na temelju čl. 7. Zakona<sup>2</sup>, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) nadležno je tijelo državne uprave Republike Hrvatske za poslove radiološke i nuklearne sigurnosti. DZRNS nadzire uporabu izvora ionizirajućeg zračenja još prije nego potencijalni korisnik nabavi takav izvor. Za dobivanje radnih dozvola potrebno je ispunjavati određene preduvjete i postupke. Nadzor nad provedbom zaštitnih mjera i sankcije u slučaju kršenja propisa u nadležnosti su DZRNS-a.

Temeljem čl. 1. Zakona o RNS, određena su načela i mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja u svrhu omogućavanja primjerene zaštite pojedinaca, društva i okoliša te od štetnih posljedica ionizirajućeg zračenja i omogućavanja sigurnog obavljanja djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja.

Sukladno čl. 6. Pravilnika<sup>3</sup>, utvrđene su granice izlaganja djelatnika koji obavljaju djelatnosti s ionizirajućim zračenjima:

- a) efektivna doza izloženih djelatnika ne smije u normalnim uvjetima tijekom rada biti veća od 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, uz uvjet da niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza ne smije biti veća od 50 mSv,

---

<sup>2</sup> Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/13, 39/15) – u daljnjem tekstu Zakon o RNS

<sup>3</sup> Pravilnik o granicama ozračenja (NN 59/13)

- b) ekvivalentna doza za očne leće izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima rada biti veća od 150 mSv u jednoj godini,
- c) ekvivalentna doza za podlaktice, šake, stopala ili kožu izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima rada biti veća od 500 mSv u jednoj godini.

Budući da su izloženi djelatnici pod izravnim učestalim i ciljanim nadzorom (dozimetrijskim i zdravstvenim), gore navedene doze bitno su više od granica koje vrijede za pripadnike pučanstva jer su uvjetovane obavljanjem djelatnosti uz izvore zračenja.

Bitno je napomenuti da su i ove granice još uvijek u „sigurnom“ području što znači da se djelatniku jamči da neće imati štetnih posljedica, odnosno da će na vrijeme biti otkrivene i da će se poduzeti potrebne mjere da se otklone. Prije početka školovanja za zanimanja koja uključuju izvore zračenja, bitna je prethodna ocjena zdravstvene sposobnosti potencijalnog djelatnika. Zdravstveni uvjeti kojima moraju udovoljavati izloženi pripravnici i izloženi radnici prije početka i tijekom rada u području izloženosti te učenici i studenti prije početka i tijekom obrazovanja za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja, učestalost zdravstvenih pregleda te sadržaj, način i rokovi čuvanja podataka o tim pregledima utvrđuju se temeljem čl. 2. Pravilnika<sup>4</sup>.

Potrebno je i posebno stručno obrazovanje djelatnika koje uključuje i upoznavanje s mjerama zaštite od zračenja, a ono je utvrđeno temeljem čl. 1. Pravilnika<sup>5</sup>. Temeljem čl. 64. Zakona<sup>6</sup> i sukladno čl. 3. točki 18. Pravilnika<sup>7</sup>, prije početka i tijekom samog rada obvezatan je periodički zdravstveni nadzor nad djelatnikom i održanje kvalitete mjera zaštite za cijelo vrijeme obavljanja djelatnosti. Prema potrebi može se odlučiti da i poslije prestanka rada s izvorima zračenja djelatnik bude i dalje pod nadzorom.

---

<sup>4</sup> Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 80/13)

<sup>5</sup> Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja i primjenu mjera radiološke sigurnosti (NN 97/15, 10/16).

<sup>6</sup> Zakon o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 154/14) – u daljnjem tekstu Zakon o ZNR

<sup>7</sup> Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/84)

## 5.4. Osobna dozimetrija

Prije nego što krenemo s prikazom i obradom podataka koji su određeni korištenjem termoluminiscentnih dozimetara, potrebno je objasniti što je osobna dozimetrija i koja je njezina uloga u zaštiti od zračenja.

Dozimetriju možemo definirati kao mjerenje doze ionizirajućeg zračenja s pomoću odgovarajućih instrumenata – dozimetara. Uspostavljanje numeričkih relacija između doze te fizikalnih, kemijskih i bioloških učinaka koje ta doza izaziva, omogućeno je kvantitativnim mjerenjima doze ionizirajućeg zračenja. [2]

Osobna dozimetrija jest određivanje izloženosti zračenju uz vanjsko ozračivanje osoba koje rade s izvorima ionizirajućeg zračenja. Temeljem čl. 28. i čl 35. Zakona o RNS i sukladno Pravilniku<sup>8</sup>, djelatnici koji rade s izvorima ionizirajućeg zračenja obvezni su tijekom rada provoditi sve propisane i uobičajene mjere samozaštite od ionizirajućeg zračenja te koristiti uređaje za mjerenje osobnog ozračivanja.

Važnost osobne dozimetrije jest u tome da se samo redovitim i točnim praćenjem izlaganja profesionalnog osoblja može zaključiti je li zaštita od zračenja i metoda rada odgovarajuća.

Osobni dozimetar za utvrđivanje efektivne doze na cijelo tijelo u pravilu se nosi na lijevoj strani prsa, kako bi mogao pokazati izloženost cijelog tijela zračenju.

### 5.4.1. Termoluminiscentna dozimetrija

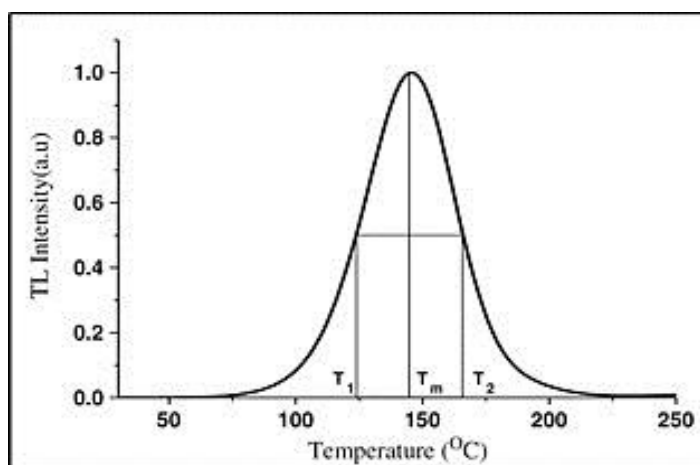
Nakon što molekula apsorbira zračenje, događa se čitav niz procesa. Apsorpcija zračenjem uzrokuje da molekula prijeđe iz osnovnog u jedno od pobuđenih stanja. Pobuđena molekula gubi višak energije radijativnim putem, odnosno emisijom zračenja – tzv. luminiscencijom ili neradijativnim putem u sudaru s drugim molekulama.

Nakon izlaganja ionizirajućem zračenju, većina kristaliničnih materijala pohranjuje dio apsorbirane energije u kristalnoj strukturi.

---

<sup>8</sup> Pravilnik o mjerenju osobnog ozračivanja, ispitivanja izvora ionizirajućeg zračenja i uvjeta rada te o izvještajima i očevidnicima (NN 41/12, 89/13)

Ako se takav ozračeni materijal zagrije na odgovarajući način, dio pohranjene energije otpušta se kao svjetlo. Takvu pojavu nazivamo termoluminiscencijom, a ona se može mjeriti i detektirati odgovarajućim instrumentima. Termoluminiscentni detektori sintetički su ili prirodni materijali koji prigodom zagrijavanja emitiraju svjetlost čiji je intenzitet proporcionalan apsorbiranoj dozi zračenja. Intenzitet emitiranog svjetla u ovisnosti o temperaturi zagrijavanja definiramo kao termoluminiscentnom krivuljom isijavanja (slika 12).



Sl. 12. TL krivulja isijavanja

Termoluminiscentni dozimetrijski sustav sastoji se od četiri glavna čimbenika:

- detektora (slika 13),
- instrumenata za očitavanje (čitača),
- načina cijelog ciklusa mjerenja,
- matematičke obrade podataka.



Sl. 13. TLD dozimetar

Za vrijeme upotrebe i izlaganja ionizirajućem zračenju, materijal koji se rabi kao TL detektor ne smije biti podložan bilo kakvim fizikalno-kemijskim promjenama.

Prednosti TL dozimetrije naspram dozimetrijske metode filmskim dozimetrima su:

- primjenom različitih TL dozimetara moguće je mjeriti sve vrste zračenja,
- raspon doza koji je moguće mjeriti je poprilično širok; od ekstremno niskih ( $\mu\text{Sv}$ ) do ekstremno visokih (10 kSv),
- sastav TL materijala može biti približno ekvivalentan tkivu,
- mjerenje je neovisno o brzinama doza ozračivanja,
- informacija o dozi u TLD-u može biti pohranjena kroz dugo razdoblje (godinama),
- dozimetri su male veličine, jednostavni za nošenje i postavljanje,
- moguća je automatizacija čitanja,
- brz i jednostavan proces odčitavanja i evaluacije. [2]

## **6. RIZIK IZLOŽENIH DJELATNIKA U OPĆOJ BOLNICI – EKSPERIMENTALNI DIO**

### **6.1. Izbor problema**

Prilikom obavljanja radnih zadataka, pojedini djelatnici izloženi su zračenju od uređaja za dijagnostiku. Svaki neželjeni događaj koji može nastati nepravilnim provođenjem mjera i načela zaštite od zračenja predstavlja društveni gubitak, ali i određeni gubitak za samu ustanovu.

Problem ovog istraživanja odnosi se na pitanje koliki je zapravo rizik za život i zdravlje djelatnika koji su profesionalno izloženi ionizirajućem zračenju, uz korištenje svih poznatih mjera i načela zaštite od zračenja.

### **6.2 Metodologija istraživanja**

U sklopu analize rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici, određen je instrument istraživanja i uzorak istraživanja.

#### **6.2.1. Instrument istraživanja**

S ciljem prikupljanja i dobivanja podataka te rezultata istraživanja, kao glavna istaživačka metoda odabire se metoda studije dokumentacije, dok je izvor istraživanja područje prakse zaštite na radu.

Studij dokumentacije podrazumijeva prikupljanje, sređivanje i obradu podataka. Podaci su prikupljeni u obliku godišnjih izvještaja o primljenim dozama izloženih djelatnika i izvještaja o mjerenju i ispitivanju rendgen uređaja koji se koriste kao izvor ionizirajućeg zračenja.

Postupak pregleda dokumentacije bio je temeljit. Sva dostupna dokumentacija je pregledana i podaci su korišteni u izradi ovog rada.

Pri izradi ovog rada korištena su sredstva i materijali različitih ovlaštenih stručnih tehničkih servisa za stručne poslove zaštite od ionizirajućeg zračenja.



### 6.2.2. Uzorak istraživanja

Istraživanje je provedeno na uzorku od 111 izloženih djelatnika koji svakodnevne radne zadatke izvršavaju u sferi ionizirajućeg zračenja.

### 6.3. Cilj istraživanja

Cilj istraživanja jest doći do potvrde pretpostavke da je rizik za izložene djelatnike u općoj bolnici u okviru zakonskih i podzakonskih odredbi.

Do 31. prosinca 1999. godine, s osobnim dozimetrima mjerene su i doze ionizirajućeg prirodnog zračenja, pa su stoga bile daleko više izražene u mikrosievertima ( $\mu\text{Sv}$ ). Od siječnja 2000. godine mjeri se isključivo efektivna doza ionizirajućeg zračenja, pa su od tada doze zračenja mnogostruko smanjene.

### 6.4. Hipoteze

Na temelju identificiranog problema, postavljenog općeg istraživačkog pitanja i cilja istraživanja, mogu se postaviti sljedeće hipoteze:

**H1: Niti jedan izloženi djelatnik opće bolnice nije primio efektivnu dozu veću od 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, uz uvjet da niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza nije bila veća od 50 mSv.**

Sukladno zakonskim i podzakonskim odredbama, utvrđene su granice izlaganja djelatnika koji obavljaju djelatnosti s ionizirajućim zračenjima. Dokazivanjem ove hipoteze ostvarit će se cilj istraživanja.

**H2: Izvori ionizirajućeg zračenja u ispravnom su stanju, a radni okoliš udovoljava zakonskim i podzakonskim odredbama.**

Kako bi rizik izloženih djelatnika bio sveden na minimum, neophodno je da su izvori ionizirajućeg zračenja u ispravnom stanju. Radni okoliš mora udovoljavati propisanim uvjetima zaštite od ionizirajućeg zračenja. Utemeljenost druge hipoteze ispitat ćemo utvrđivanjem činjeničnog stanja.

## **7. PRIKAZ PRIMLJENIH DOZA ZRAČENJA PREMA VRSTI POSLOVA I RADNIH ZADATAKA**

Organizacijska struktura opće bolnice sadrži sljedeće ustrojstvene jedinice koje za obavljanje djelatnosti koriste izvore ionizirajućeg zračenja:

- Odjel za radiologiju,
- Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu,
- Služba za kirurgiju
  - Odjel za dječju kirurgiju,
  - Odjel za opću, plastičnu, rekonstrukcijsku i estetsku kirurgiju,
  - Odjel za abdominalnu kirurgiju,
  - Odjel za vaskularnu kirurgiju,
  - Odjel za ortopediju i traumatologiju,
- Odjel za urologiju,
- Odjel za ginekologiju i opstetriciju,
- Odjel centralne operacije i sterilizacije,
- Služba za internu medicinu,
  - Odjel za kardiologiju s koronarnom jedinicom.

U općoj bolnici zaposleni su doktori medicine ili specijalizanti različitih grana medicine, inženjeri medicinske radiologije, više i srednje medicinske sestre te ostalo medicinsko i nemedicinsko osoblje. Osobe koje rukuju rendgenskim uređajima imaju rizik u smislu ozračenja. Također, prethodno navedeni zaposlenici čija je nazočnost neophodna tijekom uporabe rendgenskog uređaja imaju rizik od ozračenja.

Opis vrste poslova i radnih zadataka najvećeg rizika u smislu ozračenja, u unutrašnjim organizacijskim jedinicama, tijekom rada u području izloženosti (izvan/unutar prostorije u kojoj se nalazi izvor ionizirajućeg zračenja) prikazan je na sljedeći način:

- Odjel za radiologiju:
  - Doktor medicine, radiolog asistira pri operativnim zahvatima, provodi dijaskopske pretrage s kontrastnim sredstvima (izvan prostorije) i urografije (unutar prostorije),
  - Doktor medicine, intervencijski radiolog provodi dijagnostičko-terapijske postupke uporabom rendgenskih uređaja kao što su angiografije, balon dilatacije krvnih žila itd., unutar prostorije,
  - Doktor medicine, specijalizant radiologije asistira radiologu pri dijagnostičko-terapijskim postupcima ili ih pod njegovim nadzorom provodi unutar prostorije,
  - Inženjer medicinske radiologije rukuje rendgenskim uređajima (unutar prostorije), pozicionira pacijenta, u postupcima intervencijske radiologije i koronografije upravlja rendgenskim uređajem unutar prostorije, tijekom selektivne angiografije izvan prostorije. Tijekom rada u operacijskoj sali rukuje rendgenskim uređajem i dijaskopira.
- Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu:
  - Doktor medicine, anesteziolog nadzire pacijenta tijekom operativnog zahvata, u prostoriji,
  - Doktor medicine, specijalizant anesteziologije pod nadzorom specijalista anesteziologije nadzire pacijenta tijekom operativnog zahvata, unutar prostorije,
  - Anesteziološki tehničar posluhuje anesteziologa i pacijenta, unutar prostorije.
- Služba za kirurgiju:
  - Doktor medicine, kirurg obavlja dijagnostičko-terapijske postupke, unutar prostorije,
  - Doktor medicine specijalizant kirurgije educira se i pod nadzorom obavlja dijagnostičko-terapijske postupke, unutar prostorije,
  - Medicinska sestra/tehničar asistira liječniku tijekom provođenja dijagnostičko-terapijskih postupaka, unutar prostorije.

- Odjel za urologiju:
  - Doktor medicine, urolog obavlja dijagnostičko-terapijske postupke, unutar prostorije,
  - Doktor medicine, specijalizant urologije educira se i pod nadzorom obavlja dijagnostičko-terapijske postupke, unutar prostorije,
  - Medicinska sestra/tehničar asistira liječniku tijekom provođenja dijagnostičko-terapijskih postupaka, dodaje instrumente, unutar prostorije.
- Odjel za ginekologiju i opstetriciju:
  - Doktor medicine, specijalist ginekolog obavlja dijagnostičko-terapijske postupke, unutar prostorije.
- Odjel centralne operacije i sterilizacije:
  - Medicinska sestra/tehničar, instrumentarka asistira liječniku u operacijama.
- Služba za internu medicinu:
  - Doktor medicine, specijalist internist obavlja koronografije, ugradnje elektrostimulatora srca (pacemaker), unutar prostorije.
  - Medicinska sestra/tehničar asistira liječniku tijekom koronografije i ugradnje elektrostimulatora srca, unutar prostorije.

Djelatnici Odjela za opće, pravne i kadrovske poslove zaposleni na radnom mjestu „nosača“, a koji tijekom rendgenskog pregleda pridržavaju bolesnike i druge osobe koje ne mogu samostalno ostati u potrebnom položaju za pregled, **ne smatraju** se izloženim radnicima. Navedeni djelatnici tijekom boravka u području izloženosti prilikom pridržavanja pacijenata koriste osobni dozimetar.

## 7.1. Odjel za radiologiju

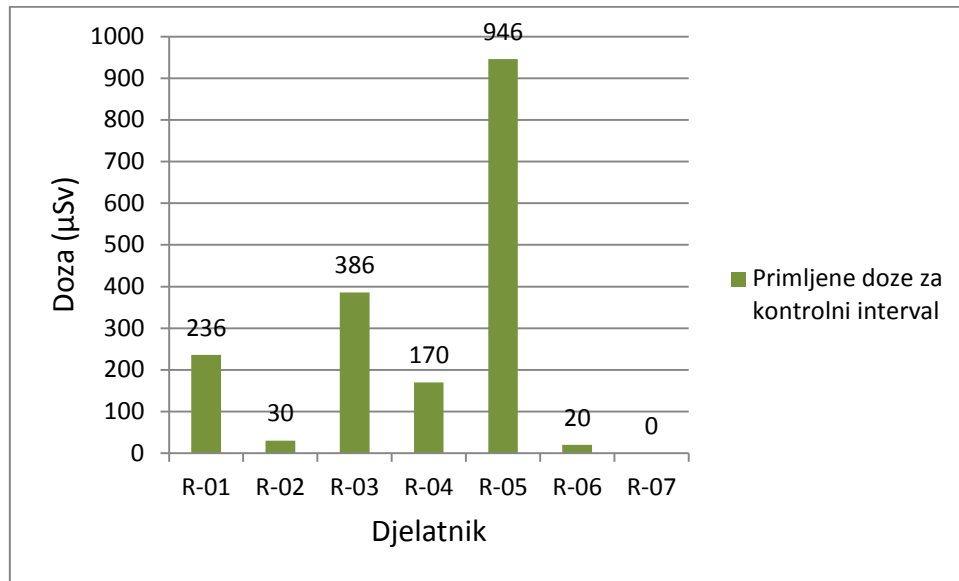
Tab. 1. Primljene doze za liječnike specijaliste radiologe

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
R-01	dr. med.	Ž	1473	100	10	126	0	0	236
R-02	dr. med.	M	0	30	-	-	-	0	30
R-03	dr. med.	M	880	270	30	0	0	86	386
R-04	dr. med.	Ž	1670	40	130	0	0	0	170
R-05	dr. med.	M	970	700	20	226	0	0	946
R-06	dr. med.	Ž	300	20	-	-	0	0	20
R-07	dr. med.	Ž	50	-	-	0	0	0	0

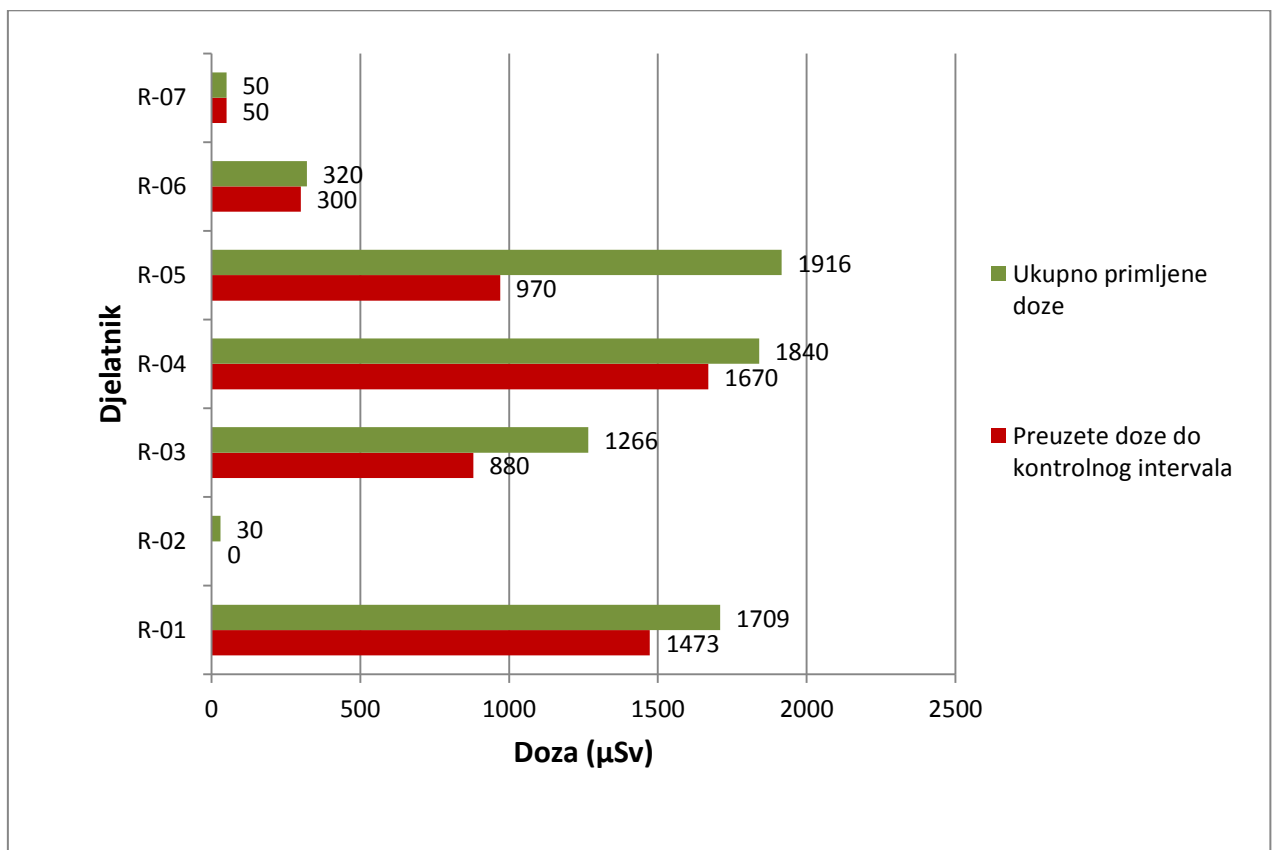
Tab. 2. Prilježene doze za inženjere medicinske radiologije

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Prilježene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno prilježena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
R-08	ing. med. rad.	Ž	1670	50	10	0	0	0	60
R-09	ing. med. rad.	Ž	970	60	30	0	147	164	401
R-10	ing. med. rad.	M	830	50	10	0	0	0	60
R-11	ing. med. rad.	Ž	1331	220	10	0	0	0	230
R-12	ing. med. rad.	M	180	50	10	0	0	0	60
R-13	ing. med. rad.	M	1577	80	20	0	0	0	100
R-14	ing. med. rad.	Ž	1280	40	10	0	0	0	50
R-15	ing. med. rad.	M	970	170	20	182	0	0	372
R-16	ing. med. rad.	M	1380	130	30	0	0	0	160
R-17	ing. med. rad.	M	0	-	-	-	-	120	120
R-18	ing. med. rad.	Ž	2410	180	10	0	0	0	190
R-19	ing. med. rad.	Ž	1710	60	10	0	0	0	70
R-20	ing. med. rad.	M	1840	140	20	0	0	0	160
R-21	ing. med. rad.	Ž	3110	170	20	0	0	0	190
R-22	ing. med. rad.	M	720	90	10	0	0	0	100
R-23	ing. med. rad.	Ž	1670	30	10	0	0	0	40
R-24	ing. med. rad.	M	1220	110	20	0	99	123	352
R-25	ing. med. rad.	Ž	1810	80	10	0	0	0	90

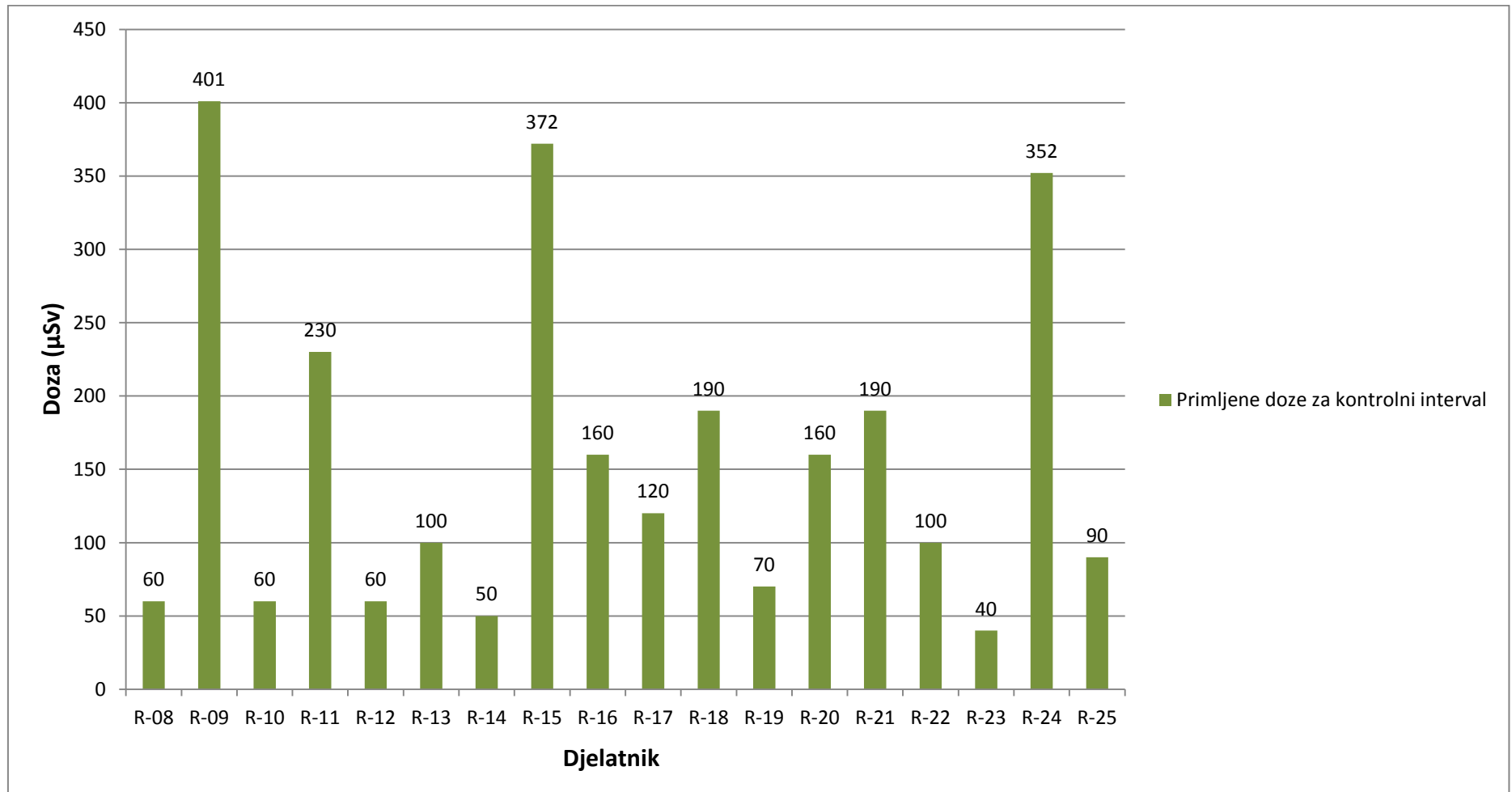
Grafikon 1. Primljene doze za liječnike specijaliste radiologe



Grafikon 2. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste radiologe

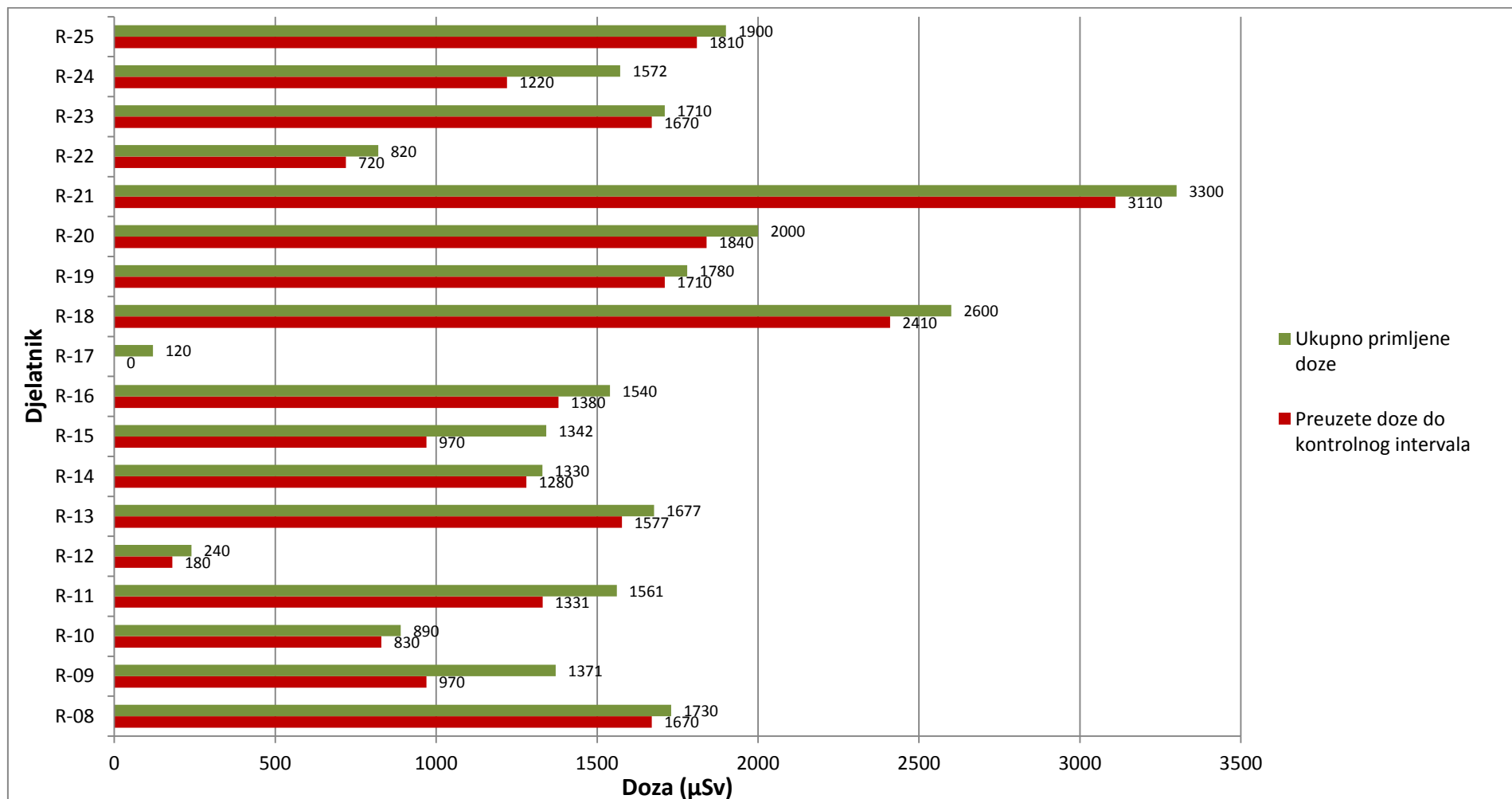


Grafikon 3. Primljene doze za inženjere medicinske radiologije





Grafikon 4. Preuzete doze i ukupno primljene doze za inženjere medicinske radiologije

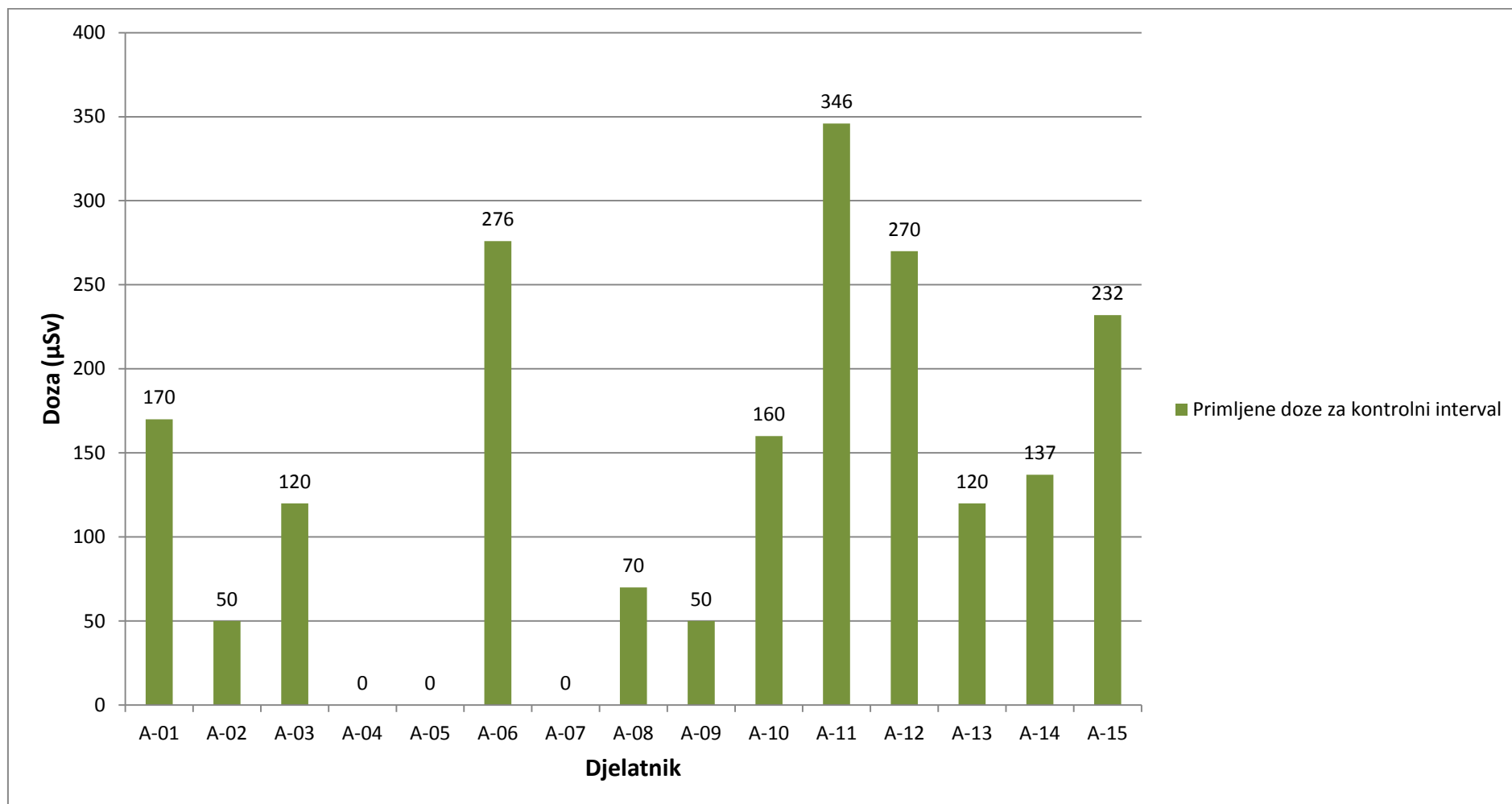


## 7.2. Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu

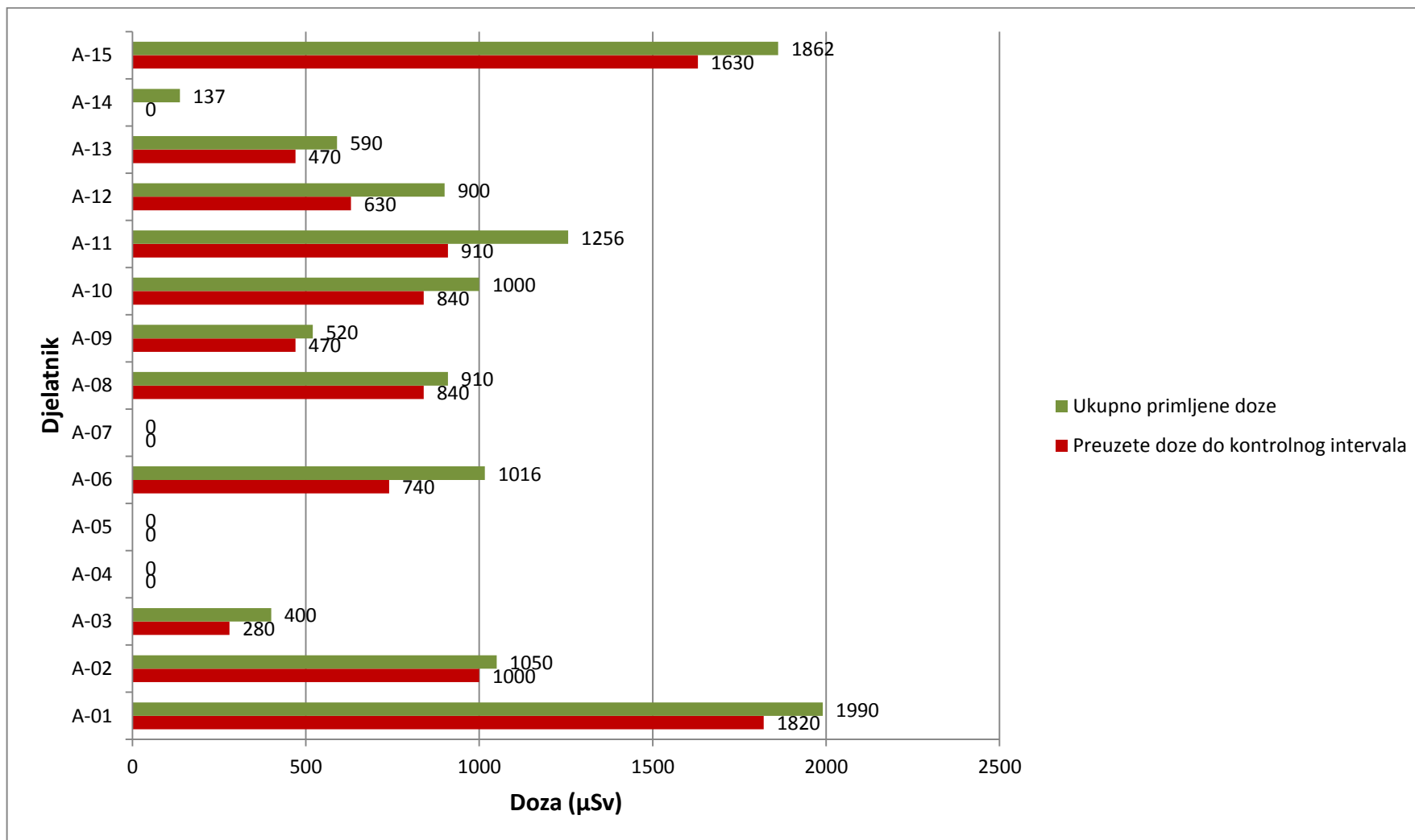
Tab. 3. Primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
A-01	dr. med.	M	1820	130	40	0	0	0	170
A-02	dr. med.	M	1000	30	20	0	0	0	50
A-03	dr. med.	Ž	280	100	20	-	0	0	120
A-04	dr. med.	Ž	-	-	-	-	-	0	0
A-05	dr.med.	Ž	-	-	0	0	0	0	0
A-06	dr. med.	Ž	740	40	20	0	0	216	276
A-07	dr. med.	Ž	-	-	-	0	0	0	0
A-08	dr. med.	Ž	840	60	10	0	0	0	70
A-09	dr. med.	Ž	470	40	10	0	0	0	50
A-10	dr.med.	M	840	140	20	0	0	0	160
A-11	dr. med.	Ž	910	90	160	0	0	96	346
A-12	dr.med.	Ž	630	80	170	10	10	0	270
A-13	dr. med.	M	470	100	20	0	0	0	120
A-14	dr. med.	Ž	-	-	-	-	-	137	137
A-15	dr. med.	M	1630	90	20	0	122	0	232

Grafikon 5. Primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe



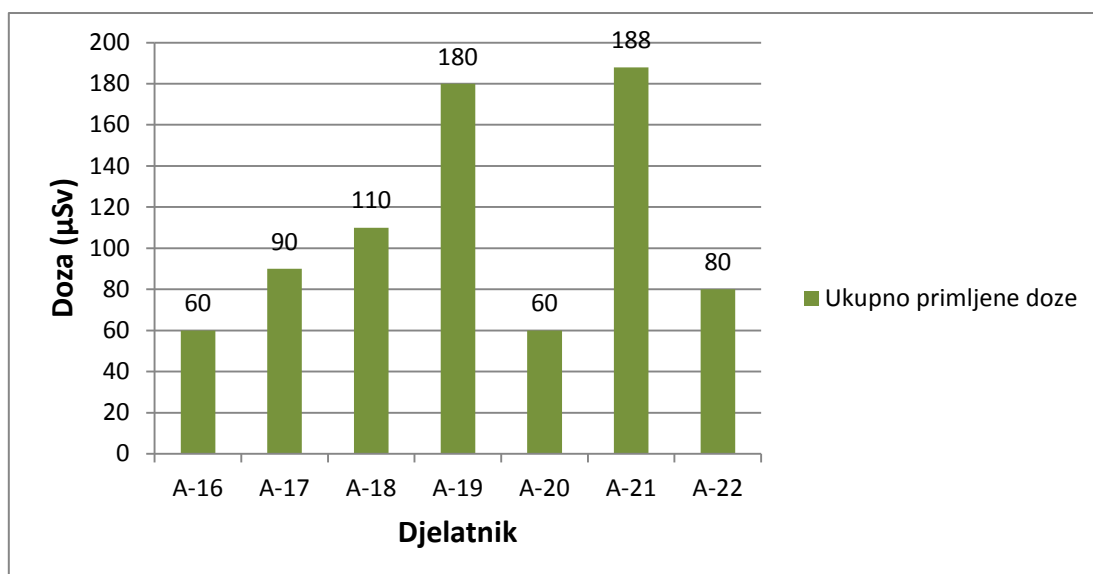
Grafikon 6. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe



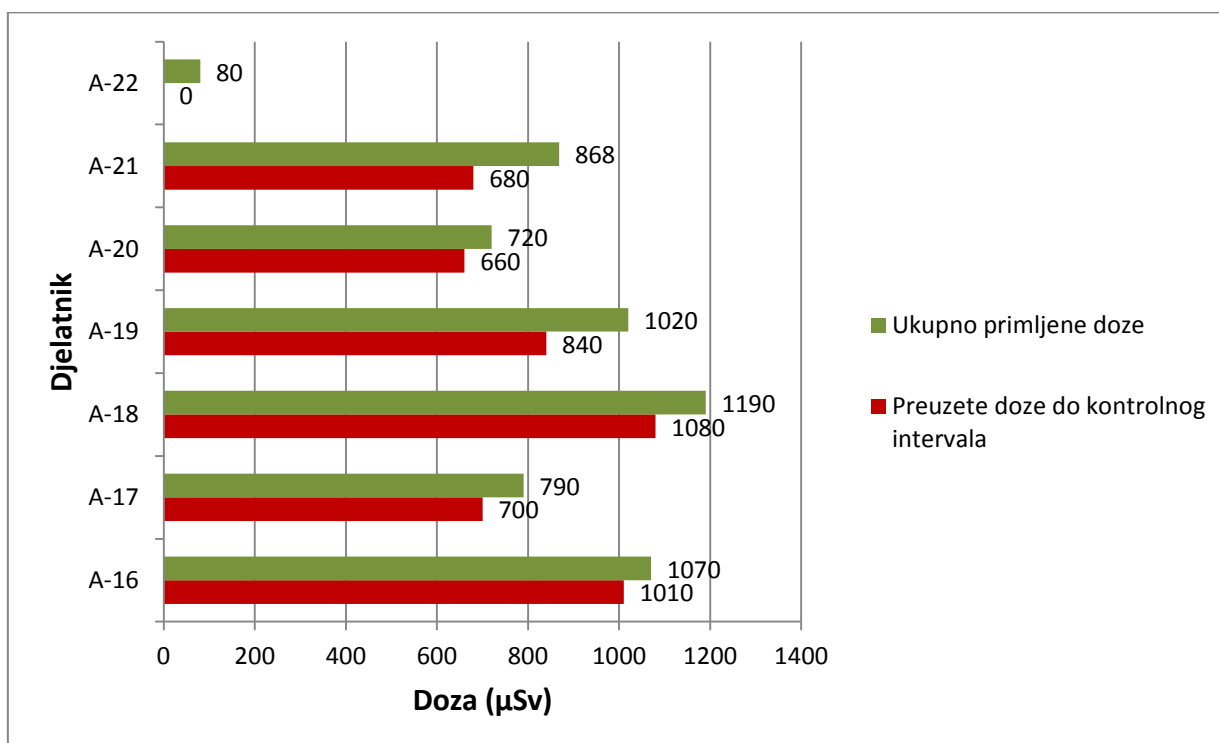
Tab. 4. Primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i jednog medicinskog tehničara anesteziologije

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
A-16	bacc. med. techn.	Ž	1010	40	20	0	0	0	60
A-17	med. sestra	Ž	700	70	20	0	0	0	90
A-18	bacc. med. techn.	Ž	1080	90	20	0	0	0	110
A-19	med. sestra	Ž	840	160	20	0	0	0	180
A-20	med. sestra	Ž	660	40	20	0	0	0	60
A-21	med. tehničar	M	680	50	20	118	0	0	188
A-22	bacc. med. techn.	Ž	0	60	20	0	0	0	80

Grafikon 7. Primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i medicinske tehničare anesteziologije



Grafikon 8. Preuzete doze i ukupno primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i medicinske tehničare anesteziologije



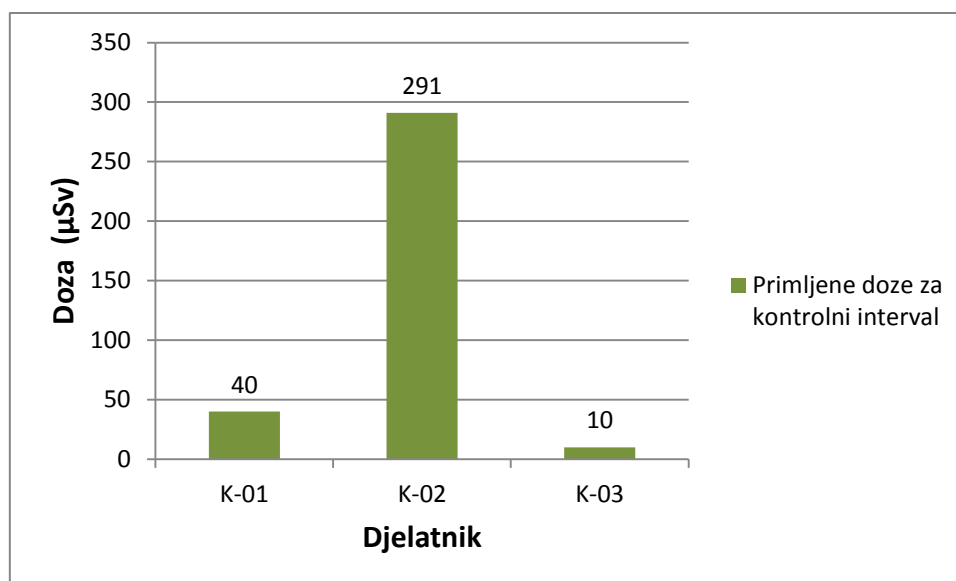
### 7.3. Služba za kirurgiju

Tab. 5. Primljene doze za liječnike specijaliste kirurge i jednu medicinsku sestru

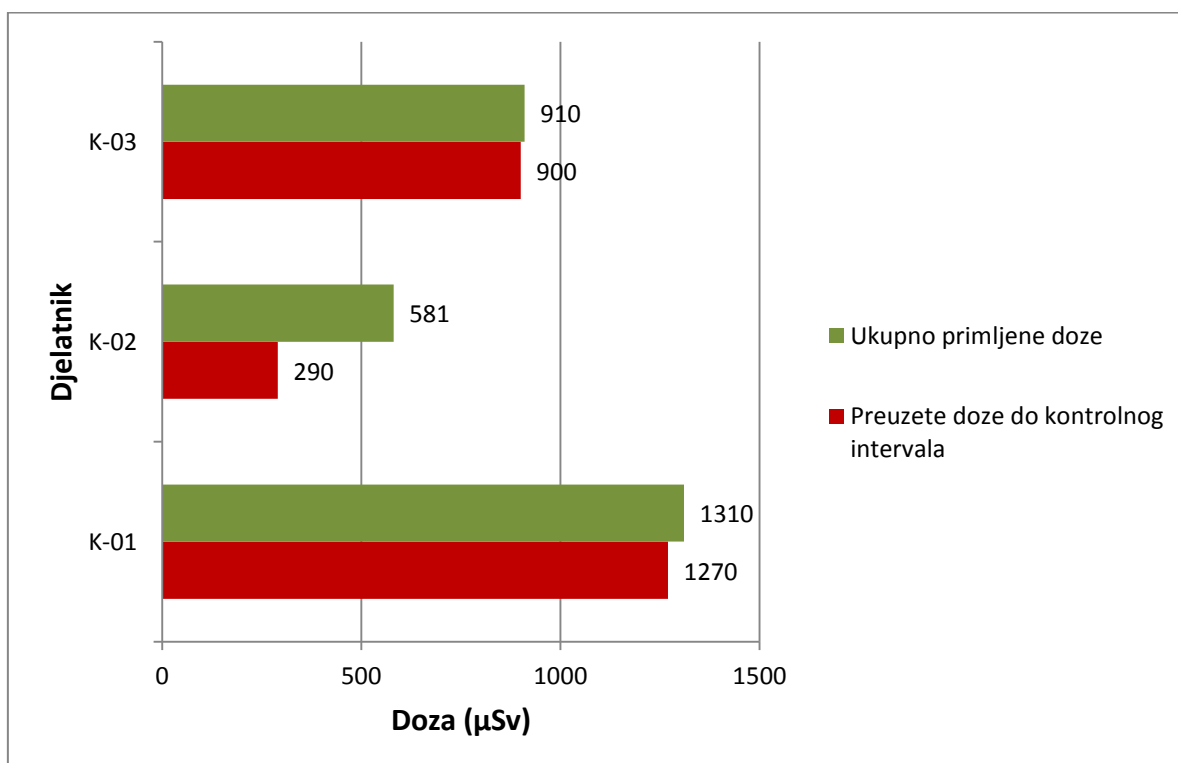
Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
K-01	dr. med.	M	1270	30	10	0	0	0	40
K-02	dr. med.	Ž	290	120	30	0	0	141	291
K-03	med. sestra	Ž	900	10	0	0	0	0	10
K-04	dr. med.	M	1360	60	40	0	202	0	302
K-05	dr. med.	M	-	-	-	-	-	0	0
K-06	dr. med.	M	0	0	80	0	0	0	80
K-07	dr. med.	M	-	-	-	-	0	0	0
K-08	dr. med.	M	-	-	-	-	0	156	156
K-09	dr. med.	M	10	70	20	0	0	0	90
K-10	dr. med.	M	1359	0	0	0	0	185	185
K-11	dr. med.	M	10	110	20	0	0	0	130
K-12	dr. med.	M	1110	70	10	0	0	0	80
K-13	dr. med.	M	-	-	-	-	-	0	0
K-14	dr. med.	M	-	-	-	-	0	301	301
K-15	dr. med.	M	-	-	40	0	0	0	40
K-16	dr. med.	M	1260	30	10	0	0	86	126
K-17	dr. med.	M	-	-	-	0	0	0	0
K-18	dr. med.	M	0	130	20	0	0	0	150
K-19	dr. med.	M	2343	250	20	0	0	100	370
K-20	dr. med.	M	-	-	-	-	0	0	0
K-21	dr. med.	M	0	50	10	0	0	0	60
K-22	dr. med.	Ž	901	20	10	0	0	111	141
K-23	dr. med.	M	120	30	10	0	0	185	225
K-24	dr. med.	M	1420	80	0	0	0	0	80
K-25	dr. med.	M	983	20	0	0	0	0	20
K-26	dr. med.	M	-	-	-	-	-	0	0

Napomena: svaka nijansa boje predstavlja različite odjele Službe za kirurgiju: Odjel za dječju kirurgiju, Odjel za opću, plastičnu i estetsku kirurgiju, Odjel za abdominalnu kirurgiju, Odjel za vaskularnu kirurgiju i Odjel za ortopediju i traumatologiju.

Grafikon 9. Primljene doze za liječnike specijaliste dječje kirurgije i jednu medicinsku sestru

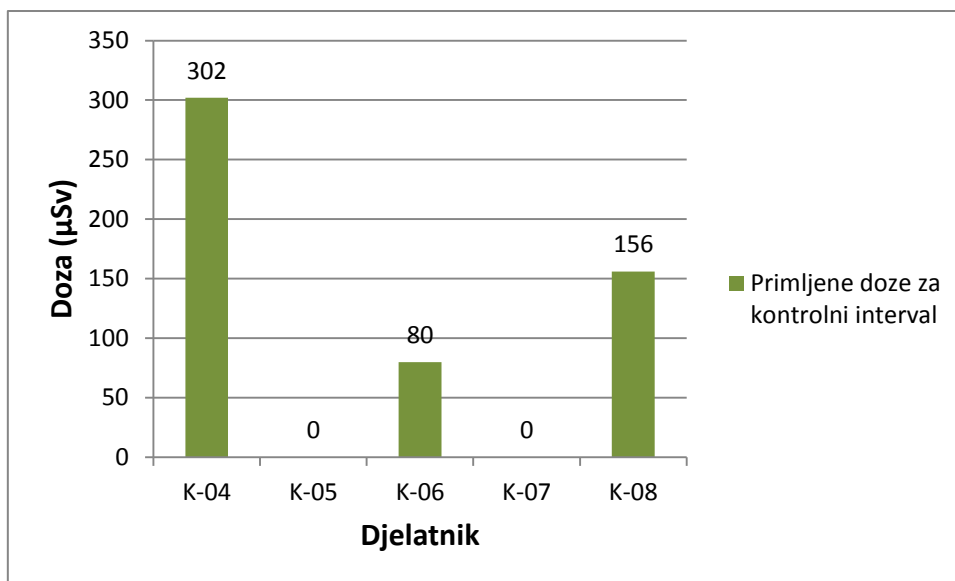


Grafikon 10. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste dječje kirurgije i jednu medicinsku sestru

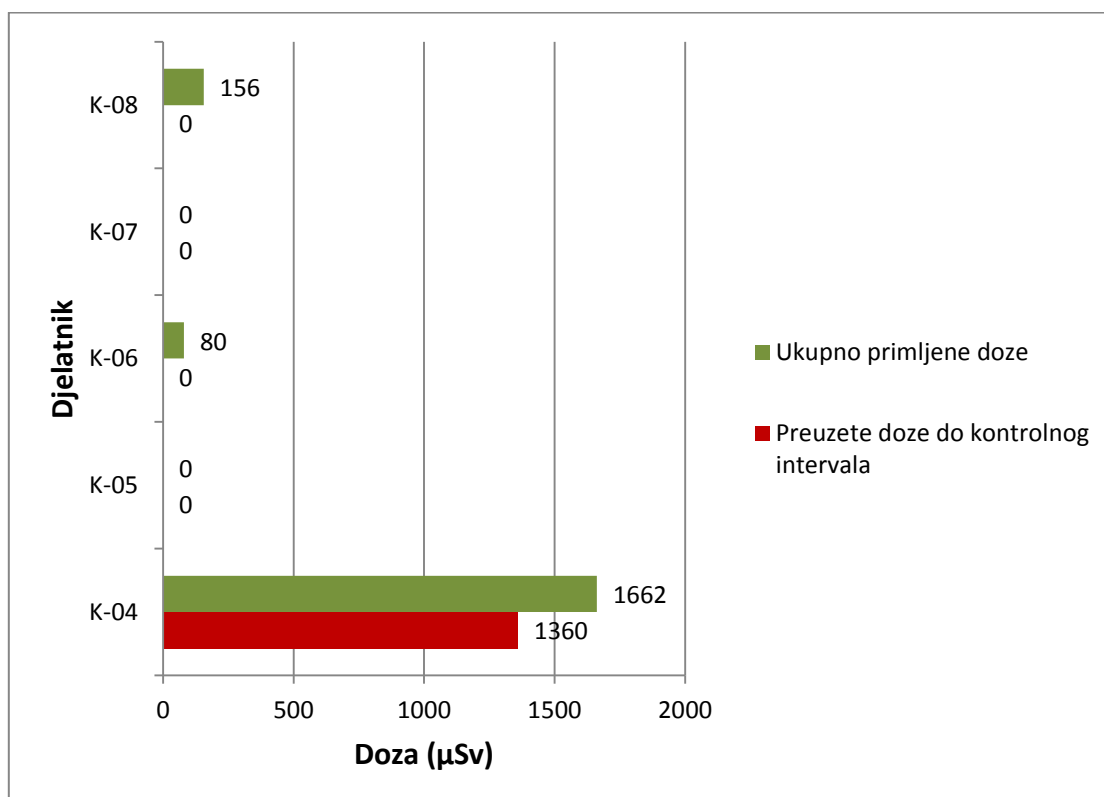




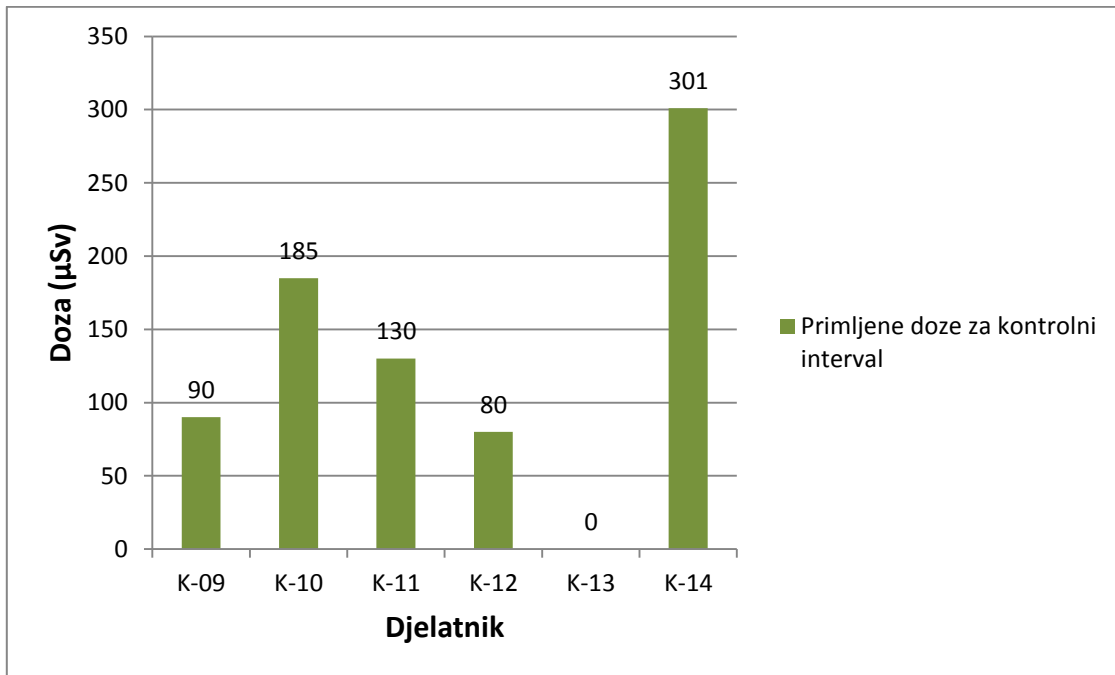
Grafikon 11. Primljene doze za liječnike specijaliste opće, plastične i estetske kirurgije



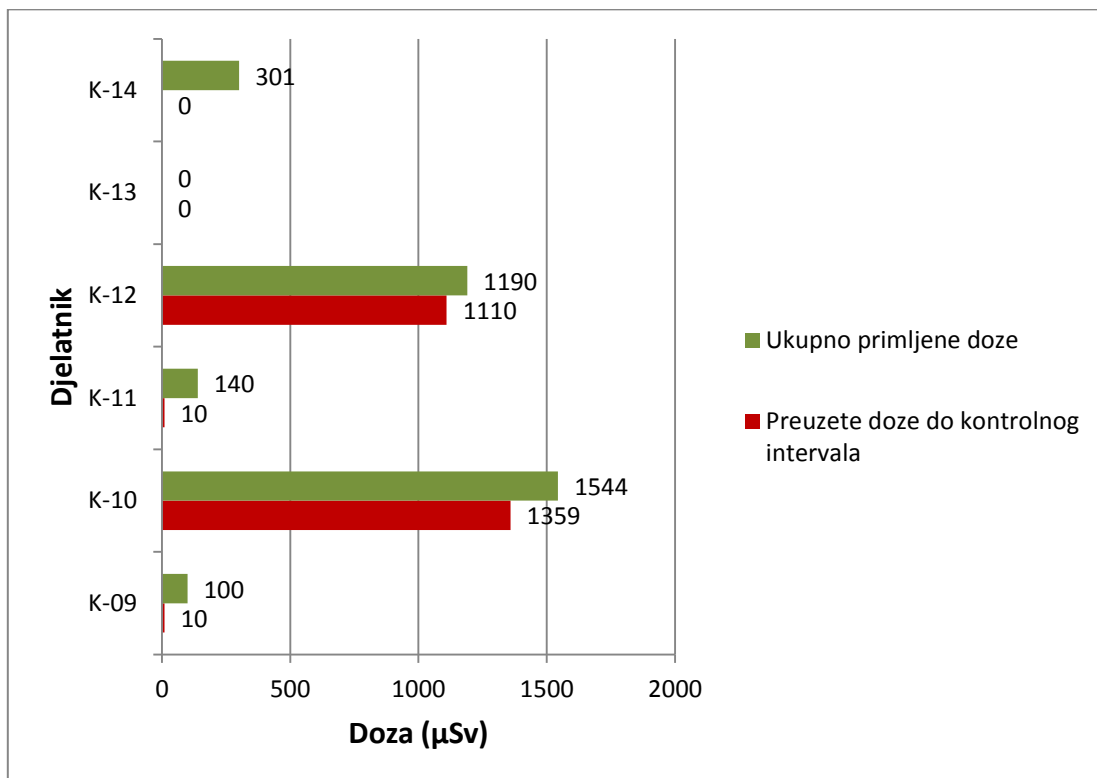
Grafikon 12. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste opće, plastične i estetske kirurgije



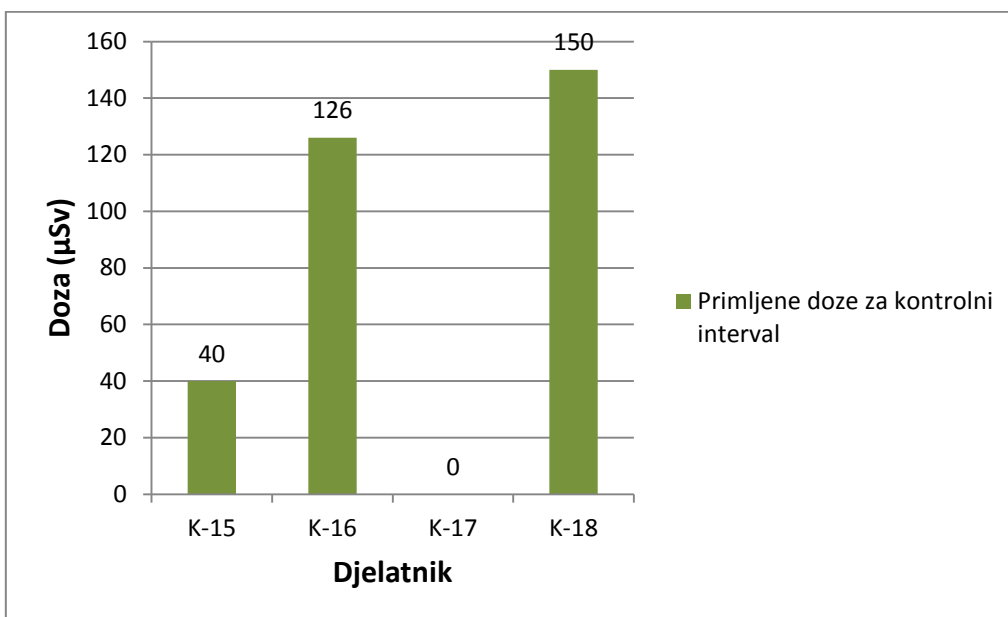
Grafikon 13. Primljene doze za liječnike specijaliste abdominalne kirurgije



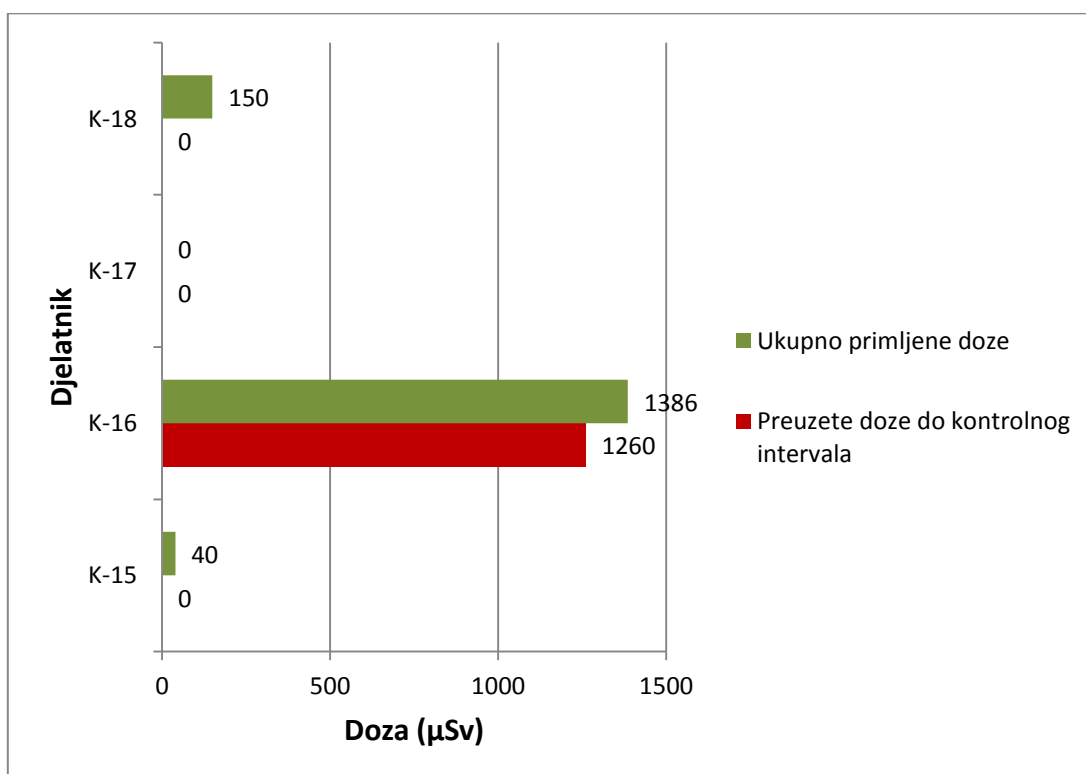
Grafikon 14. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste abdominalne kirurgije



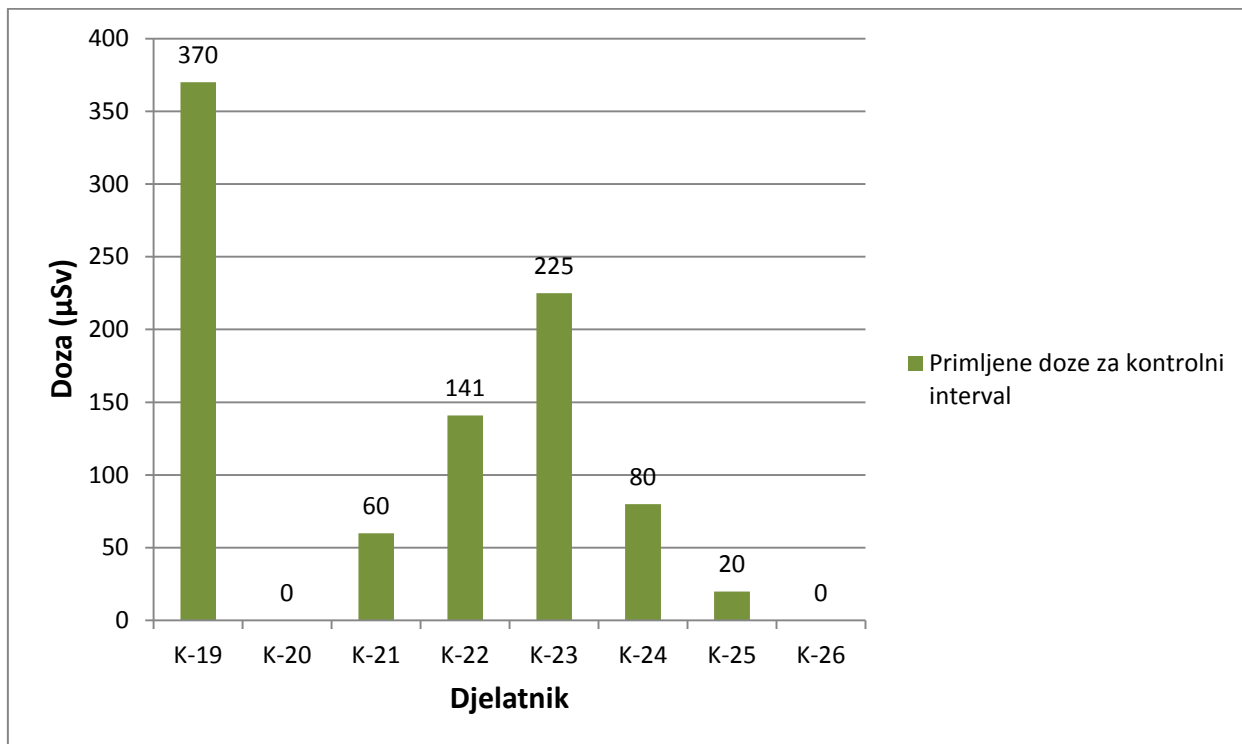
Grafikon 15. Primljene doze za liječnike specijaliste vaskularne kirurgije



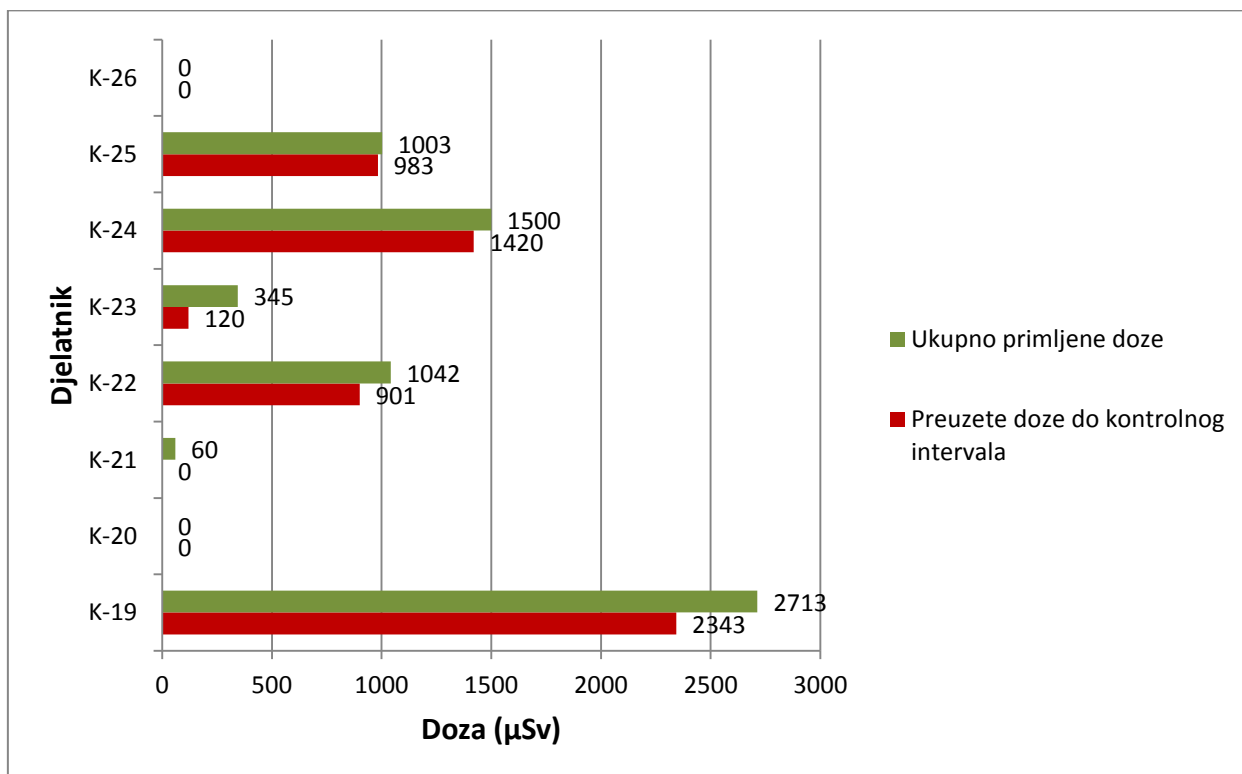
Grafikon 16. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste vaskularne kirurgije



Grafikon 17. Primljene doze za liječnike specijaliste ortopedije i traumatologije



Grafikon 18. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste ortopedije i traumatologije

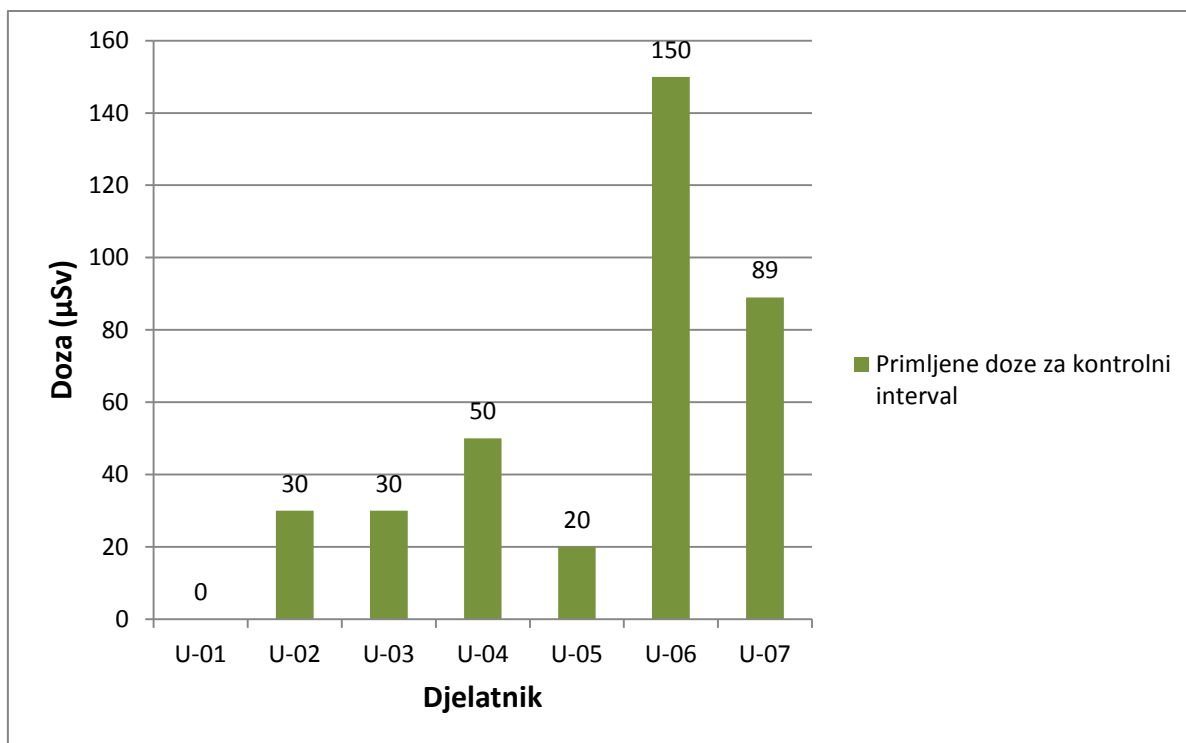


## 7.4. Odjel za urologiju

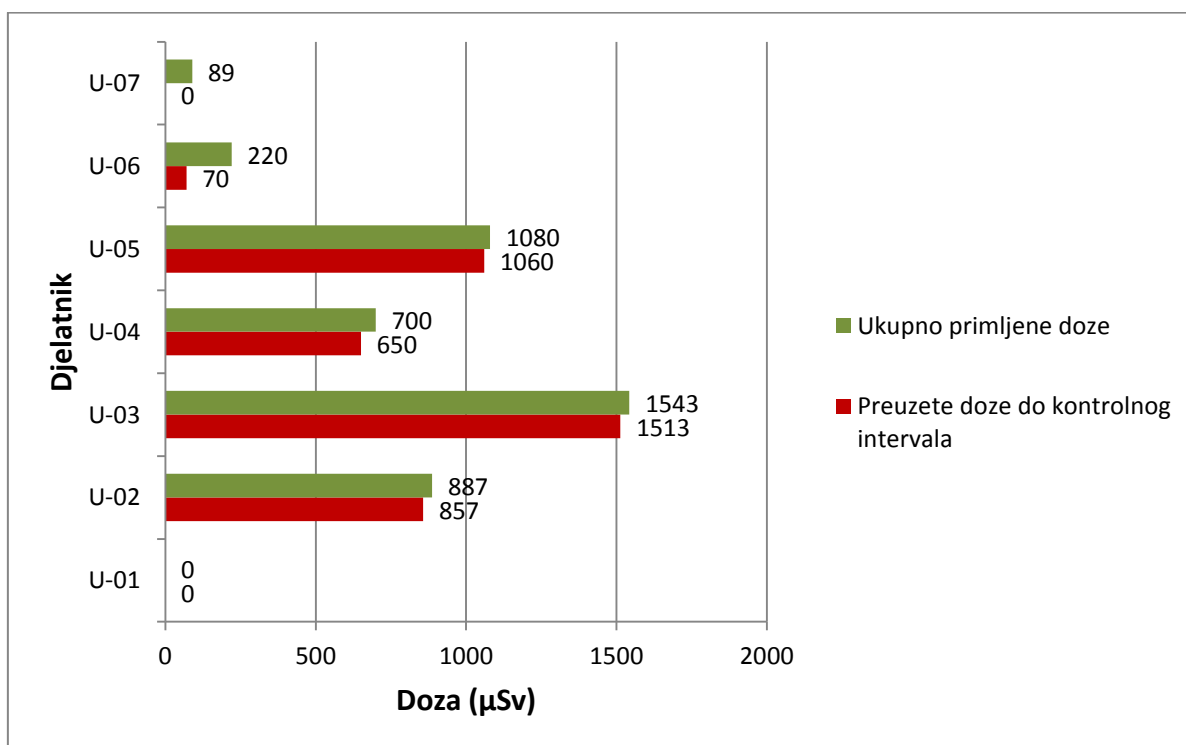
Tab. 6. Primljene doze za liječnike specijaliste urologije i više medicinske sestre

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
U-01	dr. med.	M	-	-	-	0	0	0	0
U-02	dr. med.	M	857	20	10	0	0	0	30
U-03	bacc. med. techn.	Ž	1513	20	10	0	0	0	30
U-04	bacc. med. techn.	Ž	650	40	10	0	0	0	50
U-05	dr. med.	M	1060	20	0	0	0	0	20
U-06	dr. med.	Ž	70	30	120	0	0	0	150
U-07	dr. med.	Ž	-	-	-	-	-	89	89

Grafikon 19. Primljene doze za liječnike specijaliste urologe i više medicinske sestre



Grafikon 20. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste urologe i više medicinske sestre

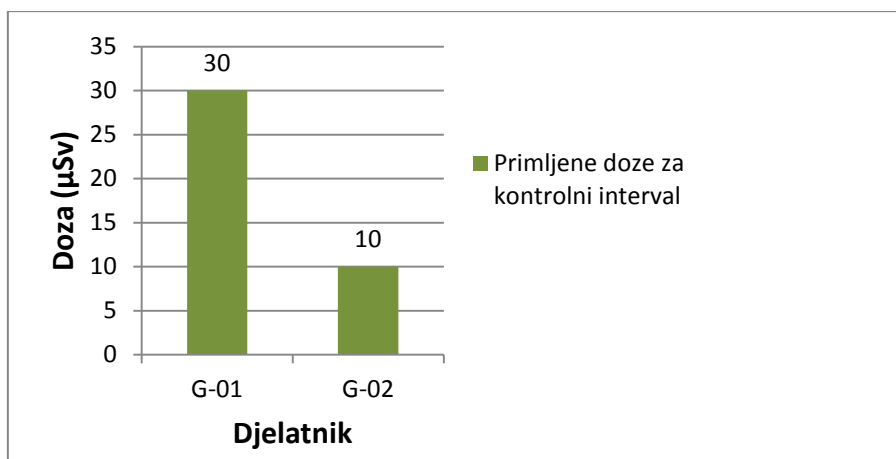


## 7.5. Odjel za ginekologiju i opstetriciju

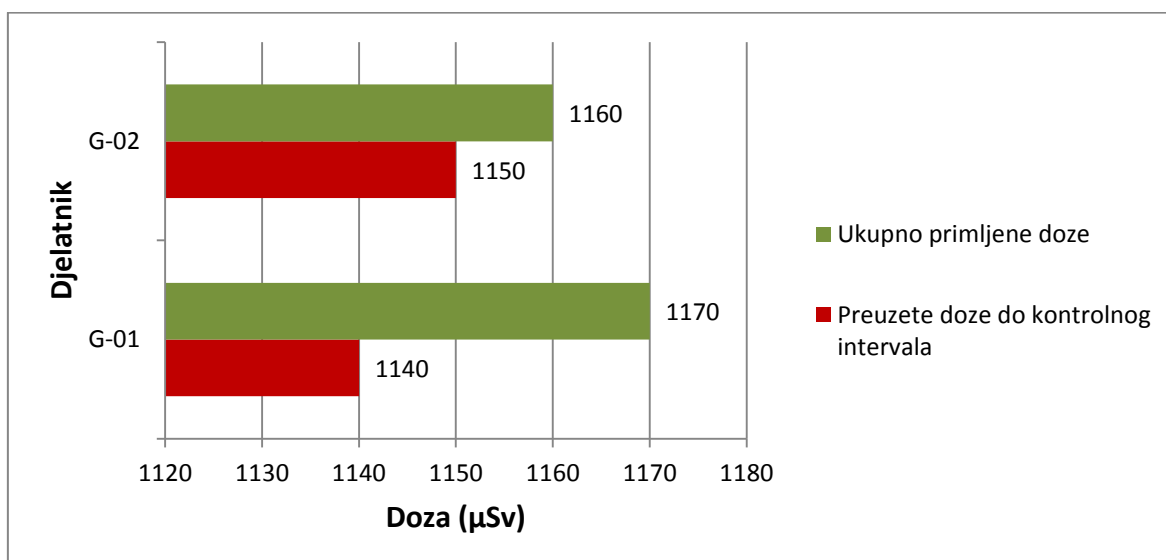
Tab. 7. Primljene doze za liječnike specijaliste ginekologije i opstetricije

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
G-01	dr. med.	Ž	1140	30	0	0	0	0	30
G-02	dr. med.	M	1150	10	0	0	0	0	10

Grafikon 21. Primljene doze za liječnike specijaliste ginekologije i opstetricije



Grafikon 22. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste ginekologije i opstetricije



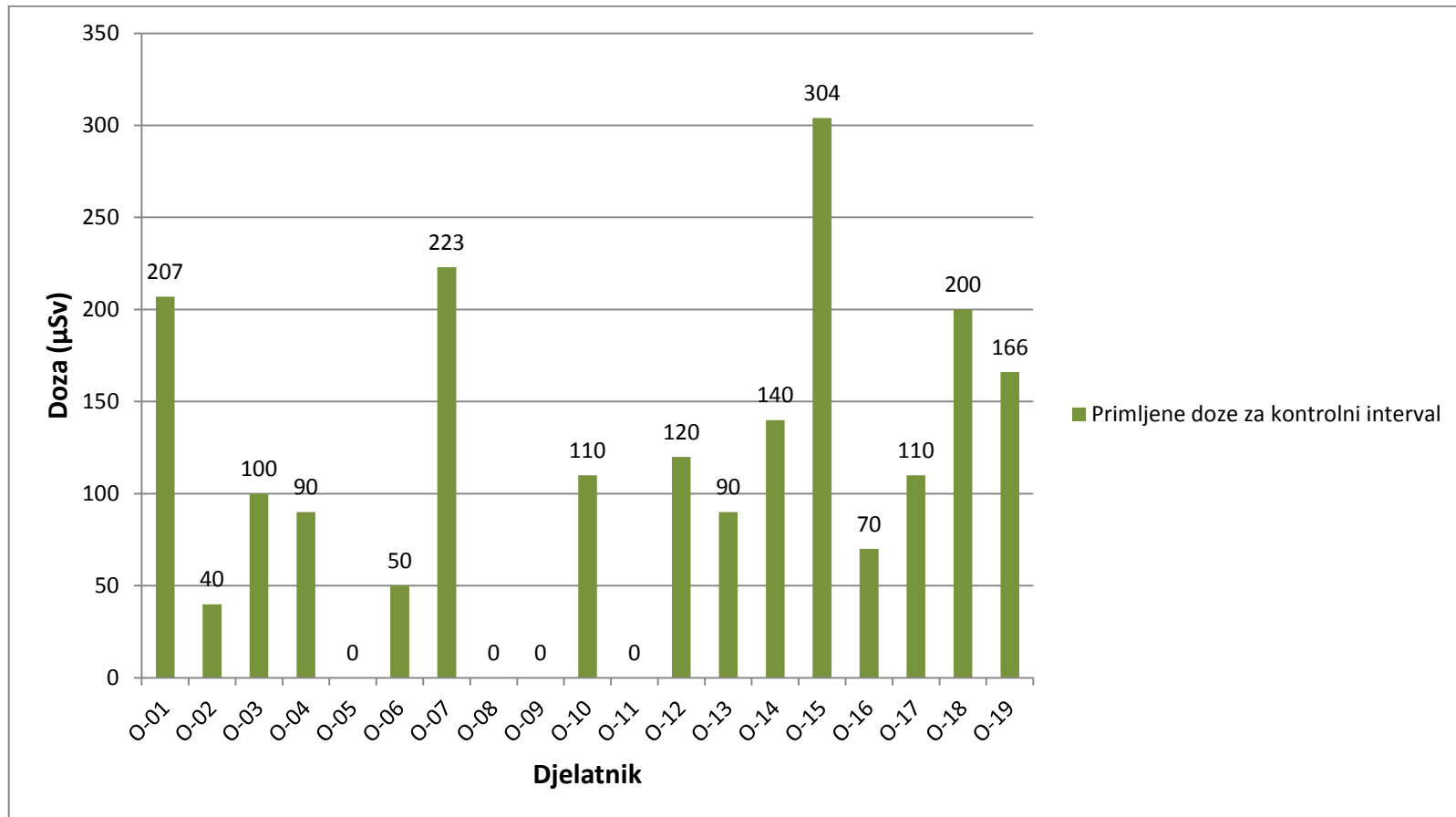
## 7.6. Odjel centralne operacije i sterilizacije

Tab. 8. Prilježene doze za medicinske sestre i jednog medicinskog tehničara

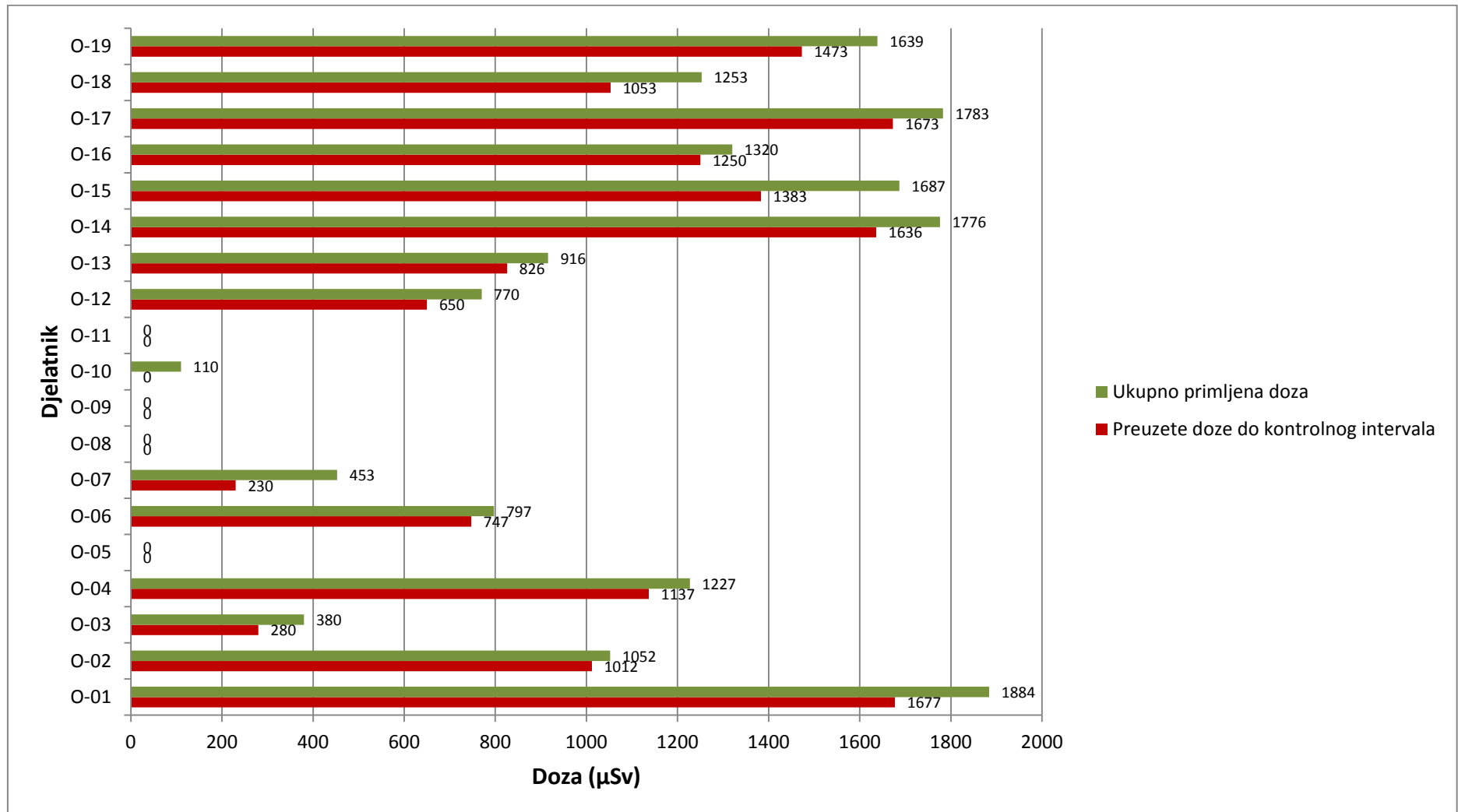
Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Prilježene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno prilježena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
O-01	med. sestra	Ž	1677	70	20	0	0	117	207
O-02	med. sestra	Ž	1012	20	20	0	0	0	40
O-03	med. sestra	Ž	280	90	10	0	-	0	100
O-04	med. sestra	Ž	1137	70	20	0	0	0	90
O-05	med. sestra	Ž	-	-	-	0	0	0	0
O-06	med. sestra	Ž	747	30	20	0	0	0	50
O-07	med. sestra	Ž	230	60	20	0	0	143	223
O-08	med. sestra	Ž	-	-	-	-	-	0	0
O-09	med. sestra	Ž	-	-	-	-	-	0	0
O-10	med. sestra	Ž	0	90	20	0	0	0	110
O-11	med. sestra	Ž	-	-	-	0	0	0	0
O-12	med. sestra	Ž	650	100	20	0	0	0	120
O-13	med. sestra	Ž	826	60	30	0	0	0	90
O-14	med. sestra	Ž	1636	130	10	0	0	0	140
O-15	med. sestra	Ž	1383	60	20	224	0	0	304
O-16	med. sestra	Ž	1250	50	20	0	0	0	70
O-17	med. tehničar	M	1673	100	10	0	0	0	110
O-18	med. sestra	Ž	1053	70	130	0	0	0	200
O-19	med. sestra	Ž	1473	60	20	0	0	86	166



Grafikon 23. Primljene doze za medicinske sestre i jednog medicinskog tehničar



Grafikon 24. Preuzete doze i ukupno primljene doze za medicinske sestre i jednog medicinskog tehničara

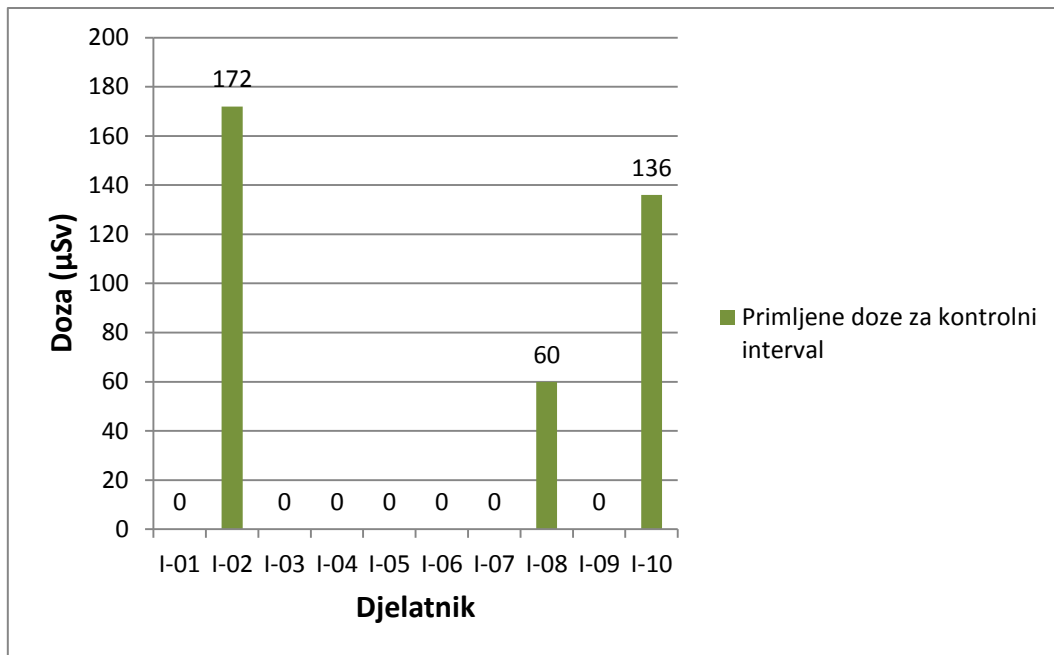


## 7.7. Služba za internu medicinu – Odjel za kardiologiju s koronarnom jedinicom

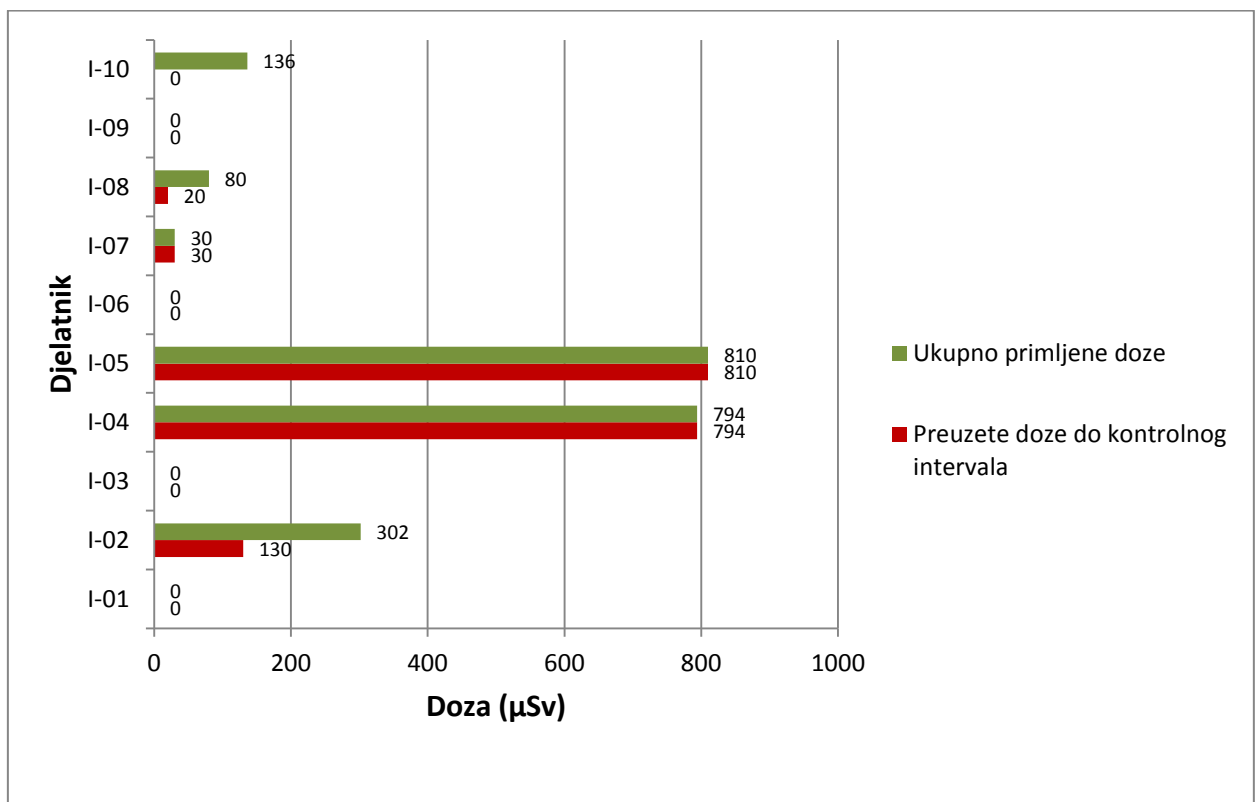
Tab. 9. Primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre

Djelatnik	Zanimanje	Spol	Preuzeta doza u $\mu\text{Sv}$ za razdoblje (01/00 - 12/10)	Primljene godišnje doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval (1/11 - 12/15)					Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval
				2011	2012	2013	2014	2015	
I-01	dr. med.	M	-	-	-	-	-	0	0
I-02	dr. med.	M	130	60	0	0	0	112	172
I-03	med. sestra	Ž	-	-	-	0	0	0	0
I-04	bacc. med. techn.	Ž	794	0	0	0	0	0	0
I-05	dr. med.	M	810	0	0	0	0	0	0
I-06	dr. med.	Ž	-	-	-	-	-	0	0
I-07	dr. med.	M	30	0	0	0	0	0	0
I-08	dr. med.	Ž	20	60	0	0	0	0	60
I-09	med. sestra	Ž	-	-	-	0	0	0	0
I-10	bacc. med. techn.	Ž	0	0	0	0	0	136	136

Grafikon 25. Primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre



Grafikon 26. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre

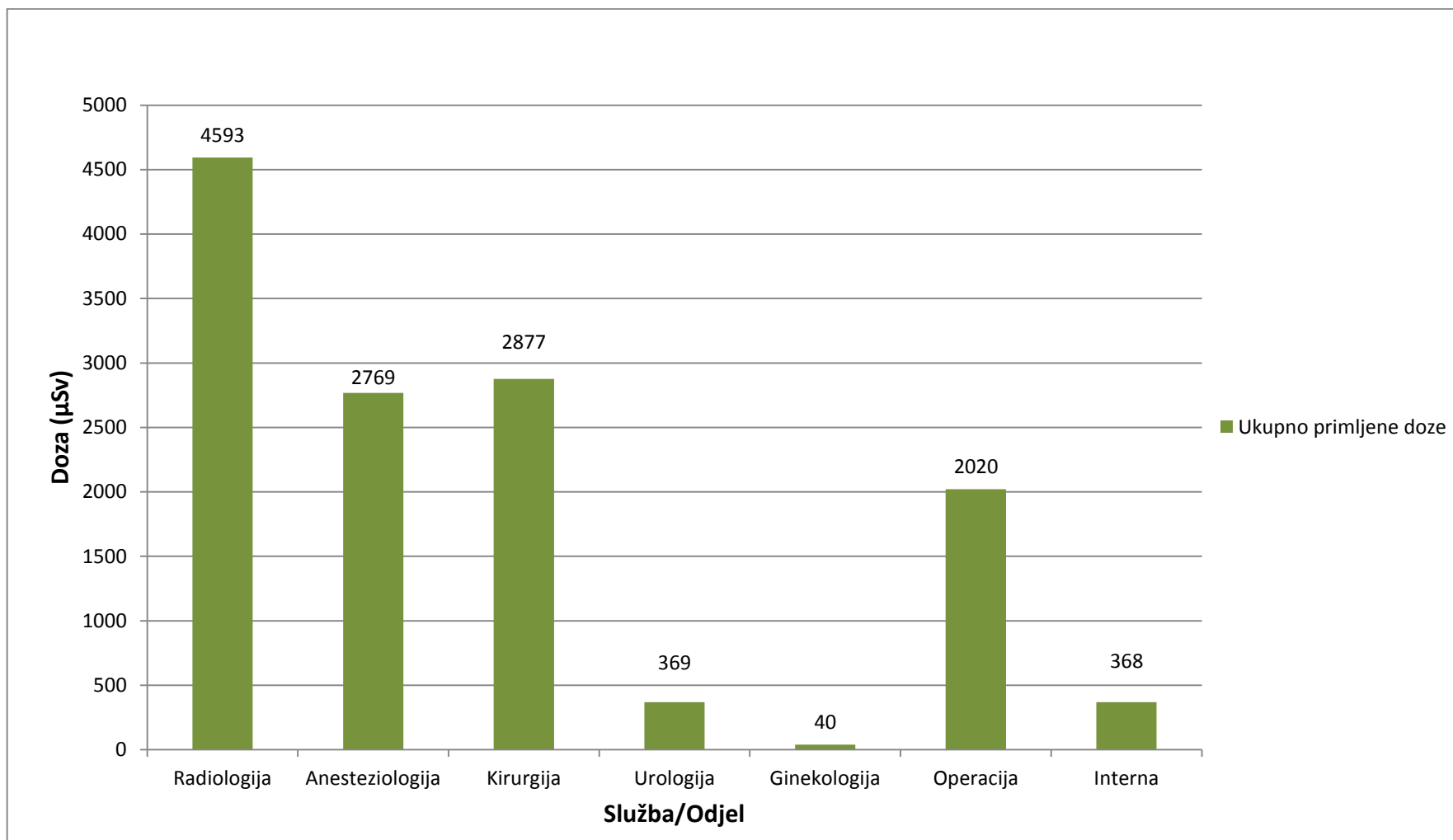


## 8. ZAJEDNIČKI POKAZATELJI OPĆE BOLNICE

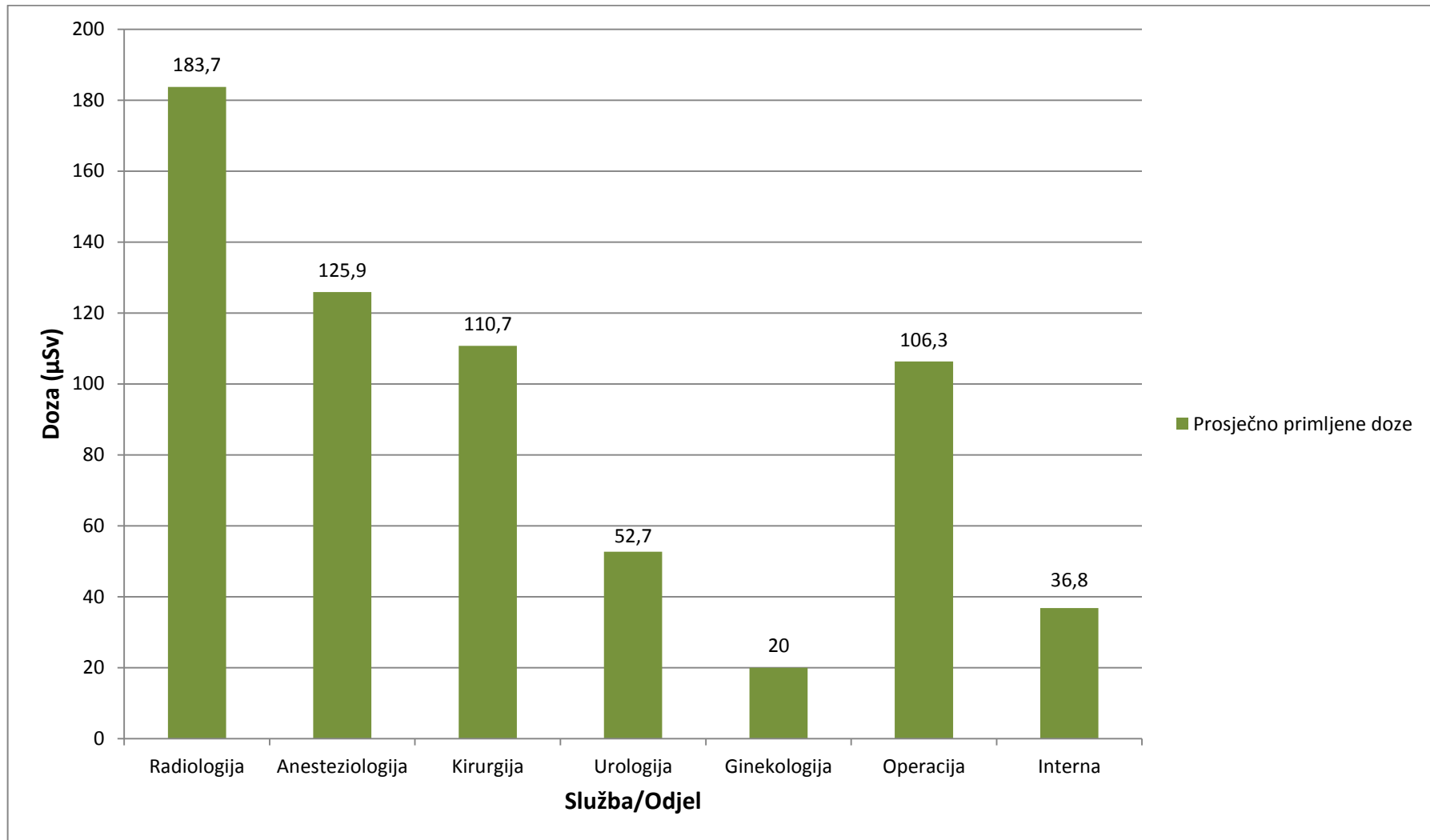
Tab. 10. Usporedba glavnih zajedničkih pokazatelja opće bolnice

R.B.	Služba/Odjel	Broj djelatnika u sferi ionizirajućeg zračenja	Ukupno primljena doza u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval	Prosjek za sve djelatnike u službi/odjelu	Ukupno primljene doze u $\mu\text{Sv}$ za kontrolni interval po zanimanju i spolu								
					dr. med.	M	Ž	ing. med. rad.	M	Ž	bacc. med. techn., med. sestra, med. tehničar	M	Ž
1.	Radiologija	25	4593	183,7	1788/7	3	4	2805/18	9	9	-	-	-
2.	Anesteziologija	22	2769	125,9	2001/15	5	10	-	-	-	768/7	1	6
3.	Kirurgija	26	2877	110,7	2867/25	23	2	-	-	-	10/1	0	1
4.	Urologija	7	369	52,7	289/5	3	2	-	-	-	80/2	0	2
5.	Ginekologija	2	40	20	40/2	1	1	-	-	-	-	-	-
6.	Operacija	19	2020	106,3	-	-	-	-	-	-	2020/19	1	18
7.	Interna	10	368	36,8	232/6	4	2	-	-	-	136/4	0	4
<b>Ukupno</b>		<b>111</b>	<b>13036</b>	<b>90,9</b>	<b>7217/60</b>	<b>39</b>	<b>21</b>	<b>2805/18</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>3014/33</b>	<b>2</b>	<b>31</b>

Grafikon 27. Ukupno primljene doze po službama i odjelima za kontrolni interval



Grafikon 28. Prosječno primljene doze za svakog izloženog djelatnika po službama i odjelima



## **9. ISPITIVANJE RENDGEN UREĐAJA I RADNOG OKOLIŠA S UTVRĐIVANJEM ČINJENIČNOG STANJA U SMISLU SIGURNOSTI**

Opća bolnica sastoji se od tri samostojeća objekta naziva Bolnica I, Bolnica II i Poliklinika. Bolnica II i Poliklinika međusobno su povezani objekti.

Rendgenski uređaji su električni uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje samo tijekom ekspozicije.

### **9.1. RTG uređaj POLYMOBIL 2**

Pokretni rendgenski uređaj POLYMOBIL 2 pripada Odjelu za radiologiju. Koristi se u prostorima Odjela za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu na V katu objekta Bolnice II – stacionarni dio. Tijekom rada rendgenske cijevi, prostorija u kojoj se provodi snimanje rendgenskim uređajem smatra se područjem nadgledanja. Rendgenski uređaj se uključuje izvan prostorije u kojoj se koristi uporabom upravljačkog kabela s vremenskim prekidačem. Iznad se nalazi Služba za kirurgiju, Odjel centralne operacije i sterilizacije na VI katu, a ispod na IV katu Odjel za ortopediju i Odjel za vaskularnu kirurgiju.

Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da su prostorije u kojima se pokretni rendgenski uređaj koristi sagrađene na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granice područja izloženosti.



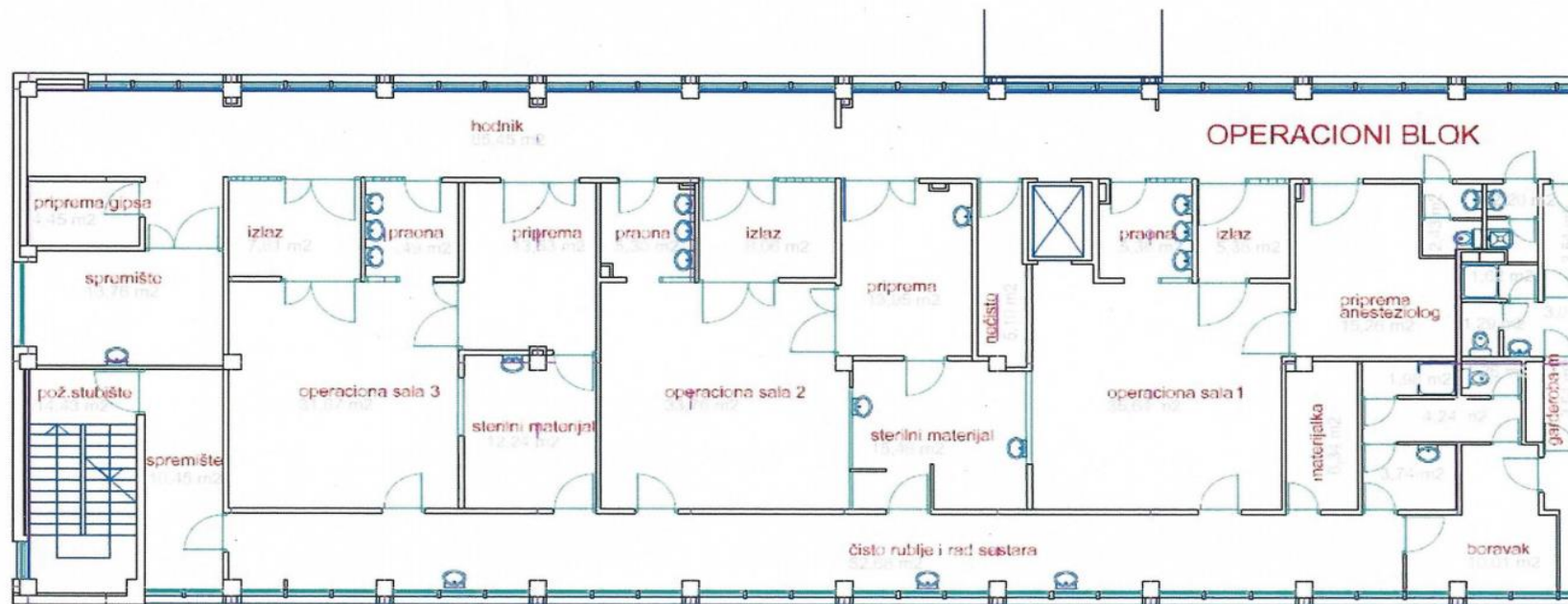
Tab. 11. RTG uređaj POLYMOBIL 2

Ev. br.:	527	Smještaj:	Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu, V kat - Bolnica II (stacionarni dio)	
Proizvođač	SIEMENS		God. proizvodnje	God. montaže
Model	POLYMOBIL 2		1985.	1992.
Ser. br.	-		Max. struja	Max. napon
Namjena	Slikanje		80 mA	90 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	-	Model	-	
Ser. br.	-	Ser. br.	02948 S 02	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

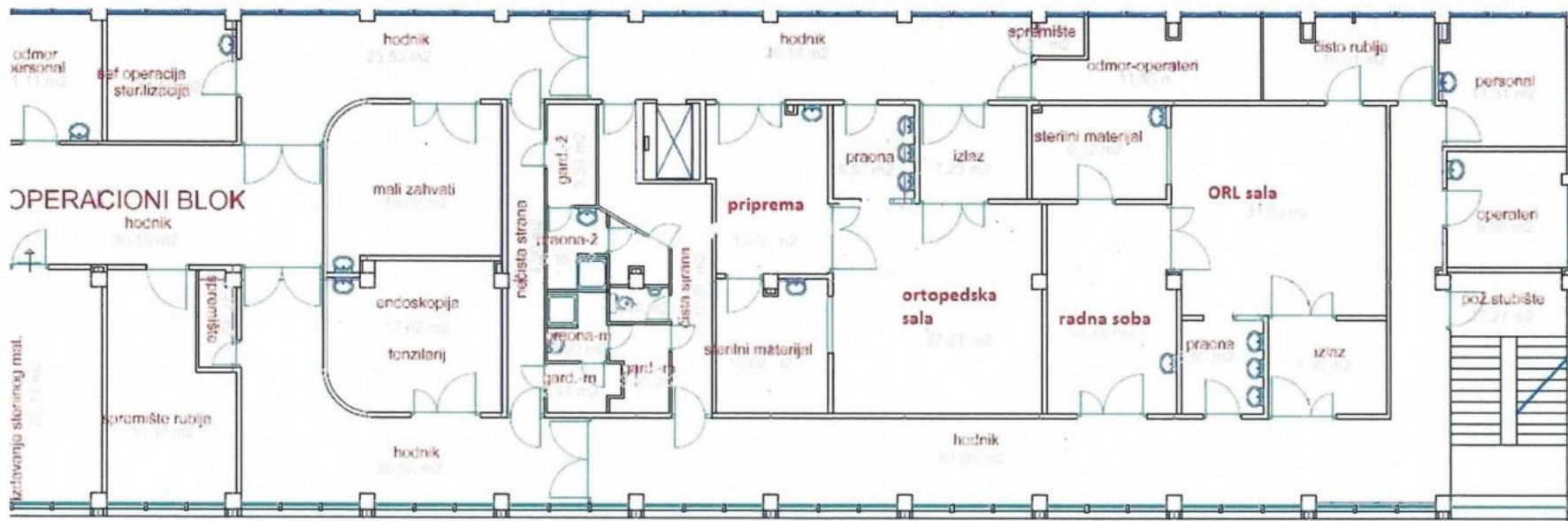
## 9.2. RTG uređaj OPESCOPE WHA-50N

Pokretni rendgenski uređaj za dijaskopiju i snimanje OPESCOPE WHA-50N pripada Odjelu za radiologiju. Uređaj je mobilan i koristi se u prostorima Odjela centralne operacije i sterilizacije, VI kat, objekt Bolnica II (stacionarni dio) te povremeno u operacijskim salama na istom katu. Navedeni rendgenski uređaj koristi se isključivo u operacijskim salama 1, 2 i 3 Odjela centralne operacije i sterilizacije te ORL sali i Ortopedskoj sali (slika 14 i 15). Navedene prostorije se tijekom rada rendgenske cijevi smatraju područjem nadgledanja. Rendgenski uređaj se uključuje izvan prostorije u kojoj se koristi uporabom upravljačkog kabela s vremenskim prekidačem.

Iznad operacijskih sala i susjednih prostorija nalaze se tavanski prostori, a ispod na V katu smješten je Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu. Susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da su prostorije u kojima se pokretni rendgenski uređaj koristi sagrađene na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granice područja izloženosti.



Sl. 14. Tlocrt objekta Bolnice II, VI kat lijevo, Službe za kirurgiju i Odjela centralne operacije i sterilizacije



Sl. 15. Tlocrt objekta Bolnice II, VI kat desno, Službe za kirurgiju i Odjela centralne operacije i sterilizacije

Tab. 12. RTG uređaj OPESCOPE WHA-50N

Ev. br.:	528	Smještaj:	Odjel centralne operacije i sterilizacije, VI kat, Bolnica II	
Proizvođač	Shimazu		God. proizvodnje	God. montaže
Model	OPESCOPE WHA-50N		1996.	1996.
Ser. br.	026590203		Max. struja	Max. napon
Namjena	Dijaskopija, slikanje		20 mA	125 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	-	Model	IA-9LD	
Ser. br.	-	Ser. br.	891398	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.3. RTG uređaj OPESCOPE PLENO WHA-200

Pokretni rendgenski uređaj za dijaskopiju i snimanje OPESCOPE PLENO WHA-200 pripada Odjelu za radiologiju. Koristi se u prostorima centralne operacije i sterilizacije, VI kat, objekt Bolnica II (slika 14 i 15) te povremeno u operacijskim salama Odjela za ortopediju i traumatologiju na istom katu. Navedeni rendgenski uređaj koristi se isključivo u operacijskim salama 1, 2 i 3 Odjela centralne operacije i sterilizacije te ORL sali i Ortopedskoj sali Odjela za ortopediju i traumatologiju. Navedene prostorije se tijekom rada rendgenske cijevi smatraju područjem nadgledanja. Rendgenski uređaj se uključuje izvan prostorije u kojoj se koristi uporabom upravljačkog kabela s vremenskim prekidačem.

Iznad operacijskih sala i susjednih prostorija nalaze se tavanski prostori, a ispod na V katu smješten je Odjel za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu. Susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da su prostorije u kojima se pokretni rendgenski uređaj koristi sagrađene na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granice područja izloženosti.

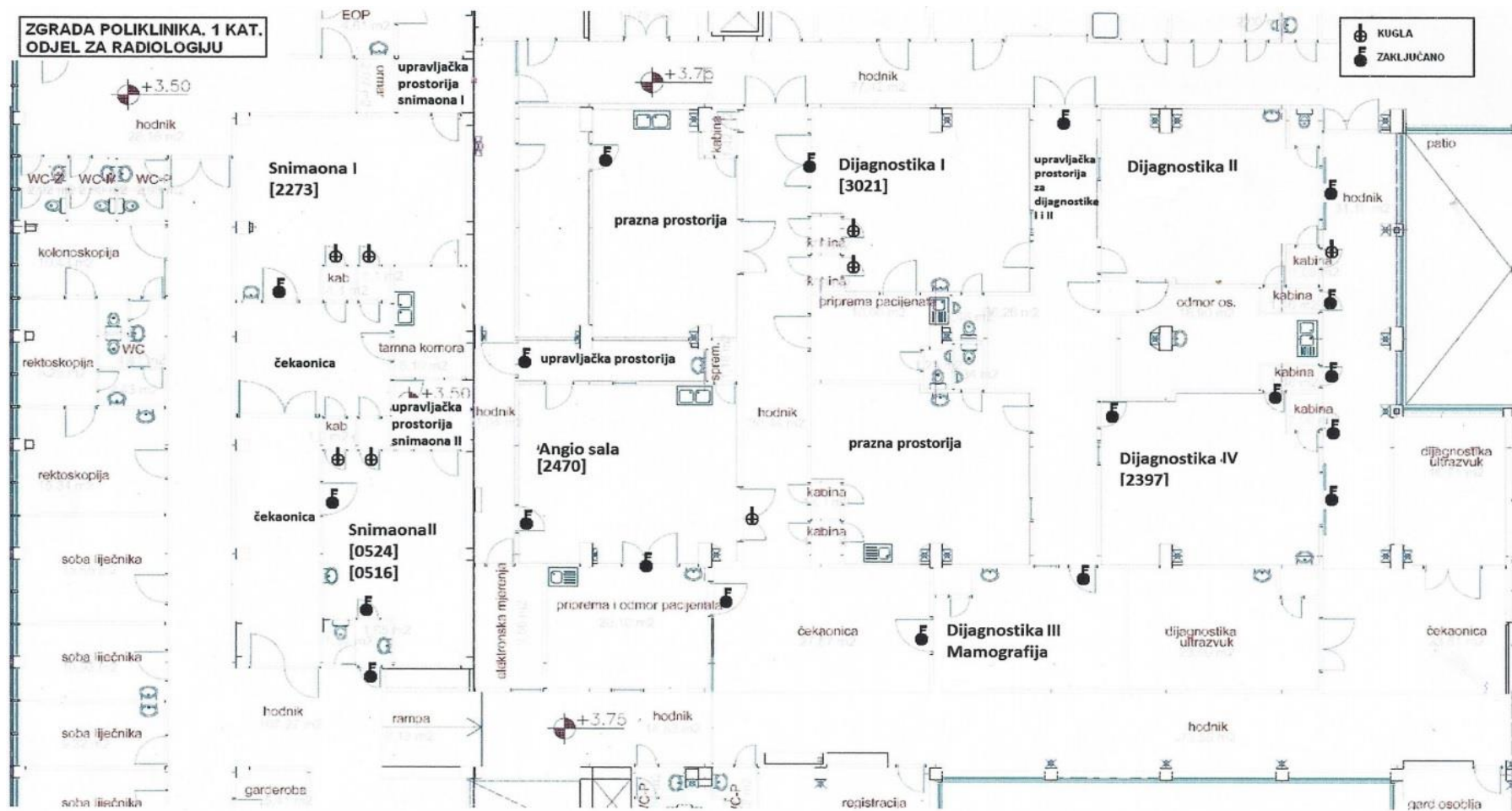
Tab. 13. RTG uređaj OPESCOPE PLENO WHA-200

Ev. br.:	3404	Smještaj:	Odjel centralne operacije i sterilizacije, VI kat, Bolnica II	
Proizvođač	Shimazu		God. proizvodnje	God. montaže
Model	OPESCOPE PLENO WHA-200		2009.	2011.
Ser. br.	0261B32101		Max. struja	Max. napon
Namjena	Dijaskopija, slikanje		20 mA	110 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	AD11OP-200H	Model	SDO-0,6	
Ser. br.	8M6476	Ser. br.	8M6476	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

#### 9.4. RTG uređaj AXIOM ARTIS MP

Stacionari rendgenski uređaj za dijaskopiju, snimanje i angiografiju AXIOM ARTIS MP koristi se u Odjelu za radiologiju u objektu Poliklinike, I kat, u prostoriji dijagnostika V – angio sala (slika 16). Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije. Između angio sale i upravljačke prostorije nalazi se prostor s olovnim staklom zaštitnog učinka koji omogućava da izloženi djelatnik uz upravljački uređaj sa svog mjesta vidi bolesnika i dio uređaja koji zrači.

Tijekom rada rendgenske cijevi, angio sala se smatra područjem posebnog nadgledanja, a pripadajuća upravljačka prostorija se tijekom rada rendgenske cijevi smatra područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao elektronska mjerenja, priprema i odmor pacijenata, hodnik, spremište, prazne prostorije uz upravljačku prostoriju i hodnik. Iznad se nalazi laboratorij, a ispod Objedinjeni hitni bolnički prijem (OHBP). Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granice područja izloženosti.



Sl. 16. Tlocrt objekta Poliklinike I, I kat, Službe za kirurgiju i Odjela za radiologiju

Tab. 14. RTG uređaj AXIOM ARTIS MP

Ev. br.:	2470	Smještaj:	Poliklinika, I kat, dijagnostika V - angio sala	
Proizvođač	Siemens		God. proizvodnje	God. montaže
Model	AXIOM ARTIS MP		2005.	2006.
Ser. br.	20278		Max. struja	Max. napon
Namjena	Dijaskopija, slikanje, angiografija		1000 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	MEGALIX CAT 125/15/40/80 - 122 GW		Model	MEGALIX CAT 125/15/40/80
Ser. br.	-		Ser. br.	740310591
Dozvola za uporabu	Posjeduje		Stanje izvora	Ispravno

### 9.5. RTG uređaj ICONOS MD

Stacionarni rendgenski uređaj za dijaskopiju i snimanje ICONOS MD koristi se u Odjelu za radiologiju u objektu Poliklinike, I kat, u prostoriji Dijagnostika I – dijaskopija (slika 16). Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije. Između Dijagnostike I i upravljačke prostorije nalazi se prostor s olovnom staklom zaštitnog učinka koji omogućava da izloženi djelatnik uz upravljački uređaj sa svog mjesta vidi bolesnika i dio uređaja koji zrači.

Prostorija Dijagnostike I i pripadajuća upravljačka prostorija tijekom rada rendgenske cijevi smatraju se područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao Dijagnostika II, hodnici, kabine, soba za pripremu pacijenta i toalet. Iznad se nalazi laboratorij, a ispod OHBP. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.

Tab. 15. RTG uređaj ICONOS MD

Ev. br.:	3021	Smještaj:	Poliklinika, I kat, dijagnostika I - dijaskopija	
Proizvođač	Siemens		God. proizvodnje	God. montaže
Model	ICONOS MD		2008.	2008.
Ser. br.	7738433		Max. struja	Max. napon
Namjena	Dijaskopija, slikanje		500 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	OPTITOP 150/30/50 HC - 100	Model	OPTITOP 150/30/50	
Ser. br.	454510741	Ser. br.	505510742	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

## 9.6. RTG uređaj LUNAR DPX-NT

Stacionarni rendgenski uređaj za denzitometriju kostiju LUNAR DPX-NT koristi se u Odjelu za radiologiju u objektu Poliklinke, I kat, u prostoriji Dijagnostika IV – denzitometrija kostiju (slika 16). Rendgenskim uređajem za denzitometriju kostiju upravlja se uporabom računala unutar prostorije Dijagnostika IV – denzitometrija kostiju iza zaštitnog paravana.

Prostorija Dijagnostike IV – denzitometrija kostiju tijekom rada rendgenske cijevi se smatra područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao Dijagnostika ultrazvuk, hodnik, odmor osoblja, upravljačka prostorija za Dijagnostike I i II i Dijagnostika III – mamografija. Iznad se nalazi laboratorij, a ispod OHBP. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.



Tab. 16. RTG uređaj LUNAR DPX-NT

Ev. br.:	2397	Smještaj:	Poliklinika, I kat, dijagnostika IV – denzitometrija kostiju	
Proizvođač	General Electric Medical Systems S. A.		God. proizvodnje	God. montaže
Model	LUNAR DPX-NT		2005.	2005.
Ser. br.	150098		Max. struja	Max. napon
Namjena	Denzitometrija kostiju		1,5 mA	76 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	LUNAR 8548	Model	BRAND BX-1L	
Ser. br.	64888	Ser. br.	150098	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.7. RTG uređaj BUCKY DIAGNOST TH2

Stacionari rendgenski uređaj za snimanje BUCKY DIAGNOST TH2 koristi se u Odjelu za radiologiju u zgradi Poliklinike, I kat, u prostoriji Snimaona I (slika 16). Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije. Između Snimaone I i upravljačke prostorije nalazi se prostor s olovnim staklom zaštitnog učinka koji omogućava da izloženi djelatnik uz upravljački uređaj sa svog mjesta vidi bolesnika i dio uređaja koji zrači.

Prostorija Snimaone I i pripadajuća upravljačka prostorija tijekom rada rendgenske cijevi smatraju se područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao hodnici, čekaona, kabine i tamna komora. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.

Tab. 17. RTG uređaj BUCKY DIAGNOST TH2

Ev. br.:	2273	Smještaj:	Poliklinika, I kat, snimaona I	
Proizvođač	Philips		God. proizvodnje	God. montaže
Model	BUCKY DIAGNOST TH2		2004.	2005.
Ser. br.	0400730		Max. struja	Max. napon
Namjena	Slikanje		900 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	LUNAR 8548	Model	Philips 980620670102	
Ser. br.	11955A202158	Ser. br.	202158	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.8. RTG uređaji ORTHOPOS 3 i TOMO BS, UD150L-RII

Stacionarni rendgenski uređaj za panoramsko snimanje zubi ORTHOPOS 3 i stacionarni rendgenski uređaj TOMO BS, UD150L-RII koriste se u Odjelu za radiologiju u objektu Poliklinike, I kat, u prostoriji Snimaona II (slika 16). Rendgenskim uređajima upravlja se iz upravljačke prostorije. Između Snimaone II i upravljačke prostorije nalazi se prostor s olovnim staklom zaštitnog učinka koji omogućava da izloženi djelatnik uz upravljački uređaj sa svog mjesta vidi bolesnika i dio uređaja koji zrači. Rendgenski uređaji nikada ne rade istovremeno.

Prostorija Snimaone II i pripadajuća upravljačka prostorija tijekom rada rendgenske cijevi smatraju se područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao hodnici, čekaonice, kabine, tamna komora i toalet. Iznad se nalazi laboratorij, a ispod OHBP. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.

Tab. 18. RTG uređaj ORTHOPOS 3

Ev. br.:	516	Smještaj:	Poliklinika, I kat, snimaona II	
Proizvođač	Siemens		God. proizvodnje	God. montaže
Model	ORTHOPOS 3		1996.	1997.
Ser. br.	-		Max. struja	Max. napon
Namjena	Panoramsko slikanje zubi		10 mA	80 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	1889 356 D 3285	Model	2809 163 V 7012	
Ser. br.	03984 S 02	Ser. br.	160352 S 20	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

Tab. 19. RTG uređaj TOMO BS, UD150L-RII

Ev. br.:	524	Smještaj:	Poliklinika, I kat, snimaona II	
Proizvođač	Shimadzu		God. proizvodnje	God. montaže
Model	TOMO BS, UD150L-RII		1996.	1996.
Ser. br.	0164788306		Max. struja	Max. napon
Namjena	Slikanje		500 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	COMET DO 10-150	Model	COMET AG DI 101H-22/60-150	
Ser. br.	15358	Ser. br.	47-8148	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.9. RTG uređaj CH-200 RADSPED

Stacionarni rendgenski uređaj za snimanje CH-200 RADSPED koristi se u Odjelu za radiologiju, u objektu Bolnica I, prostorija Antituberkulozni dispanzer. Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije.

Prostorija Antituberkuloznog ekspanzera i upravljačka prostorija se tijekom rada rendgenske cijevi smatraju područjem nadgledanja. Susjedne prostorije su radna soba, tamna komora, kabine, hodnik i plućna ambulanta. Iznad se nalazi Odjel za psihijatriju, a ispod podrumске prostorije. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s

obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.

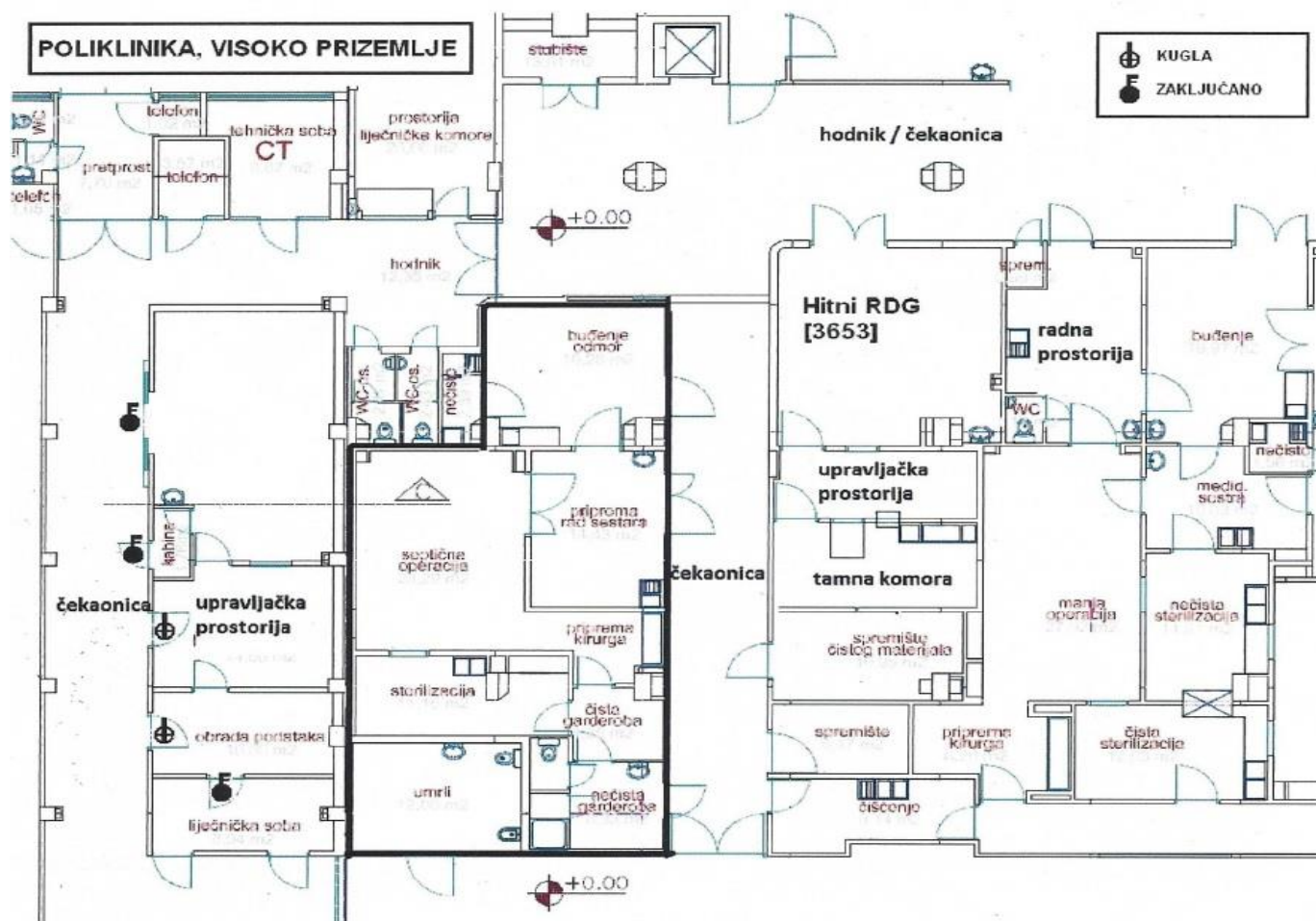
Tab. 20. RTG uređaj CH-200 RADSPED

Ev. br.:	3027	Smještaj:	Antituberkulozni dispanzer	
Proizvođač	Shimadzu		God. proizvodnje	God. montaže
Model	CH-200 RADSPED		2007.	2012.
Ser. br.	0262M49109		Max. struja	Max. napon
Namjena	Slikanje, tomografija		630 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	R-30 H	Model	0,6/1,2 364 DK	
Ser. br.	011X919302	Ser. br.	0262M49109	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.10. RTG uređaj YSIO

Stacionarni rendgenski uređaj YSIO pripada Odjelu za radiologiju, a smješten je i koristi se u OHBP-u, objektu Poliklinika VP, prostorija hitni rendgen (slika 17). Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije. Između prostorije u kojoj je smješten rendgen uređaj i upravljačke prostorije nalazi se prozor s olovnom staklom zaštitnog učinka koji omogućava da izloženi djelatnik uz upravljački uređaj sa svog mjesta vidi bolesnika i dio uređaja koji zrači.

Prostorija hitnog rendgena i pripadajuća upravljačka prostorija tijekom rada rendgenske cijevi smatraju se područjem nadgledanja. Susjedne prostorije (slika 16) označene su kao tamna komora, manja operacija, radna prostorija, hodnik/čekaonica i čekaonica. Iznad se nalazi Služba za kirurgiju, Odjel za radiologiju na prvom katu, a ispod Odjel za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju – Fizikalna terapija na niskom prizemlju. Navedene susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.



Sl. 17. Tlocrt objekta Poliklinika I, visoko prizemlje VP, Odjela za radiologiju i OHBP-a. Prostorije obrubljene podebljanom linijom pripadaju privatnoj poliklinici

Tab. 21. RTG uređaj YSIO

Ev. br.:	3653	Smještaj:	Poliklinika VP – hitni rendgen	
Proizvođač	Siemens		God. proizvodnje	God. montaže
Model	YSIO		2012.	2012.
Ser. br.	2065		Max. struja	Max. napon
Namjena	Slikanje		800 mA	150 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	OPTITOP 150/40/80 HC – 100	Model	OPTITOP 150/40/80 HC	
Ser. br.	400221254	Ser. br.	508211246	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

### 9.11. RTG uređaj SELENIA DIMENSIONS 3D

Stacionarni rendgen uređaj za mamografiju SELENIA DIMENSIONS 3D koristi se u Odjelu za radiologiju, objektu Poliklinika, I kat u u prostoriji koja je prilikom izrade tlocrta označena kao prazna prostorija, danas Dijagnostika V (slika 16). Rendgenski uređaj se uključuje iz upravljačke prostorije.

Susjedne prostorije ne smatraju se područjem izloženosti tijekom rada rendgenske cijevi s obzirom da je prostorija u kojoj se rendgenski uređaj koristi sagrađena na način da zidovi i vrata omogućavaju dovoljnu zaštitu od zračenja te predstavljaju granicu izloženosti.

Tab. 22. RTG uređaj SELENIA DIMENSIONS 3D

Ev. br.:	4019	Smještaj:	Odjel za radiologiju, Poliklinka I kat, dijagnostika V	
Proizvođač	Hologic		God. proizvodnje	God. montaže
Model	SELENIA DIMENSIONS 3D		2014.	2015.
Ser. br.	811011554257		Max. struja	Max. napon
Namjena	Mamografija		200 mA	49 kV
ZRAČNIK		CIJEV		
Model	B-115	Model	VARIAN, M-113T	
Ser. br.	H18946	Ser. br.	18946-Z4	
Dozvola za uporabu	Posjeduje	Stanje izvora	Ispravno	

## 10. PROCJENA PREOSTALOG RIZIKA I ANALIZA OPASNOSTI NA RADNIM MJESTIMA PRIMJENOM AUVA METODE

Temeljem čl. 18. stavka 6. Zakona o ZNR i sukladno Pravilniku<sup>9</sup>, radna mjesta moraju biti analizirana prema prisutnim opasnostima. Opasnosti se utvrđuju prema vrstama i opsegu temeljem analize tehnologije rada i radnih postupaka, korištenih strojeva, uređaja, instalacija i radnih tvari te radne okoline i radnog prostora – uz naznaku potrebnih osnovnih i posebnih pravila zaštite na radu.

Primjenom AUVA metode možemo procijeniti rizik za sve izložene djelatnike koji su obrađeni u ovom radu.

Tab. 23. Izračun razine rizika od bolesti

VJEROJATNOST NASTANKA BOLESTI	TEŽINA BOLESTI				
	A	B	C	D	E
mala	1	1	2	3	5
srednja	1	2	3	4	5
velika	2	3	4	5	5

Prema posljedicama na trajnu radnu sposobnost i životnu aktivnost, težinu bolesti klasificiramo na sljedeći način:

A – bez ikakvih posljedica,

B – posljedice koje bitno ne utječu na radnu sposobnost,

C – posljedice koje mogu ograničiti radnu sposobnost,

D – trajne posljedice koje uzrokuju gubitak radne sposobnosti, a koje dijelom ograničavaju životnu aktivnost te bolest progresivne prirode

E – značajno ograničena životna aktivnost ili smrtna bolest. [15]

<sup>9</sup>Pravilnik o izradi procjene rizika (NN 112/14)

Tab. 24. Klasifikacija rizika – procjena razine rizika

Razred rizika	Obrazloženje
1	Rizik je zanemariv, neznatan i beznačajan, mjere zaštite su nepotrebne.
2	Rizik je prihvatljiv, ako je moguće treba poboljšati mjere zaštite, ali se može zadržati i sadašnji stupanj zaštite.
3	Rizik je prisutan i moguć, potrebne su mjere za poboljšanje zaštite i potrebno je pratiti zdravstveno stanje.
4	Rizik je velik, odmah prekinuti rad, potrebno je izvršiti kontrolu zdravstvenog stanja.
5	Rizik je vrlo velik, odmah prekinuti rad i odmah izvršiti kontrolu zdravstvenog stanja.

Treba napomenuti da je AUVA metodologija primjenjiva za opasnost kao što je zračenje.



Tab. 25. Procjena preostalog rizika od bolesti (profesionalne bolesti i bolesti vezane za rad)

VRSTE OPASNOSTI	PRAVILA ZAŠTITE NA RADU		Vjerojatnost nastanka	Posljedica (težina)	Razina rizika
	OSNOVNA	POSEBNA			
ZRAČENJE Ionizirajuće (povremeno)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tehnički ispravni RTG uređaji s pravilno izvedenom zaštitom od primarnog zračenja i primijenjenim tehničkim mjerama od sekundarnog zračenja raspoloživa</li> <li>- raspoloživa tehnička dokumentacija za RTG uređaje s uputama za rukovanje</li> <li>- sigurnosni sat</li> <li>- 1 do 2 m dugačak kabel za eksponiranje pri prijenosnim RTG uređajima</li> <li>- zaštitne barijere i paravani</li> <li>- redovita kontrola i mjerenje uređaja</li> <li>- inspekcija radnog mjesta</li> <li>- ispravne prostorije za rad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- osposobljavanje za rad na siguran način</li> <li>- pravilno korištenje osobne zaštitne opreme za zaštitu od ionizirajućeg zračenja</li> <li>- pravilni radni postupci</li> <li>- nošenje i nadzor osobnog dozimetra</li> <li>- prethodni i redovni zdravstveni pregledi</li> <li>- označavanje prisutnih opasnosti i opasnih prostora</li> </ul>	D	3	3

## **11. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA**

Pomoću tablica i grafikona prikazani su rezultati istraživanja koji se odnose na stupanj ozračenja izloženih djelatnika koji rade u sferi ionizirajućeg zračenja, a opisom i tablicama utvrđeno je činjenično stanje vezano za ispravnost i karakteristike svakog od izvora ionizirajućeg zračenja koji se koristi u općoj bolnici, kao i za radni okoliš.

Stupanj ozračenja izloženih djelatnika prikazan je u tablicama 1-10 i grafikonima 1-28. Stupanj ozračenja mjereno je osobnim TLD dozimetrima. Tablice i grafikoni prikazuju podatke o primljenoj efektivnoj dozi za svakog izloženog djelatnika pod dozimetrijskim nadzorom u kontrolnom intervalu od pet godina, ali i preuzetoj efektivnoj dozi do kontrolnog intervala. Također, pomoću zajedničkih pokazatelja opće bolnice prikazan je broj djelatnika u sferi ionizirajućeg zračenja, ukupno primljena efektivna doza za kontrolni interval prema službama/odjelima, dobi, spolu i zanimanju i prosječno primljena doza za sve djelatnike u službi/odjelu.

Utvrđivanje činjeničnog stanja za ispravnost i osnovne karakteristike svakog izvora ionizirajućeg zračenja prikazano je tablicama 11-22. Činjenično stanje za radni okoliš u i oko kojeg se koriste izvori ionizirajućeg zračenja prikazano je opisnim putem i putem slika 14-17.

### **11.1. Utemeljenost prve hipoteze H1**

Nakon analize svake tablice i danog prikaza putem grafikona, možemo utvrditi da niti jedan djelatnik nije primio dozu ionizirajućeg zračenja veću od granice izlaganja koja je propisana zakonskim i podzakonskim aktima. To znači da niti jedan djelatnik nije bio ozračen prosječno od 20 mSv u jednoj godini, kao niti 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina. Dapače, primljene efektivne doze za izložene djelatnike izrazito su niske.

Najozračeniji djelatnik u jednoj godini kontrolnog intervala ovog istraživanja je djelatnik R-05 s Odjela za radiologiju (tablica 1) koji je 2011. godine primio efektivnu dozu u iznosu od 700  $\mu$ Sv, odnosno samo 0.7 mSv. Ukupno primljena

efektivna doza istog djelatnika za kontrolni interval ujedno je i najveća (tablica 1) od svih izloženih djelatnika te iznosi 946  $\mu\text{Sv}$ , odnosno 0.946 mSv.

Štoviše, ukupno primljena doza u cijelom kontrolnom intervalu za svih 111 djelatnika iznosi tek 13036  $\mu\text{Sv}$ , odnosno 13.04 mSv.

Rezultati ovog istraživanja ne samo da ukazuju na utemeljenost prve hipoteze kao istinite, već su primljene doze za svakog izloženog djelatnika u općoj bolnici daleko niže od granice izlaganja koja je propisana zakonskim i podzakonskim odredbama.

## **11.2. Utemeljenost druge hipoteze H2**

Za utemeljenost druge hipoteze kao istinite kojom se želi dokazati da su izvori ionizirajućeg zračenja opće bolnice u ispravnom stanju i da radni okoliš udovoljava propisanim uvjetima zaštite od ionizirajućeg zračenja, utvrđeno je činjenično stanje.

Analizom tablica koje sadrže podatke o osnovnim karakteristikama svakog izvora ionizirajućeg zračenja, utvrđeno je da svaki od izvora ionizirajućeg zračenja posjeduje dozvolu, odnosno odobrenje za obavljanje djelatnosti izdano od DZNRS-a te da je svaki od izvora ionizirajućeg zračenja nakon ispitivanja u ispravnom stanju.

Prikazom slika i opisom radnog okoliša u i oko kojeg se koriste izvori ionizirajućeg zračenja, utvrđeno je da radni okoliš udovoljava zakonskim i podzakonskim odredbama.

Dakle, rezultati istraživanja pokazuju da se i druga hipoteza u eksperimentu pokazala istinitom.

## 12. ZAKLJUČAK

U ovom radu dokazano je da su primljene doze izloženih djelatnika u općoj bolnici u okviru zakonskih i podzakonskih odredbi. Također, dokazano je da izvori ionizirajućeg zračenja opće bolnice i radni okoliš udovoljavaju zakonskim propisima, odnosno da opća bolnica posjeduje svu potrebnu dokumentaciju za svaki izvor zračenja i odobrenje za djelatnost.

Učinci ionizirajućeg zračenja na ljudski organizam uzrokovani velikim dozama u kratkom vremenu relativno su dobro poznati, no to ne možemo tvrditi i za posljedice dugoročnog izlaganja malim dozama. S druge strane, primljene doze za izložene djelatnike u općoj bolnici toliko su niske da su praktički zanemarive.

Glavni indikator ovih pozitivnih rezultata istraživanja jest izrazito dobra implementacija zaštite od zračenja u ustanovi. Također, ne treba zanemariti činjenicu da su od 2000. godine mjerenja efektivne doze puno preciznija i relevantnija.

Implementacija zaštite od zračenja nije jednostavan posao. Dapače, radi se o prilično kompleksnom i odgovornom poslu. Za pravilnu funkcionalnost sustava zaštite od zračenja potrebni su stručnjaci iz raznih područja.

Ovaj rad potvrdio je da se sinergijskim djelovanjem svake karike u sustavu zaštite od zračenja rizik za izložene djelatnike može i mora svesti na minimum.

Izrazito je važno napomenuti da će rizik uvijek postojati, ali ne mora nužno predstavljati neotklonjivu opasnost za zdravlje i život profesionalno izloženih djelatnika.

Na kraju, ovaj rad može poslužiti svakome za daljnja istraživanja iz područja ionizirajućeg zračenja.

## LITERATURA

- [1] Novaković, M.: *Zaštita od ionizirajućeg zračenja: propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima*, Ekoteh-dozimetrija d.o.o. za zaštitu od zračenja, Zagreb, (2001.), ISBN 953-98623-0-2
- [2] Dodig D., Ivančević D. i Popović S., ur.: *Radijacijske ozljede: dijagnostika i liječenje*, Medicinska naklada, Zagreb, (2002.), ISBN 953-176-167-1
- [3] Tončev, N.: *Opasnosti i zaštita od jonizirajućeg zračenja*, Institut za dokumentaciju zaštite na radu, Niš, (1977.)
- [4] Greening, R.: *Fundamentals of Radiation Dosimetry*, A. Hilger in collaboration with the Hospital Physicists' Association, Bristol, (1985.)
- [5] Khan, F.: *The Physics of Radiation therapy*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2010.)
- [6] Turner, J.: *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2007.), ISBN 978-3-527-40606-7
- [7] Brumen V., Franić, Z., Garaj-Vrhovac V.: *Ionizirajuće zračenje*, Medicinska naklada, Zagreb, (2002.)
- [8] McLeish, D.: *Monte Carlo simulation and finance*, J. Wiley, Hoboken, New Jersey (2005.)
- [9] Hebrang A., Klarić-Čustović R., ur.: *Radiologija*, Medicinska naklada, Zagreb, (2007.), ISBN 953-176-338-0
- [10] Ivančević, D., Dodig D., Kusić, Z., ur.: *Klinička nuklearna medicina*, Medicinska naklada, Zagreb, (2002.), ISBN 953-176-077-2
- [11] Obe G., Pfeiffer, P., Savage, J.R. et al.: *Chromosomal aberrations: formation, identification and distribution*, Mutat Res, (2002.)
- [12] Chen, Z., Sandberg, A. A.: *Molecular cytogenetic aspects of hematological malignancies: clinical implications*, AM J. Med. Genet., (2002.)

[13] Jacobs, P. A., Browne C., Gregson N. et. al.: *Estimates of the frequency of chromosome abnormalities detectable in unselected newborns using moderate levels of banding*, J. Med. Genet., (1992.)

[14] Collins, A. R.: *The comet assay for DNA damage and repair: principles, applications, and limitations*, Mol. Biotechnol. 26., (2004.)

[15] Šarić, M., Žuškin, E., ur.: *Medicina rada i okoliša*, Medicinska naklada, Zagreb, (2012.)

#### KORIŠTENI ZAKONSKI I PODZAKONSKI AKTI REPUBLIKE HRVATSKE

1. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/13, 39/15)
2. Pravilnik o granicama ozračenja (NN 59/13)
3. Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 80/13)
4. Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja i primjenu mjera radiološke sigurnosti (NN 97/15, 10/16)
5. Zakon o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 154/14)
6. Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/84)
7. Pravilnik o mjerenju osobnog ozračenja, ispitivanja izvora ionizirajućeg zračenja i uvjeta rada te o izvještajima i očevidnicima (NN 41/12, 89/13)
8. Pravilnik o izradi procjene rizika (NN 112/14)

## POPIS KRATICA I SIMBOLA

### Kratice:

ALARA – As Low As Reasonably Achievable

AUVA – Allgemeine Unfall Versicherungs Anstalt

Bq – bequerel

DZRNS – Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost

eV – elektronvolt

Gy – Gray

kSv – kilosievert

kV – kilovolt

mA – miliamper

MeV – mega elektronvolt

nm – nanometar

NN – Narodne Novine

OHBP – Objedinjeni hitni bolnički prijem

RTG – rendgen

Sv – sievert

TLD – termoluminiscentni dozimetar

$\mu$ Sv – mikrosievert

### Simboli:

$\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada u jednažbama (1)-(4)

$S(t)$  – brzina stvaranja radioaktivne tvari

$Q$  – energija

$\nu$  – antineutrino

$h$  – Planckova konstanta

$f$  – frekvencija ulazne svjetlosti

$f_0$  – granična frekvencija

$W_0$  – izlazni rad

$\lambda$  – valna duljina fotona poslije raspršenja u jednadžbi (11)

$\lambda'$  - valna duljina fotona prije raspršenja u jednadžbi (11)

$c$  – brzina svjetlosti

$\frac{h}{mc}$  – Comptonova valna duljina

$\theta$  – kut raspršenja fotona

$I(x)$  – intenzitet snopa

$I(0)$  – ulazni intenzitet snopa

$\mu$  – linearni koeficijent atenuacije u jednadžbi (12)

$\mu_m$  – maseni atenuacijski koeficijent

$P$  – vjerojatnost

$n$  – broj točaka unutar kružnice

$i$  – ukupan broj odabranih točaka

$D$  – apsorbirana doza

$E_D$  – predana energija

$E_U$  – ukupna energija



$E_I$  – energija čestica

$H_T$  – ekvivalentna doza

$T$  – tkivo

$R$  – vrsta radijacije

$W_R$  – težinski faktor vrste zračenja

$E$  – efektivna doza

$W_T$  – težinski faktor ozračivanja tkiva

$\alpha D$  – jednodogađajna lezija

$\beta D^2$  – dvodogađajna lezija

## POPIS SLIKA

Sl. 1. Prodornost alfa, beta i gama čestice .....	9
Sl. 2. Fotoelektrični efekt .....	10
Sl. 3. Comptonov efekt .....	11
Sl. 4. Comptonovi rezultati za kuteve raspršenja.....	12
Sl. 5. Tvorba para elektron – pozitron .....	13
Sl. 6. Simulacija s 1000 točaka.....	20
Sl. 7. Simulacija sa 100 000 točaka.....	21
Sl. 8. Putanja elektrona u vodi izračunata pomoću Monte Carlo simulacije .....	22
Sl. 9. Ovisnost bioloških učinaka o primljenoj dozi .....	27
Sl. 10. Dvolančani lom molekule DNA.....	28
Sl. 11. Jednolančani lom molekule DNA .....	28
Sl. 12. TL krivulja isijavanja .....	35
Sl. 13. TLD dozimetar.....	35
Sl. 14. Tlocrt objekta Bolnice II, VI kat lijevo, Službe za kirurgiju i Odjela centralne operacije i sterilizacije.....	70
Sl. 15. Tlocrt objekta Bolnice II, VI kat desno, Službe za kirurgiju i Odjela centralne operacije i sterilizacije.....	71
Sl. 16. Tlocrt objekta Poliklinike I, I kat, Službe za kirurgiju i Odjela za radiologiju .....	74
Sl. 17. Tlocrt objekta Poliklinika I, visoko prizemlje VP, Odjela za radiologiju i OHBP-a.....	81

## POPIS TABLICA

Tab. 1. Primljene doze za liječnike specijaliste radiologe .....	41
Tab. 2. Primljene doze za inženjere medicinske radiologije .....	42
Tab. 3. Primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe .....	46
Tab. 4. Primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i medicinske tehničare anesteziologije .....	49
Tab. 5. Primljene doze za liječnike spec. kirurge i jednu medicinsku sestru ....	51
Tab. 6. Primljene doze za liječnike spec. urologije i više medicinske sestre ....	57
Tab. 7. Primljene doze za liječnike specijaliste ginekologije i opstetricije .....	59
Tab. 8. Primljene doze za medicinske sestre i jednog medicinskog tehničara .	60
Tab. 9. Primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre .....	63
Tab. 10. Usporedba glavnih zajedničkih pokazatelja opće bolnice.....	65
Tab. 11. RTG uređaj POLYMOBIL 2 .....	69
Tab. 12. RTG uređaj OPESCOPE WHA-50N.....	72
Tab. 13. RTG uređaj OPESCOPE PLENO WHA-200 .....	73
Tab. 14. RTG uređaj AXIOM ARTIS MP .....	75
Tab. 15. RTG uređaj ICONOS MD .....	76
Tab. 16. RTG uređaj LUNAR DPX-NT .....	77
Tab. 17. RTG uređaj BUCKY DIAGNOST TH2 .....	78
Tab. 18. RTG uređaj ORTHOPOS 3 .....	79
Tab. 19. RTG uređaj TOMO BS, UD150L-R11 .....	79
Tab. 20. RTG uređaj CH-200 RADSPED .....	80
Tab. 21. RTG uređaj YSIO .....	82
Tab. 22. RTG uređaj SELENIA DIMENSIONS 3D .....	82
Tab. 23. Izračun razine rizika od bolesti .....	83
Tab. 24. Klasifikacija rizika – procjena razine rizika .....	84
Tab. 25. Procjena preostalog rizika od bolesti (profesionalne bolesti i bolesti vezane za rad).....	85

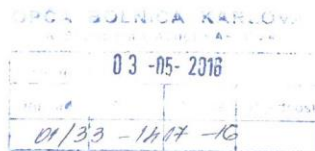
## POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Primljene doze za liječnike specijaliste radiologe.....	43
Grafikon 2. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike spec. rad. ....	43
Grafikon 3. Primljene doze za inženjere medicinske radiologije.....	44
Grafikon 4. Preuzete doze i ukupno primljene doze za inženjere med. rad.....	45
Grafikon 5. Primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe .....	47
Grafikon 6. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste anesteziologe .....	48
Grafikon 7. Primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i medicinske tehničare anesteziologije .....	50
Grafikon 8. Preuzete doze i ukupno primljene doze za više medicinske sestre, medicinske sestre i medicinske tehničare anesteziologije.....	50
Grafikon 9. Primljene doze za liječnike specijaliste dječje kirurgije i jednu medicinsku sestru.....	52
Grafikon 10. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste dječje kirurgije i jednu medicinsku sestru .....	52
Grafikon 11. Primljene doze za liječnike specijaliste opće, plastične i estetske kirurgije.....	53
Grafikon 12. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste opće, plastične i estetske kirurgije.....	53
Grafikon 13. Primljene doze za liječnike specijaliste abdominalne kirurgije .....	54
Grafikon 14. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste abdominalne kirurgije .....	54
Grafikon 15. Primljene doze za liječnike specijaliste vaskularne kirurgije .....	55
Grafikon 16. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste vaskularne kirurgije .....	55
Grafikon 17. Primljene doze za liječnike spec. ortopedije i traumatologije .....	56
Grafikon 18. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste ortopedije i traumatologije .....	56
Grafikon 19. Primljene doze za liječnike specijaliste urologe i više medicinske sestre .....	58

Grafikon 20. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste urologe i više medicinske sestre.....	58
Grafikon 21. Primljene doze za liječnike spec. ginekologije i opstetricije .....	59
Grafikon 22. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste ginekologije i opstetricije .....	59
Grafikon 23. Primljene doze za med. sestre i jednog med. tehničara.....	61
Grafikon 24. Preuzete doze i ukupno primljene doze za medicinske sestre i jednog medicinskog tehničara .....	62
Grafikon 25. Primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre .....	64
Grafikon 26. Preuzete doze i ukupno primljene doze za liječnike specijaliste kardiologe, više medicinske sestre i medicinske sestre .....	64
Grafikon 27. Ukupno primljene doze po službama i odjelima .....	66
Grafikon 28. Prosječno primljene doze za svakog izloženog djelatnika po službama i odjelima .....	67

## PRILOG – SUGLASNOST SANACIJSKOG UPRAVITELJA

**OPĆA BOLNICA KARLOVAC**  
**ODSJEK ZA ZAŠTITU NA RADU**  
**I ZAŠTITU OD POŽARA**  
Ur.br.: 01/33-  
Karlovac 03.05.2016.



**SANACIJSKI UPRAVITELJ**  
mr.sc. Suad Crnica, dr.med.

PREDMET: Zamolba za korištenje podataka u svrhu izrade diplomskog rada

Poštovani,

kao djelatnik na stručnom osposobljavanju bez zasnivanja radnog odnosa u Odsjeku za zaštitu na radu i zaštitu od požara i kao apsolvent diplomskog studija na Veleučilištu u Karlovcu, odlučio sam se za izradu diplomskog rada iz područja ionizirajućeg zračenja.

Ovim putem Vas molim da mi odobrite korištenje podataka u svrhu izrade eksperimentalnog (istraživačkog) dijela diplomskog rada pod nazivom *Kemijski i biološki učinci ionizirajućeg zračenja – analiza rizika izloženih djelatnika u općoj bolnici.*

Korištena metodologija istraživanja bila bi analiza dostupne dokumentacije, što podrazumijeva prikupljanje, sređivanje i obradu podataka. Podaci bi bili prikupljeni u obliku godišnjih izvještaja o primljenim dozama (ispitivanje osobnog doznog ekvivalenta Hp(10)) za svakog djelatnika koji radi u sferi ionizirajućeg zračenja, kao i u obliku izvještaja o mjeranju i ispitivanju svakog izvora ionizirajućeg zračenja u Općoj bolnici Karlovac.

Interval istraživanja obuhvatio bi petogodišnje razdoblje (01.01.2011. - 31.12.2015.) kako bi se rezultati eksperimenta mogli smatrati relevantnim.

S poštovanjem,

Suglasan  
Voditelj Odsjeka za ZNR i ZOP:  
Marijan Marić, struč.spec.ing.sec



Podnositelj zamolbe  
Djelatnik na SOR-u:  
Karlo Lugarić, bacc.ing.sec.