

Универзитет у Новом Саду Природно-математички факултет Департман за физику



ПОРЕЂЕЊЕ АМБИЈЕНТАЛНИХ ДОЗИМЕТАРА У Х-И γ- РЕФЕРЕНТНИМ ПОЉИМА И ПРИЛИКОМ МЕРЕЊА НЕПОЗНАТОГ УЗОРКА

- Мастер рад-

Ментори: проф. др Наташа Тодоровић др Милош Живановић *Кандидат:* Јелена Влаховић

Нови Сад, септембар 2022.

Захвалница и посвета

Пре свега бих желела од срца да се захвалим својим менторима проф. др Наташи Тодоровић и др Милошу Живановићу на несебичној помоћи, смерницама и саветима приликом израде овог рада, као и проф. др Јовани Николов, проф. др Оливери Клисурић и др Николи Кржановићу.

Посебну захвалност дугујем Институту за нуклеарне науке "Винча" на прилици да експериментални део свог мастер рада урадим у сарадњи са њима.

На крају бих желела да се захвалим својој породици и пријатељима, посебно мами Љиљи, тати Љубиши, сестри Јовани, деди Миодрагу и нани Даници.

Садржај	2
	4
1. ИНТЕРАКЦИЈА ЗРАЧЕЊА СА МАТЕРИЈОМ	5 5
1.1.1. Фотослоктичных офексот	5
	0 ר
1.1.2. Commonos equerar	1
1.1.3. Стварање парова	8
1.2. Рендгенско зрачење	8
1.2.1. Бремштралунг (закочно) зрачење	9
1.2.2. Карактеристично зрачење	10
1.3. Атенуација γ- и X-зрака	11
2.ДОЗИМЕТРИЈСКЕ ВЕЛИЧИНЕ	13
2.1. Експозициона доза	13
2.2. Апсороована доза	14
2.3. Еквивалентна доза	14
2.4. Ефективна доза	15
2.5. Оперативне дозиметријске величине	15
2.5.1. Амбијентални еквивалент дозе	16
2.5.2. Дирекциони еквивалент дозе	16
2.5.3. Лични еквивалент дозе	16
2.6. Керма	17
3. ДЕТЕКТОРИ ЗРАЧЕЊА	18
3.1. Гасни детектори	18
3.1.1. Јонизациона комора	20
3.1.2. Гајгер-Милеров бројач	21
3.2. Сцинтилациони детектори	22
4.АМБИЈЕНТАЛНИ ДОЗИМЕТРИ	24
4.1. Поређење амбијенталних дозиметара	25
5.ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА И КОРИШЋЕНИ ИНСТРУМЕНТИ 5.1. Обрада резултата	26 29
6.РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	31
6.1. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу γ-зрачења извора	'Cs.31
6.2. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу ү-зрачења извора ⁶⁰	Co33
6.3. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу X-зрачења квалит 80	ета N-

Садржај

6.4. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу Х-зрачења квалитета N 200
6.5. Поређење амбијенталних дозиметара у мешовитом пољу непознатог извора4
6.6. Поређење амбијенталних дозиметара приликом директног контакта са оклопљеним извором ⁶⁰ Со43
6.7. Поређење амбијенталних дозиметара приликом мерења расејаног зрачења у пољу Х-зрачења4
6.8. Енергетска зависност дозиметара48
6.8.1. Апсолутан и релативан одзив дозиметара према правим референтним вредностима
6.8.2. Апсолутан и релативан одзив дозиметара према привидним референтним вредностима
ЗАКЉУЧАК
DHOLLANDA

УВОД

Детекција и квалитет мерења јонизујућег зрачења се ослања на поузданост дозиметријских уређаја и они представљају важан елемент у области заштите од зрачења. Амбијентални дозиметри имају значајну улогу у праћењу изложености, која може потицати од различитих извора зрачења, у реалном времену. Осмишљени су тако да се могу користити за мерење ниских нивоа зрачења, евалуацију заштите просторија или за поређење различитих сценарија излагања.

Амбијентални дозиметри који се у ову сврху користе могу бити гасом испуњени детектори, као што су јонизационе коморе, пропорционални и Гајгер-Милерови бројачи, или детектори чврстог стања попут сцинтилационих и полупроводничких детектора. Поузданост и ефикасност рада ових уређаја у највећој мери зависи од врсте детектора коју користе и њихове пропратне електронике. Познавање њихових карактеристика је важан фактор за правилну употребу инструмента [1,2].

У оквиру овог рада поредићемо енергетску зависност различитих врста амбијенталних дозиметара, пратити да ли њихов одзив задовољава неопходне критеријуме и како је то повезано са конструкцијом и особинама самих уређаја.

1. ИНТЕРАКЦИЈА ЗРАЧЕЊА СА МАТЕРИЈОМ

Како бисмо могли да разматрамо различите механизме интеракције јонизујућег зрачења са материјом, најпре морамо дефинисати појам јонизујућег зрачења. Јонизујуће зрачење представља честично или електромагнетно зрачење које има довољну количину енергије да врши јонизацију материјалне средине кроз коју пролази.

Јонизација и ексцитација представљају основне механизме путем којих јонизујуће зрачење интерагује са материјом и оне се одвијају у атомском омотачу посредством електромагнетних сила [3].

Јонизујуће зрачење можемо поделити на директно и индиректно јонизујуће зрачење. Директно јонизујуће зрачење је оно зрачење које врши јонизацију средине кроз коју пролази путем дејства Кулонових сила између наелектрисаних честица директно јонизујућег зрачења и електрона у електронском омотачу или позитивног наелектрисања атомског језгра. У ово групу спадају електрони, позитрони, протони, α-честице и тешки јони. Индиректно јонизујуће зрачење, ког чине фотони и неутрони, врши јонизацију ослобађањем директно јонизујућих честица из материјала средине кроз коју зрачење пролази и са којом интерагује [4].

1.1. Интеракције индиректно јонизујућег зрачења

За разлику од наелектрисаних честица које постепено губе своју енергију приликом проласка кроз материју путем Кулонових интеракција, фотони могу прећи одређену удаљеност пре него што интерагују. Та удаљеност зависи од статистичких процеса и вероватноће интеракције по јединици пређеног пута.

Када говоримо о X- и γ-зрачењу, не постоји никаква разлика по питању интеракције са материјом. У оба случаја реч је о електромагнетном зрачењу мале таласне дужине, које се једино разликује по месту настанка. Гама зрачење потиче из језгра, док рендгенско зрачење настаје у процесима који се одвијају у пољу језгра, или у електронском омотачу [3].

Основни механизми интеракције фотона са материјом су фотоелектрични ефекат, Комптоново расејање и процес стварања пара електрон-позитрон.

1.1.1. Фотоелектрични ефекат

Фотоелектрични ефекат је процес у ком фотон предаје своју целокупну енергију орбиталном електрону атома мете. Фотон тада престаје да постоји, а електрон се удаљи из атома са енергијом:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{e}} = \mathbf{E}_f - \mathbf{E}_v \tag{1.1}$$

где је E_f енергија фотона пре интеракције, а E_v енергија везе орбиталног електрона.

Фотоелектрични ефекат се одвија само на везаним електронима. Ово теоријски значи да се фотоелектрични ефекат може одиграти на сваком орбиталном електрону, али се вероватноћа одвијања процеса разликује од електрона до електрона. Што је енергија везе орбиталног електрона ближа енергији фотона, то је електрон чвршће везан те је и вероватноћа одигравања фотоелектричног ефекта на том електрона виша [3].

Зависност ефикасног пресека фотоелектричног ефекта од енергије фотона и редног броја материјала мете се може представити на следећи начин:

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^5}{E^{\frac{7}{2}}} \operatorname{sa} E_f > E_v^k \tag{1.2}$$

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^5}{E} \operatorname{sa} E_f \gg E_v^k \tag{1.3}$$

где је E_{v}^{k} енергија везе К-електрона.



Слика 1 Зависност ефикасног пресека за фотоелектрични ефекат од енергије упадног снопа [3]

1.1.2. Комптонов ефекат

Приликом интеракције са материјом фотони гама или рендгенског зрачења могу да буду скренути са првобитне путање, односно расејани. У зависности од тога да ли приликом расејања долази до размене енергије или не, разликујемо некохерентно расејање и кохерентно расејање. Комптонов ефекат представља типичан пример некохерентног расејања. Приликом ове интеракције фотон предаје део своје енергије електрону, који бива избачен из атома вршећи даље јонизацију, услед чега фотон скреће са првобитне путање са умањеном енергијом [3].

Расподела енергије се у овом случају врши на следећи начин:

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \tag{1.4}$$

$$T_e = E_{\gamma} - E_{\gamma}' \tag{1.5}$$

где је E_{γ} енергија упадног γ -зрака, T_e је енергија расејаног електрона, $\alpha = \frac{E_{\gamma}}{mc^2}$, а θ је угао између правца упадног и расејаног фотона.

У случају малих енергија, вероватноћа за расејање фотона је симетрична, односно једнака је вероватноћа да фотон буде расејан унапред и уназад. Са порастом енергије фотона ова дистрибуција се помера ка напред, у правцу и смеру кретања упадног фотона, да би за високе енергије готови сви фотони након расејања били усмерени ка напред [3].



Слика 2 Угаона дистрибуција интензитета расејаног Комптонвског зрачења за енергије упадних фотона до 1 MeV [3]

Са порастом енергије упадног фотона у односу на енергију везе електрона смањује се вероватноћа дешавања фотоелектричног ефекта, а расте вероватноћа за Комптонов

ефекат. Тотални ефикасни пресек за расејање фотона на једном електрону обрнуто је пропорционалан његовој енергији:

$$\sigma_{com} \sim \frac{Z}{E} \tag{1.6}$$

1.1.3. Стварање парова

Уколико је енергија упадног фотона већа од 1,022 MeV, односно двоструке енергије мировања електрона, може доћи до интеракције приликом које се ствара пар електрон-позитрон, приликом чега фотон потпуно ишчезне. Електрон и позитрон се тада емитују у правцу кретања фотона, а енергија фотона се троши на двоструку енергију мировања електрона и кинетичку енергију електрона E_- и позитрона E_+ :

$$E_f = 2m_e \cdot c^2 + E_+ + E_- \tag{1.7}$$

Електрон и позитрон могу да врше даљу јонизацију ако имају довољно велику енергију. Када изгуби своју енергију, позитрон доживљава анихилацију у контакту са електроном. У том процесу, обе честице нестају уз емисују фотона са енергијом од 0,511 keV [3].

1.2. Рендгенско зрачење

Рендгенско, односно Х-зрачење открио је Вилхелм Рендген 1895. године приликом изучавања појаве пражњења у рендгенској цеви. Тада је утврдио да Х-зраци имају електромагнетну природу и да су врло кратких таласних дужина, од 1 до 100 Å [5].

Х-зраци настају у рендгенској цеви бомбардовањем дебеле мете брзим електронима који се потом успоравају кроз процесе судара и расејања, те долази до емисије закочног и карактеристичног зрачења. Рендгенска цев представља цев са високим вакуумом која садржи две електроде, катоду (која се загрева) и антикатоду/аноду, између којих влада велика разлика потенцијала. Катода, која се индиректно загрева, емитује електроне који се убрзавају електричним пољем које влада између катоде и аноде. Висок вакуум обезбеђује да не дође до интеракције електрона са молекулима гаса, како не би дошло до пражњења кроз гас услед високог напона. Анода је нагнута под углом од 45° у односу на правац кретања електрона (угао може бити различит у зависности од примене). Места на аноди у које ударају електрони постају извори Х-зрака. Услед сталног бомбардовања аноде долази до њеног загревања и свега 1% енергије снопа електрона се претвара у енергију Х-зрака, док се остатак претвара у топлоту. Због овога је важно хладити аноду и то се најчешће постиже помоћу ваздуха, воде или уља [5].



Слика 3 Шематски приказ вакуумске цеви

1.2.1. Бремштралунг (закочно) зрачење

Рендген је могао да опише већину познатих карактеристика Х-зрака спровођењем неколико експеримената. Међутим, њихов настанак се није могао објаснити све док се нису објаснили концепти атома, честица и кванта. Сада је познато да до настанка Х-зрака долази када се негативно наелектрисан електрон са кинетичком енергијом E_k приближи атомском језгру, услед чега због дејства Кулонових сила долази до промене његове путање и убрзања, што доводи до емисије електромагнетног зрачења које се назива закочно зрачење. С обзиром да електрон у овом процесу емитује зрачење и успорава, након удаљавања из поља језгра, он има мању енергију. Енергија фотона закочног зрачења зависи од привлачних Кулонових сила и од удаљености електрона од језгра. Спектар закочног Х-зрачења је континуалан, а његов укупан интензитет и облик спектра зависе од напона цеви [6].



Слика 4 Настајање Бремштралунг зрачења [6]

Слика 5 приказује спектар закочног Х-зрачења. При одређеном напону цеви интензитет зрачења се нагло повећава до максималне вредности, а потом опада. Са слике се може видети да таласна дужина Х-зрака има своју минималну вредност (λ_{min}) која представља краткоталасну границу закочног зрачења [5].



Слика 5 Континуалан спектар закочног Х-зрачења

1.2.2. Карактеристично зрачење

Уколико је енергија брзог електрона већа од енергије везе електрона из атомског омотача, брзи електрон би приликом судара могао да га избаци из атома. Енергија везе је највећа на К љусци и опада за спољне љуске (L, M, итд.). Примарни електрон се потом расејава са енергијом умањеном за енергију везе атомског електрона. На упражњено место долази електрон из спољашње љуске и овај процес је праћен емисијом рендгенског зрачења, при чему је енергија фотона једнака разлици везивних енергија одређених љуски. С обзиром да електрони у сваком елементу имају јединствена енергетска стања, ове емисије електромагнетног зрачења су карактеристичне за елемент, те отуд и назив карактеристично зрачење [6].



Слика 6 Карактеристичан спектар X-зрачења суперпониран на континуални спектар закочног зрачења

Спектар Х-зрачења се најчешће приказује као суперпонирани спектри закочног и карактеристичног Х-зрачења, што се може видети на Слици 6.

1.3. Атенуација ү- и Х-зрака

Посматрајмо узак сноп монохроматског зрачења интензитета I који пролази кроз произвољни материјал дебљине dx. Тада долази до слабљења интензитета снопа према следећој релацији:

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dx \tag{1.8}$$

где μ представља коефицијент пропорционалности, односно линеарни атенуациони коефицијент. Линеарни атенуациони коефицијент представља карактеристику материјала и њиме су описана атенуациона својства материјала. Добија се као производ две величине, броја атома по јединици запремине материјала кроз који пролази сноп и ефикасног пресека, односно вероватноће да фотон доживи интеракцију у том материјалу. Предзнак "-" указује на чињеницу да долази до слабљења интензитета снопа [3].

Након интеграције горњег израза добијамо следећу релацију, односно атенуациони закон:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \tag{1.9}$$



Слика 7 Шематски приказ атенуације фотонског снопа

Често је пракса да се уместо линеарног атенуационог коефицијента користи масени атенуациони коефицијент, који се добија као количник линеарног атенуационог коефицијента и густине материјала од ког је атенуатор сачињен:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.10}$$

Он не зависи од густине материјала, а самим тим ни од агрегатног стања [3].

Уколико узмемо у обзир ефикасни пресек за сваку од горе три наведене интеракције понаособ, линеарни атенуациони коефицијент се може приказати као збир три линеарна атенуациона коефицијента од којих је сваки одређен једном од интеракција као:

$$\mu = n\sigma_{fe} + nZ\sigma_{Com} + \sigma_{par} \tag{1.11}$$



Слика 8 Масени атенуациони коефицијенти за појединачне интеракције и укупни масени атенуациони коефицијент

2. ДОЗИМЕТРИЈСКЕ ВЕЛИЧИНЕ

Приликом емисије зрачења, без обзира на његову врсту, долази до интеракција и депоновања енергије у средини која га окружује. Доза зрачења представља управо ту енергију која се депонује. Уколико се доза испоручује живим организмима, ткивима и органима постоји опасност од настанка нежељених ефеката, који могу изазвати биолошке промене.

Како би се наведене биолошке промене могле детаљније сагледати било је неопходно увести физичке величине путем којих би се дејство зрачења могло квалитативно и квантитативно описати. Научна дисциплина која проучава механизме путем којих долази до предаје енергије зрачења, која се бави прорачунима, начинима мерења и израчунавањем разних доза зрачења назива се дозиметрија [3]. У даљем тексту ћемо детаљније описати дозиметријске величине и њихове јединице.

2.1. Експозициона доза

Прва дефинисана дозиметријска величина описала је квантитативне ефекте рендгенског и гама зрачења и она се назива експозициона доза или експозиција. Експозиција је једнака количини наелектрисања коју инцидентни фотони генеришу у интеракцијама са елементарном запремином ваздуха масе *dm*:

$$X = \frac{dQ}{dm} \left[C \cdot kg^{-1} \right]$$
 (2.1)

где је dQ укупна количина наелектрисања која се створи у ваздуху када сви секундарни електрони у потпуности изгубе енергију и престану да врше јонизацију, а dm је маса ваздуха која се у тој запремини налази [3].

Јачина експозиционе дозе дефинише се као количник експозиционе дозе и времена озрачивања:

$$\dot{X} = \frac{X}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t} \left[\mathbf{C} \cdot \mathbf{k} \mathbf{g}^{-1} \cdot \mathbf{h}^{-1} \right]$$
(2.2)

2.2. Апсорбована доза

Иако експозициона доза пружа могућност једноставног мерења, хемијске и биолошке промене на ткивима изложеном зрачењу, лакше је довести у везу са енергијом коју је зрачење предало ткиву, него са наелектрисањем које зрачење ствара приликом свог проласка кроз ваздух. Из овог разлога уведена је нова величина, апсорбована доза.

Апсорбована доза се дефинише као однос енергије ΔE коју зрачење преда одређеној маси средине кроз коју се простире:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \left[\mathbf{J} \cdot \mathbf{kg}^{-1} = \mathbf{Gy} \right]$$
(2.3)

Енергија ΔE се мери у џулима и она представља разлику укупне енергије свих директних и индиректних јонизујућих честица које уђу у посматрану запремину и укупне енергије честица које изађу из ње. Овако дефинисана енергија представља само ону енергију која заиста и остане у посматраној запремини [3].

Такође, и у овом случају можемо дефинисати јачину апсорбоване дозе као количник примљене дозе и времена озрачивања:

$$\dot{D} = \frac{D}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta E \cdot \Delta m} [\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}]$$
(2.4)

где је *∆t* дужина трајања озрачивања.

2.3. Еквивалентна доза

Познавање апсорбоване дозе није довољан податак да би се могао увидети настанак штетних ефеката зрачења. Биолошки ефекти зрачења који се манифестују на ткиву зависе од врсте примењеног зрачења. Из тог разлога ICRP¹ уводи нову величину, еквивалентну дозу.

Еквивалентна доза је дефинисана следећом релацијом:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \left[\mathbf{J} \cdot \mathbf{kg}^{-1} = \mathbf{S} \mathbf{v} \right]$$
(2.5)

где $D_{T,R}$ представља апсорбовану дозу у органу или ткиву Т под дејством зрачења врсте R, а W_R представља радијациони тежински фактор, који је карактеристика одређене врсте зрачења [4]. Вредности радијационих тежинских фактора приказани су у Табели 1.

¹ International Commission on Radiological Protection – Међународна комисија за заштиту од зрачења

Врста зрачења и енергетски опсег	Радијациони тежински фактор, <i>W_R</i>
Фотони, свих енергија	1
Електрони и миони, свих енергија	1
Неутрони, енергија < 10 keV	5
Неутрони енергија од 10 до 100 keV	10
Неутони енергија од 100 keV до 2 MeV	20
Неутрони енергија од 2 MeV до 20 MeV	10
Неутрони енергија > 20 MeV	5
Протони, сем узмаклих протона, енергије > 2 MeV	5
Алфа честице, фисиони фрагменти, тешка језгра	20

Табела 1 Вредности радијационих тежинских фактора [7]

2.4. Ефективна доза

Ефекат зрачења не зависи само од врсте употребљеног зрачења, већ и од врсте ткива које се озрачује. То значи да са истом еквивалентном дозом не постижемо исти ефекат зрачења на различита ткива.

ICRP дефинише ефективну дозу Е према следећој релацији:

$$E = \sum_{T} W_T \cdot H_T = \sum_{T} W_T \sum_{R} W_R D_{T,R} \quad [Sv]$$
(2.6)

где W_T представља ткивни тежински фактор, који је карактеристика одређеног ткива или органа, а H_T еквивалентну дозу у ткиву или органу Т [4]. Вредности ткивних тежинских фактора приазани су у табели 2.

Ткиво или орган	W_T	ΣW_T
Костна срж (црвена), дебело црево, плућа, желудац, дојке, преостали	0,12	0,72
органи ²		
Гонаде	0,08	0,08
Мокраћна бешика, једњак, јетра, штитаста жлезда	0,04	0,16
Кости, мозак, пљувачне жлезде, кожа	0,01	0,04
Укупно:		1,00

Табела 2 Вредности ткивних тежинских фактора [7]

2.5. Оперативне дозиметријске величине

Оперативне дозиметријске величине, амбијентални, дирекциони и лични еквивалент дозе су уведени због тога што су еквивалентна и ефективна доза немериве величине – дефинисане су за цео орган или ткиво, односно за цело тело. С друге стране,

² Преостали органи су: надбубрежне жлезде, мозак, екстраторакална регија, жучна кеса, срце, бубрези, лимфни чворови, мишићно ткиво, усна дупља, панкреас, простата, танка црева, слезина, тимус, материца/грлић

оперативне величине, амбијентални, дирекциони и лични еквивалент дозе, су дефинисане у тачки и мериве су. Оне су повезане са апсорбованом дозом преко фактора квалитета. Ове величине се могу довести у везу и са кермом у ваздуху, што се најчешће користи у метрологији.

2.5.1. Амбијентални еквивалент дозе

Амбијентални мониторинг јонизујућег зрачења заснива се на мерењу еквивалента дозе који би постојао унутар фантома који је по саставу сличан људском телу. У ту сврху се користи ICRU фантом који представља ткивно-еквивалентну сферу пречника 30 cm, густине 1 g cm⁻³ и састава 76,2 % кисеоника, 11,1 % угљеника, 10,1 % водоника и 2,6 % азота [8].

Амбијентални еквивалент дозе $H^*(d)$ представља еквивалент дозе која би се мерила на дубини d у ICRU сфери, која је постављена у смеру супротном од смера простирања проширеног и усмереног поља зрачења. За јако пенетрирајуће зрачење дефинише се дубина од 10 mm, а за слабо пенетрирајуће зрачење дубина од 0,07 mm [4, 8].

2.5.2. Дирекциони еквивалент дозе

Уколико се амбијентални мониторинг врши на нивоу екстремитета или очног сочива, може се дефинисати величина дирекциони еквивалент дозе. Дирекциони еквивалент дозе $H'(d, \Omega)$ представља еквивалент дозе у тачки која се налази у проширеном (неусмереном) пољу зрачења на дубини d унутар ICRU сфере, на пречнику сфере под правцем одређеним просторним углом Ω [4].

2.5.3. Лични еквивалент дозе

У случају индивидуалног мониторинга приликом прорачуна потребно је узети у обзир и расејано зрачење које настаје при интеракцији примарног снопа зрачења са телом. Према томе, дефинише се оперативна дозиметријска величина која представља еквивалент дозе на дубини d у ткиву, испод одређене тачке на површини тела. Лични еквивалент дозе Hp(d) се дефинише за јако продируће и слабо продируће зрачење, на дубинама од 10 mm и 0,07 mm, респективно, као и на дубини од 3 mm посебно дефинисаној за очно сочиво [4].

2.6. Керма

У Међународном систему јединица SI радијациона величина експозиција замењена је величином "керма у ваздуху" (air kerma). Назив Kerma потиче од скраћенице Kinetic Energy Released per unit Mass, односно количина енергије која се ослободи по јединици масе. Керма је одређена релацијом:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad [Gy] \tag{2.7}$$

И представља количник збира свих почетних кинетичких енергија наелектрисаних честица ослобођених јонизујућим зрачењем *dE*_{tr} у материјалу масе *m*.

Јачина керме се дефинише следећом релацијом:

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad [Gy \cdot s^{-1}] \tag{2.8}$$

где *dК* представља промену керме у временском интервалу *dt*.

У области заштите од зрачења најчешће се користи керма у ваздуху, односно јачина керме у ваздуху [8].

У метрологији доза заштите од зрачења, према стандарду ISO 4037 1-3:2019 [11], керма у ваздуху се најчешће користи као референтна величина. Кориснички дозиметри се еталонирају или испитују тако што се референтне вредности керме у ваздуху помноже конверзионим факторима да би се добиле референтне вредности оперативних величина.

3. ДЕТЕКТОРИ ЗРАЧЕЊА

Детектори зрачења су сви уређаји који врше регистровање јонизујућег зрачења, као и мерење било које релевантне особине зрачења. Најједноставнији уређаји могу само дати информацију да ли је неки простор изложен зрачењу или не, док напреднији уређаји могу мерити и неке од карактеристика зрачења. У ужем смислу речи "детектор" подразумева се објекат у ком се дешава интеракција зрачења са материјом услед чега се као резултат добија неки сигнал или слика. Добијени сигнал или слика се потом даље обрађују како би се добила информација о неком својству зрачења или тела које га емитује.

На основу једне од подела све детекторе зрачења можемо поделити у две велике групе, интегралне и диференцијалне детекторе. Интегрални детектори се најчешће користе као дозиметри, зато што је помоћу њих могуће измерити укупан интензитет зрачења. За разлику од њих, диференцијални детектори имају способност регистровања појединачних честица зрачења [3].

Најраспрострањенији и најчешће коришћени детектори зрачења су они који услед присуства честица јонизујућег зрачења у њиховој осетљивој запремини производе електричне сигнале. Разликујемо два режима рада електричних дозиметара. У једном режиму депонована енергија се понаша само као окидач за стварање излазног електричног импулса сваки пут када дође до интеракције у детектору. Висина излазног електричног импулса је константна без обзира на количину депоноване енергије или врсту честице зрачења. Други режим рада обухвата детекторе код којих је величина излазног импулса пропорционална количини депоноване енергије у детектору [10].

За потребе овог рада детаљније ћемо описати принцип рада јонизационих комора, Гајгер-Милерових бројача и сцинтилационих детектора.

3.1. Гасни детектори

Сви гасни детектори функционишу на сличан начин. Гас је затворен са две електроде између којих се примењује напонски потенцијал. Инцидентна радијација изазива јонизацију гаса и носиоци наелектрисања се крећу ка електродама због електричног поља које влада између њих. Понашање детектора одређено је јачином

18

електричног поља [2]. У зависности од јачине електричног поља, односно примењеног напона, постоји пет напонских области рада гасних детектора.



Слика 9 Амплитуда сигнала јонизационе коморе у функцији примењеног напона на њеним електродама

На основу графика можемо видети да се у првој области висина сигнала веома брзо повећава са порастом примењеног напона и она се назива област рекомбинације. Међутим, висина напона у овом случају и даље није довољно велика да електрично поље прикупи све јоне створене приликом проласка честице зрачења. Услед слабог електричног поља јони се споро крећу и због тога успевају да се рекомбинују пре него што дођу до електрода. Са порастом напона расте и број јона који доспевају до електроде пре рекомбинације због чега управо и долази до брзог пораста висине сигнала са порастом напона. Ова област нема практичну примену.

У другој области амплитуда излазног сигнала је константна без обзиру на висину примењеног напона. То значи да је напон довољно висок да створи електрично поље које може да привуче све јоне које честица зрачења створи. Ова област се назива област јонизационе коморе и у овој области напона управо и ради јонизациона комора.

Са даљим порастом напона електрони бивају убрзани до те мере да су способни да изазову секундарне јонизације, што доводи до тога да амплитуда сигнала знатно порасте. Ова област се назива област пропорционалне коморе и у њој је излазни сигнал и даље пропорционалан енергији депонованој од стране честице зрачења. Даље повећање напона доводи до бржег раста висине излазног сигнала услед интензивнијег одвијања секундарних и осталих јонизација. У овој области примећујемо појаву нелинеарности, односно висина сигнала не мора нужно бити пропорционална енергији коју је честица зрачења изгубила у гасу. Из тог разлога ову област називамо област ограничене пропорционалности. Детектори ретко раде у овом опсегу напона.

Уколико наставимо даље да повећавамо вредност напона доћи ће до појаве лавинског пражњења и ова област се назива Гајгер-Милерова област. У овом случају висина сигнала не зависи ни од врсте јонизујућег зрачења ни од депоноване енергије. Детектори који раде са овако високим напоном називају се Гајгер-Милерови бројачи. Даље повећање висине напона довело би до неконтролисаног пражњења у гасу што би даље довело до уништења јонизационе коморе [3].

3.1.1. Јонизациона комора

Јонизационе коморе раде у другој области напона и у поређењу са осталим гасним детекторима оне су најједноставније зато што у њиховом случају не долази до секундарних јонизација и стварања новог наелектрисања. Шематски приказ једне јонизационе коморе може се видети на Слици 2. Иако могу бити различитог дизајна, најчешће се користе цилиндричне и сферне јонизационе коморе. Зидови коморе су обично танки и испуњени ваздухом или неким другим гасом под притиском, у зависности од намене. У унутрашњости коморе се налазе две електроде на које се путем спољашњег кола може довести напон. Најширу примену пронашле су као стационарни дозиметри у интегралном режиму рада, мада могу се користити и у диференцијалном режиму за одређивање енергија честица кратког домета [2,3].



Слика 10 Шематски приказ јонизационе коморе

Када се јонизациона комора изложи некој врсти јонизујућег зрачења долази до стварања електрона и позитивних јона који се под дејством електричног поља крећу ка аноди и катоди. Како јонизациона комора у ствари представља кондензатор, она ће се путем спољашњег кола испразнити. Галванометар, који се постави у спољашње коло, регистроваће јачину струје која представља меру зрачењем створеног наелектрисања. На овај начин раде коморе у интегралном режиму.

Претпоставимо да једна честица зрачења улази у јонизациону комору и тамо ствара јоне. Посредством електричног поља електрони и јони бивају прикупљени, а "кондензатор" напуњен. Потом долази до пражњења и мала краткотрајна струја протекне кроз отпорник R, односно детекција сваке појединачне честице изазива ово. Амплитуда и облик сигнала зависе од вредности отпора, капацитивних својстава јонизационе коморе и прикључака, али и од енергије упадне честице зрачења. На овај начин функционишу коморе у диференцијалном режиму [3].

Јонизационе коморе се најчешће користе као референтни дозиметри у метрологији јонизујућег зрачења, због одличних метролошких особина (поновљивост, дуговременска стабилност, добра енергетска зависност).

3.1.2. Гајгер-Милеров бројач

Гајгер-Милерови бројачи се праве у коаксијалној геометрији, најчешће са аргоном као радним гасом. Они раде на тако високом напону да је једна јонизација довољна да изазове лавинско пражњење. У овом случају пражњење је самостално и доводи до стварања велике количине наелектрисања. Због лавинске природе ових детектора, неопходно је да се пражњење заустави како би се могла детектовати наредна честица. То се може постићи на два начина. Први је електронским путем, односно спуштањем напона у моменту кад лавина крене због чега електрони не могу стећи довољно енергије да наставе лавински процес. Други начин подразумева да се поред аргона дода и неки вишеатомски гас у Гајгер-Милерову цев, најчешће алкохолне паре. Њихова улога је да апсорбују фотоне настале деексцитацијом аргона, а да притом не настану нови електрони који би са катоде избијали нове електроне. Молекули алкохолних пара се након апсорпције фотона побуђују и доживљавају дисоцијацију без емисије нових фотона. ГМ бројачи који раде по овом принципу називају се самогасећи [2,3]. Ова врста детектора се може користити само као бројач, зато што висина напонског сигнала не зависи од врсте честице јонизујућег зрачења и њене енергије већ је одређена геометријом Гајгер-Милерове цеви.

Постоји низ предности које ова врста детектора поседује у односу на друге бројаче. Пре свега високи напонски сигнали не захтевају употребу додатне електронике и појачавача. У поређењу са другим гасним детекторима имају велику ефикасност и најчешће се користе за дозиметријску контролу [3].

Одговарајућом калибрацијом, ГМ бројачи се могу користити као дозиметри, тако што се број детектованих догађаја доведе у везу са дозом зрачења. ГМ бројачи најчешће имају изражену енергетску зависност.

3.2. Сцинтилациони детектори

Сцинтилатори су материјали који поседују својство да када честице зрачења пролазе кроз њих, они емитују мали бљесак светлости, сцинтилацију. Број емитованих светлосних фотона пропорционалан је апсорбованој енергији зрачења. Сцинтилациони материјали се могу груписати у две категорије: органски и неоргански. *Органски сцинтилатори* су материјали који су прозирни за сопствену светлост и најчешће се појављују у кристалној форми. То су нафталин, антрацен, стилбен итд. Осим њих, постоје и неке течне супстанце које се могу користити као сцинтилатори. Најпознатије су ксилен и толуен. Када се органски сцинтилатори растворе у чврстој прозирној пластици добијају се пластични сцинтилатори. Друга могућност је да се органски сцинтилатори растварају у органским течностима, те да се добију течни сцинтилатори. Друга велика група су *неоргански сцинтилатори* у облику монокристала и то најчешће натријум-јодида (NaI). Како би и ови материјали били прозирни за сопствену светлост, у малим количинама им се додају примесе, такозвани активатори, који стварају луминисцентне центре. Код већине материјала талијум (TI) се употребљава као активатор [3].

Да би се од неког сцинтилационог материјала направио детектор, потребно је светлосне импулсе, који се емитују приликом проласка зрачења кроз активну запремину, појачати и трансформисати у електричне сигнале који се касније могу лако обрађивати. То се може постићи на следећи начин: емитовани светлосни импулси се претварају у електрични сигнал у фотомултипликаторској цеви, која се састоји од фотосензитивне

22

катоде и низа електрода које се зову диноде. Катода емитује електроне кад је озрачена светлошћу ослобођеном у сцинтилатору. Број електрона који емитује фотокатода пропорционалан је количини светлости која падне на њу. Електрони се убрзавају унутар фотомултипликаторске цеви и ударају у прву диноду, која емитује неколико додатних електрона за сваки електрон који удари у њу [10]. Ови електрони се потом убрзавају и фокусирају ка другој диноди, одакле избијају нове електроне. Процес се наставља до последње диноде, при чему се број електрона умножава за неколико редова величине. Електрони који се потом прикупљају на аноди изазову краткотрајни пад напона на радном отпорнику, а тај сигнал се пренесе на појачавачку електронику. Напонски сигнал који настане услед детекције честице зрачења има сличан облик као код гасних детектора, брз пораст до одређене висине, затим спорији експоненцијални пад [3].

Попут ГМ бројача, сцинтилациони детектори се могу користити као дозиметри, уз одговарајућу калибрацију. Различити типови сцинтилатора имају различите метролошке карактеристике.



Слика 11 Сцинтилациони детектор

4. АМБИЈЕНТАЛНИ ДОЗИМЕТРИ

Амбијентални дозиметри или монитори зрачења су засновани на једном или више детектора зрачења и подешени су тако да показују вредности амбијенталног дозног еквивалента. Амбијентални дозиметри се еталонирају слободно у ваздуху у величини амбијентални еквивалент дозе, према стандарду ISO 4037 [11]. Референтна вредност амбијенталног еквивалента дозе одређује се у референтним пољима помоћу инструмента који треба да буде примарни или секундарни еталон или други одговарајући инструмент, чија се калибрација може пратити до примарног стандарда. Овај инструмент мора бити калибрисан за опсеге енергија и јачине керме у ваздуху за које је планирано да се користи. У ту сврху се најчешће користи јонизациона комора коју чине: осетљива запремина коморе, сабирне и поларизационе електроде, заштитна електрода (уколико постоји), зид коморе, делови изолатора који се налазе уз осетљиву запремину коморе и било које неопходне капе чија је улога да обезбеде електронски еквибрилијум. Дозиметар референтне класе мора да задовољи два услова. Прво, однос максималне и минималне вредности одзива инструмента, R_{max}/R_{min} , не сме да пређе граничне вредности за енергетски опсег у ком ће се стандардни инструмент користити. Друго, уколико је одређен за два различита квалитета зрачења дате серије, а који су суседни један другом, овај однос неће премашивати 1 + 0,4 $\cdot \left[\left(\frac{R_{max}}{R_{min}}\right) - 1\right]$. Уколико се оба захтева не могу испунити за цео опсег, барем други треба бити испуњен [12].

Одзив дозиметра представља однос сигнала дозиметра (број импулса у јединици времена, јонизациона струја) и референтне вредности амбијенталног еквивалента дозе. Одзив дозиметра у општем случају има врло изражену енергетску зависност, посебно за нискоенергетске фотоне. Захтеви за амбијенталне дозиметре су дати у различитим IEC стандардима, као што је IEC 60846-1 [13], према коме релативни одзив у односу на ¹³⁷Cs мора бити од – 29 % до + 67 %. Захтеви су такође дати у неким земљама и националном регулативом. У случају Републике Србије захтеви су прописани Правилником о дозиметрима [14] према коме релативни одзив у односу на ¹³⁷Cs не сме да се разликује за више од 30%.

Испитивање перформанси дозиметријских уређаја је увек актуелно, те постоји низ радова који се баве овом тематиком. У раду Ćeklić et al. [1] добијени резултати су потврдили да амбијентални дозиметри који раде по принципу јонизационе коморе и сцинтилационог бројача имају малу енергетску зависност. ГМ-бројачи су показали снажну енергетску зависност при ниским фотонским енергијама, због чега је у случају тих инструмената неопходно направити корекције. Док рад Kržanović et al. [15] показује како одговор амбијенталних дозиметара који раде по принципу ГМ-бројача варира у зависности од тога да ли је ГМ-бројач компензован или не и уколико јесте, на који начин.

4.1. Поређење амбијенталних дозиметара

Акредитоване лабораторије у складу са ISO/IEC 17025 [16] су у обавези да учествују у међулабораторијским поређењима. Велики број поређења се спроводи на тај начин што се мери амбијентални еквивалент дозе у околини непознатог извора, где није могуће користити јонизационе коморе референтне класе, већ се референтна вредност одређује као средња вредност показивања амбијенталних дозиметара. Међутим, као што је показано у претходном одељку, амбијентални дозиметри могу имати врло изражену енергетску зависност, што даље узрокује померање референтне вредности која је одређена за поређење. У случају да је у поређење укључен велики број дозиметара који нису адекватно енергетски компензовани, може се догодити да дозиметри који имају одзив у складу са захтевима стандарда и правилника не прођу поређење, а да насупрот томе лоши дозиметри прођу поређење.

Други начин за организовање поређења је да се референтне вредности одреде мерилом високог квалитета- дозиметром референтне класе, као што је јонизациона комора. У том случају показивања дозиметара ниског квалитета неће утицати на референтну вредност. Највећи број комерцијално доступних дозиметара је фабрички еталониран у квалитету S-Cs, па је због тога њихов одзив најбољи управо у том квалитету зрачења.

5. ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА И КОРИШЋЕНИ ИНСТРУМЕНТИ

Експеримент је изведен са циљем испитивања усаглашености произвођачких спецификација амбијенталних дозиметара, њиховог одговора у Х- и γ - референтним пољима, а у поређењу са критеријумима међународног Стандарда IEC 60846-1 [13] и Правилника о дозиметрима [14]. У ову сврху коришћено је пет различитих дозиметара, са три различите врсте детектора: јонизационом комором, Гајгер-Милеровим бројачем и сцинтилационим детектором. Основне карактеристике коришћених дозиметара приказане су у Табели 2 [17, 18, 19, 20, 21]. Поменута Х- и γ - референтна поља реализована су према ISO 4037-1 стандарду [9] у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине у Институту за нуклеарне науке "Винча". Коришћена су четири стандардна квалитета зрачења: ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co и квалитети Х-зрачења генерисани помоћу генератора Х-зрачења Нореwell Designs X80-225 kV-Е. Време експозиције је за све уређаје било једнако, а мерења су извршена у седам различитих поставки, од којих су четири стандардне, а три нестандардне поставке.

		Нр	(10)		Реф.
Модел	Произвођач	min [µSv/h]	max [mSv/h]	Тип	квалитет зрачења
6150 AD-b	Automess	0,01	0,1	Сцинтилациони детектор	S-Cs
6150 AD6	Automess	0,1	10	Г-М бројач	S-Cs
451P	Victoreen	0	50	Јонизациона комора	S-Cs
Gamma- scout	Gamma-scout gmbh	0,01	1	Г-М бројач	S-Cs
DMRZ-M15	Институт за нуклеарне науке "Винча"	0,1	1	Г-М бројач	S-Co

Табела 3 Основне карактеристике дозиметара употребљених у експерименту

Прве две стандардне поставке реализоване су у референтним пољима γ -зрачења помоћу радионуклида ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co. Приликом употребе извора ⁶⁰Co дозиметри су постављани на растојање R = 340,3 cm. Док приликом мерења са извором ¹³⁷Cs ово растојање је износило R = 227,5 cm. Паралелно са праћењем одзива дозиметра бележили

смо и фон. У случају овог дела експеримента температура, притисак и релативна влажност су износили: t = 23,4 °C, p = 1000 mbar и rv = 80 %.

Преостале две стандардне поставке подразумевале су испитивање у Х-референтним пољима, стандардним квалитетима N-80 и N-200. Поставка овог дела експеримента приказана је на Сликама 12, 13, 14 и 15. Како би се ова поља могла генерисати, примењени су параметри излагања приказани у Табели 4 [9]. Приликом извођења овог дела експеримента температура и притисак су имали следеће вредности, t = 22,6 °C и p = 1001 mbar.

N-серија	Напон [kV]	Ефективна енергија [keV]	Струја [mA]
N-80	80	65,2	0,33
N-200	200	165	0,24

Табела 4 Параметри излагања у пољу Х-зрачења



Слика 12 (лево) Дозиметар Automess 6150 AD-b Слика 13 (десно) Дозиметар Automess 6150 AD6



Слика 14 (лево) Дозиметар DMRZ-M15 Слика 15 (десно) Дозиметар Victoreen 451P

Прва од три нестандардне поставке подразумевала је постављање дозиметра у поље зрачења непознатог извора, приликом чега смо пратили његов одзив. Преостале две нестандардне поставке представљале су симулирана поља из радне средине. Најпре смо мерили одзив дозиметра приликом директног контакта са оклопљеним извором ⁶⁰Co. Током треће нестандардне поставке мерили смо расејано зрачење у пољу X-зрачења помоћу фантома. Поставка експеримента приказана је на Сликама 16, 17 и 18. Том приликом напон и струја су били постављени на вредности, U = 120 kV и I = 0,5 mA, коришћен је квалитет RQT9, а отвор колиматора је био постављен на 2,1 cm. Балон са водом је представљао фантом, а растојање између извора зрачења и фантома износило је 1 m, док је растојање између фантома и дозиметра износило 1,60 m.





Слика 16 (горе лево) Дозиметар Victoreen 451P Слика 17 (горе десно) Дозиметар Automess 6150 AD6 Слика 18 (доле) Дозиметар Automess 6150 AD-b

5.1. Обрада резултата

За сврху поређења дозиметара, рачунате су две врсте референтне вредности. Привидна референтна вредност је рачуната као средња вредност показивања свих амбијенталних дозиметара, као што би било рачунато у интеркомпарацији у којој није доступно мерило референтне класе. Привидна референтна вредност је израчуната за свих 7 поређења. Права референтна вредност је рачуната на основу мерења мерилом референтне класе, односно јонизационом комором са електрометром. Права референтна вредност је рачуната само за референтне квалитете зрачења. Резултати су коментарисани на основу Правилника о дозиметрима [14] према ком одговор дозиметра не сме да се разликује за више од 30% за све испитиване квалитете зрачења у односу на одговор за референтни квалитет зрачења и на основу Стандарда IEC 60846-1 [13] који има другачије критеријуме када је у питању енергетска зависност, те према њему релативан одзив у односу на референтни квалитет зрачења мора бити од -29% до +67%. Референтни квалитет за највећи број дозиметара је 137 Cs.

Приликом овог рада није узета у обзир мерна несигурност референтних вредности. Међутим, да се мерна несигурност узимала у обзир, резултати који су били на граници би ипак задовољили захтеве критеријума. Мерна несигурност за релативан одзив обично износи око 8%.

6. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

6.1. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу γ-зрачења извора ¹³⁷Сs

Резултати мерења изведеног у референтном пољу γ -зрачења извора ¹³⁷Cs приказани су у Табели 5. Растојање између извора зрачења и дозиметра износило је R = 227,5 cm. Показивања дозиметара су коригована на фон зрачења. Поређења одступања одзива дозиметара у односу на праву и привидну референтну вредност приказана су у Табели 6.

Портисотот	Фон	H*(10)
дозиметар	[µSv/h]	[µSv/h]
	0,077	47,7
	0,075	47,8
Automess 0150 AD-D S/N 100294	0,080	47,9
5/IN 109204	0,081	48,0
	0,079	48,0
	0,06	46,8
Automage (150 ADC	0,05	46,1
Automess 0150 AD0 S/N 100734	0,03	45,9
S/IN 107734	0,02	47,4
	0,01	47,7
	0,10	44
Victorian 151D	0,09	45
VICTOREEN 451F S/N 1807	0,08	46
5/11 1007	0,07	45
	0,07	44
	0,10	55,51
Commo coout	0,12	55,08
S/N 017666	0,14	55,51
5/11 01/000	0,13	55,24
	0,12	54,79
	0,076	41,36
DMP7_M15	0,074	39,95
DMRZ-M15 S/N 9	0,067	39,62
	0,079	40,53
	0,072	39,70

Табела 5 Резултати мерења изведеног у референтном пољу ү-зрачења извора ¹³⁷Cs

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ- M15 S/N 9
Средња вредност	47,8	46,7	44,7	55,1	40,2
Привидна референтна вредност	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9
Одступање	2%	0%	-5%	17%	-14%
Права референтна вредност	50	50	50	50	50
Одступање	-4%	-7%	-11%	10%	-20%

Табела 6 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну

вредност

На основу вредности приказаних у Табели 6. можемо видети да су резултати мерења веома блиски једни другима, што је последица чињенице да сви дозиметри имају релативно раван енергијски одзив у околини 137 Cs, али и да је већина њих калибрисана управо у спектру 137 Cs. Без обзира да ли добијена одступања поредимо са Правилником о дозиметрима [14] или са Стандардом IEC 60846-1 [13], можемо примети да сви дозиметри задовољавају захтеве. Разлика између праве и привидне референтне вредности је у овом случају мања од 10% и резултати поређења не зависе од тога која се референтна вредност изабере.





6.2. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу γ-зрачења извора ⁶⁰Со

Резултати мерења изведеног у референтном пољу γ -зрачења извора ⁶⁰Со приказани су у Табели 7. Растојање између извора зрачења и дозиметра износило је R = 340,3 cm. Показивања дозиметара су коригована на фон зрачења. Поређења одступања одзива дозиметара у односу на праву и привидну референтну вредност приказана су у Табели 8.

Портикатор	መ ልም [።ናም/ b]	H*(10)
дозиметар	Φομ [μδν/n]	[µSv/h]
	0,077	52,6
Automess 6150 AD-b	0,075	52,5
	0,080	52,6
5/IN 109204	0,081	52,5
	0,079	52,6
	0,06	63,1
Automage 6150 AD6	0,05	63,4
Automess 0150 AD0 S/N 100734	0,03	62,6
S/IN 107754	0,02	64,5
	0,01	65,3
	0,10	46
Victorian 151D	0,09	47
VICTOREEII 451F S/N 1807	0,08	48
B/IN 1007	0,07	47
	0,07	46
	0,10	69,95
Commo coout	0,12	69,30
Gamma-scout S/N 017666	0,14	68,66
S/11 01/000	0,13	69,17
	0,12	69,11
	0,076	50,83
DMD7 M15	0,074	49,8
DMRZ-M15 S/N 9	0,067	50,37
	0,079	49,63
	0,072	52,46

Табела 7 Резултати мерења изведеног у референтном пољу ү-зрачења извора 60Со

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	52,5	63,7	46,7	69,1	50,5
Привидна референтна вредност	56,5	56,5	56,5	56,5	56,5
Одступање	-7%	13%	-17%	22%	-11%
Права референтна вредност	50	50	50	50	50
Одступање	5%	27%	-7%	38%	1%

Табела 8 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну вредност

Узевши у обзир високу енергију ⁶⁰Со, дозиметри у његовој околини имају релативно раван енергијски одговор. То такође можемо приметити и на основу добијених вредности одступања. Једино дозиметар Automess 6150 AD6 не задовољава критеријуме Правилника о дозиметрима [14], док сви остали дозиметри задовољавају критеријуме преписане од стране Правилника о дозиметрима [14] и Стандарда IEC 60846-1 [13].

Разлика између праве и привидне референтне вредности је у овом случају 13%.





6.3. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу Х-зрачења квалитета N-80

Резултати мерења изведеног у пољу Х-зрачења, квалитета N-80, приказани су у Табели 9. На основу ових појединачних мерења одредили смо референтну вредност као средњу вредност свих добијених резултата. С обзиром да је у питању стандардна поставка доступне су нам и праве референтне вредности, те смо могли одредити одступања одзива дозиметара у односу на ове две референтне вредности. Ти резултати су приказани у табели 10.

Π	H*(10)	H*(10)
дозиметар	[µSv/h]	[µSv/h]
	0,114	35,6
Automess 6150	0,086	36,2
AD-b	0,078	36,2
S/N 109284	0,089	36,2
	0,082	36,1
	0,02	28,4
Automess 6150	0,06	27,5
AD6	0,06	27,9
S/N 109734	0,08	25,7
	0,07	28,3
	0,06	44
Victorian 151D	0,12	45
VICTOREEII 451F S/N 1807	0,07	44
5/11 1007	0,17	45
	0,14	45
	0,12	137,6
Commo coout	0,10	117,7
S/N 017666	0,06	127,1
5/11 01/000	0,09	145,4
	0,09	143,7
	0,064	112,6
DMP7_M15	0,073	111,7
DMRZ-M15 S/N 9	0,081	110,2
	0,073	110,1
	0,055	111,9

Табела 9 Резултати мерења изведени у пољу X-зрачења серије квалитета N-80

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	36,0	27,5	44,5	134,2	111,2
Привидна референтна вредност	70,7	70,7	70,7	70,7	70,7
Одступање	-49%	-61%	-37%	90%	57%
Права референтна вредност	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2
Одступање	-27%	-44%	-10%	173%	126%

Табела 10 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну

вредност

При интеракцији са нискоенергетским фотонима, што је случај код ове серије квалитета где је средња енергија 65,2 keV, дозиметри су показали највећа одступања у поређењу са преосталим стандардним поставкама. Поменута енергетска зависност посебно је изражена код Гајгер-Милерових бројача, што је познато и очекивано из теорије. Међутим, као последица тога, они себи привлаче референтну вредност, те иначе добри дозиметри показују већа одступања. Такође, можемо приметити и у којој мери се права и привидна референтна вредност разликују, па самим тим и драстичну разлику између израчунатих одступања.

Уколико вршимо поређење одступања са Правилником о дозиметрима [14] у случају привидне референтне вредности ниједан дозиметар не задовољава критеријуме. Највеће одступање 90% примећујемо у случају дозиметра Gamma-scout, а најмање у случају дозиметара Automess 6150 AD-b и Victoreen 451P. Исти случај је уколико посматрамо и одступања у односу на праву референтну вредност, с тим што тада Automess 6150 AD-b и Victoreen 451P задовољавају критеријуме Правилника.

Када одступања поредимо са Стандардом IEC 60846-1 [13] у односу на привидну референтну вредност, једино дозиметар Gamma-scout задовољава критеријум, што је још један показатељ како ова врста дозиметра привлачи себи референтну вредност. Међутим, уколико поређења одступања вршимо у односу на праву референтну вредност можемо видети да исти дозиметар одступа чак 173%. У овом случају поново иста два дозиметра задовољавају критеријуме Стандарда IEC 60846-1 [13] .

Дозиметри Automess 6150 AD-b и Victoreen 451P су показали најбоља слагања и са Правилником о дозиметрима [14] и са Стандардом IEC 60846-1 [13] због своје високе осетљивости и широког енергетског опсега мерења који су се показали добрим и за ниске нивое зрачења [17, 19].



Слика 21 Графички приказ одступања одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну вредност

6.4. Поређење амбијенталних дозиметара у референтном пољу Х-зрачења квалитета N-200

Резултати мерења изведеног у пољу Х-зрачења серије квалитета N-200 приказани су у Табели 11. Поређења одступања одзива дозиметара у односу на праву и привидну референтну вредност приказана су у Табели 12.

Дозиметар	$H^{*}(10)$
	<u>کې</u>
Automess 6150 AD-b S/N 109284	39,1
	39,4
	39,8
	39,1
	33,4
Automess 6150 AD6 S/N 109734	33,4
	33
5/11 107/34	33,3
	34,4
V' 4 471D	36
	36
Victoreen 451F	37
5/IN 1807	36
	38
	66,94
	64,47
Gamma-scout	65,12
S/N 017666	66,14
	66,46
	43.05
	43.89
DMRZ-M15	41.11
S/N 9	41.45
	43.11

Табела 11 Резултати мерења изведени у пољу X-зрачења серије квалитета N-200

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	39,2	33,4	36,5	65,7	42,5
Привидна референтна вредност	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
Одступање	-10%	-23%	-16%	51%	-2%
Права референтна вредност	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2
Одступање	-20%	-32%	-26%	34%	-14%

Табела 12 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну вредност

У случају серије квалитета N-200, с обзиром да су у питању веће енергије, добијене вредности су боље у поређењу са претходном поставком и одступања су мања.

Уколико резултате коментаришемо на основу одступања од привидне референтне вредности, а у поређењу са Стандардом IEC 60846-1 [13] можемо приметити да сви дозиметри задовољавају критеријуме. Иста је ситуација уколико ово поређење вршимо на основу одступања од праве референтне вредности. Дакле, поново сви дозиметри задовољавају критеријуме Стандарда IEC 60846-1 [13].

Захтеве Правилника о дозиметрима [14], а у случају одступања од привидне референтне вредности, задовољавају сви уређаји. Ситуација је идентична и са одступањима у односу на праву референтну вредност, односно сви дозиметри задовољавају захтеве Правилника о дозиметрима [14].



Слика 22 Графички приказ одступања одзива дозиметара у односу на привидну и праву референтну вредност

6.5. Поређење амбијенталних дозиметара у мешовитом пољу непознатог

извора

Поређење дозиметара је вршено у мешовитом пољу непознатих извора зрачења, приликом чега је праћен одзив дозиметара и упоредо је мерен фон, чији је допринос одузет приликом рачуна. Добијени резултати су приказани у Табели 13. Како је у питању нестандардна поставка, праве референтне вредности нам нису биле доступне те су одступања рачуната на основу израчунате референтне вредности која је добијена као средња вредност свих измерених вредности. Табела 14. приказује те резултате.

Поринотор	Фон	H* (10)
дозиметар	[µSv/h]	[µSv/h]
	0,078	3,63
Automess 6150 AD-b S/N 109284	0,070	3,66
	0,066	3,65
	0,063	3,64
	0,061	3,64
	0,08	3,73
Automoss 6150 AD6	0,14	3,58
Automess 0150 AD0 S/NI 100724	0,09	3,06
5/1N 109734	0,12	3,67
	0,13	4,02
Vistanson 451D	0,05	4,1
	0,06	4,0
S/N 1807	0,07	3,8
5/11 1007	0,05	3,9
	0,08	3,8
	0,07	5,61
Commo coout	0,09	5,68
S/N 017666	0,10	5,54
5/11 01/000	0,13	5,49
	0,14	5,76
	0,095	2,93
DMD7 M15	0,096	2,93
	0,134	3,13
D/1N 7	0,090	3,28
	0,076	3,29

Табела 13 Резултати мерења изведеног у мешовитом пољу непознатог извора

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	3,6	3,6	3,8	5,5	3,0
Привидна референтна вредност	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Одступање	-9%	-8%	-2%	41%	-22%

Табела 14 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну референтну вредност

На основу добијених вредности одступања можемо видети да сви дозиметри задовољавају критеријуме Стандарда IEC 60846-1 [13] и Правилника о дозиметрима [14].



Слика 23 Графички приказ одступања дозиметара у односу на привидну референтну вредност

6.6. Поређење амбијенталних дозиметара приликом директног контакта са оклопљеним извором ⁶⁰Со

Поставка овог дела експеримента подразумевала је да дозиметри буду у директном контакту са оклопљеним извором ⁶⁰Со. Поред одзива дозиметра, праћен је и ниво фона, чији је допринос одузет приликом рачуна. Добијени резултати су приказани у Табели 15. Како је у питању нестандардна поставка, праве референтне вредности нам нису биле доступне те су одступања рачуната на основу израчунате референтне вредности која је добијена као средња вредност свих измерених вредности. Табела 16. приказује те резултате.

Портокотот	Фон	H* (10)
дозиметар	[µSv/h]	[µSv/h]
	0,077	5,01
Automess 6150 AD-b	0,075	5,05
Automess 0150 AD-D	0,080	5,08
5/IN 109284	0,081	5,09
	0,079	5,07
	0,06	4,80
Automass 6150 AD6	0,05	5,28
Automess 0150 AD0 S/NI 100724	0,03	4,96
5/11 109734	0,02	4,78
	0,01	5,64
	0,10	4,6
Victorian 451D	0,09	4,7
S/N 1807	0,08	4,3
5/11 1807	0,07	5,2
	0,07	4,6
	0,10	4,75
Commo socut	0,12	4,85
S/N 017666	0,14	5,25
5/11 01/000	0,13	5,15
	0,12	5,13
	0,076	5,90
DMD7 M15	0,074	5,96
	0,067	5,84
0/1N 7	0,079	5,79
	0,072	5,75

Табела 15 Резултати мерења изведеног приликом директног контакта са оклопљеним

извором 60Со

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma- scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	5,0	5,1	4,6	4,9	5,8
Привидна референтна вредност	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Одступање	-2%	0%	-9%	-3%	14%

Табела 16 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну референтну вредност

Резултати добијени у овом делу експеримента показују врло мала одступања, те задовољавају критеријуме и Стандарда IEC 60846-1 [13] и Правилника о дозиметрима [14]. Разлог доброг понашања дозиметара је релативно висока средња енергија фотона.



Слика 24 Графички приказ одступања одзива дозиметара у односу на привидну референтну вредност

6.7. Поређење амбијенталних дозиметара приликом мерења расејаног

зрачења у пољу Х-зрачења

Трећа нестандардна поставка, која је представљала симулацију радног окружења у дијагностичкој радиологији подразумевала је испитивање одзива дозиметара у пољу расејаног зрачења користећи балон испуњен водом који је представљао фантом. У радној и животној средини обављају се мерења јачине амбијенталног еквивалента дозе континуирано, стационарним мерним уређајем, преносним мерним уређајима и пасивним дозиметрима. Праћење индивидуалних доза радника у рендген дијагностици обавља се у зависности од нивоа изложености помоћу пасивнх личних дозиметара или мерењем амбијенталног еквивалента дозе у значајним тачкама за услове снимања и просветљавања. Мерење амбијенталног еквивалента дозе се обавља најмање једном годишње, а обавезно после сваке замене редген цеви или после радова на високонапонском генератору и другим виталним деловима (фототајмеру, аутоматици) [7].

Добијени резултати приказани су у Табели 17. Поново, с обзиром да је у питању нестандардна поставка, референтна вредност је рачуната као средња вредност свих мерења, те су онда одступања израчуната у односу на њу. Ти резултати су приказани у Табели 18.

Порумотор	H* (10)
дозиметар	[µSv/h]
	62
Automore (150 AD h	62,5
S/N 109284	62,6
	62,5
	62,5
	33,9
Automess 6150 AD6 S/N 109734	28,5
	29,3
	29,3
	27,3
	60
Viotoroon 151D	61
VICTOREEII 451P S/N 1907	59
5/IN 1007	60
	60
	221,7
Commo coout	222
Gamma-scout S/N 017666	241,9
5/10 01/000	246,8
	246,5
	156
DMD7 M15	156,1
DWIKZ-WI15 S/N 0	158,7
0/1N 7	156,9
	157,4

Табела 17 Резултати мерења изведеног у пољу расејаног зрачења Х-зрачења

Дозиметар	Automess 6150 AD-b S/N 109284	Automess 6150 AD6 S/N 109734	Victoreen 451P S/N 1807	Gamma-scout S/N 017666	DMRZ-M15 S/N 9
Средња вредност	62,3	29,6	59,9	235,7	156,9
Привидна референтна вредност	108,9	108,9	108,9	108,9	108,9
Одступање	-43%	-73%	-45%	116%	44%

Табела 18 Одступање одзива дозиметара у односу на привидну референтну вредност

У поређењу са претходне две нестандардне поставке, ова је показала највећа одступања приликом мерења. Ниједан дозиметар не задовољава критеријуме Правилника о дозиметрима [14], док када посматрамо Стандард IEC 60846-1 [13] једино је одступање

уређаја DMRZ-M15 било у дозвољеном оквиру. Разлог за велика одступања представља мала средња енергија фотона (максимална енергија фотона у примарном снопу је 120 keV), као и чињеница да поље зрачења није усмерено, па долази до изражаја и угаона зависност дозиметара. Потребно је узети у обзир да у овом случају није била утврђена права референтна вредност, па тако и закључке поређења треба узети са резервом.



Слика 25 Графички приказ одступања одзива дозиметара у односу на привидну референтну вредност

6.8. Енергетска зависност дозиметара

Испитивање енергетске зависности дозиметара обавља се у опсегу енергија који је дефинисан произвођачким упутством. Испитивање се обавља у следећим квалитетима зрачења: N-40, N-60, N-100, N-200, ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co. Уколико неки од квалитета зрачења није могуће остварити, испитивање се обавља у другом стандардном квалитету који је близак по средњој енергији са наведеним квалитетима зрачења.

Сматра се да је активни дозиметар испунио захтеве уколико се његов одговор за све испитиване квалитете зрачења не разликује за више од 30%, увећано за мерну несигурност референтних вредности са фактором проширења 2, у односу на одговор за квалитет ¹³⁷Cs, према захтевима Правилника о дозиметрима [14]. Односно, на основу Стандарда IEC 60846-1 [13] који има другачије критеријуме када је у питању енергетска зависност, релативан одзив дозиметра у односу на референтни квалитет зрачења мора бити од – 29 % до + 67 %.

6.8.1. Апсолутан и релативан одзив дозиметара према правим референтним

вредностима

У табелама 19. и 20. су приказани апсолутни и релативни одзив дозиметара према правим референтним вредностима, респективно.

Дозиметар	Cs-137	Co-60	N-80	N-200
Automess 6150	0,96	1,05	0,73	0,80
AD-b				
Automess 6150	0,93	1,27	0,56	0,68
AD6				
Victoreen 451P	0,89	0,93	0,90	0,74
Gamma-scout	1,10	1,38	2,73	1,34
DMRZ-M15	0,80	1,01	2,26	0,86

Табела 19 Апсолутни одзив дозиметара према правим референтним вредностима

Дозиметар	Cs-137	Co-60	N-80	N-200
Automess 6150 AD-b	1,00	1,10	0,76	0,83
Automess 6150 AD6	1,00	1,36	0,60	0,73
Victoreen 451P	1,00	1,04	1,01	0,83
Gamma-scout	1,00	1,25	2,48	1,21
DMRZ-M15	0,79	1,00	2,24	0,85

Табела 20 Релативни одзив дозиметара према правим референтним вредностима

6.8.2. Апсолутан и релативан одзив дозиметара према привидним референтним

вредностима

У табелама 21. и 22. су приказани апсолутни и релативни одзив дозиметара према привидним референтним вредностима, респективно.

Дозиметар	Cs-137	Со-60	N-80	N-200	Мешовито поље непознатог извора	Со-60 у заштити	Расејано зрачење
Automess 6150 AD-b	1,02	0,93	0,51	0,90	0,91	0,98	0,57
Automess 6150 AD6	1,00	1,13	0,39	0,77	0,92	1,00	0,27
Victoreen 451P	0,95	0,83	0,63	0,84	0,98	0,91	0,55
Gamma-scout	1,17	1,22	1,90	1,51	1,41	0,97	2,16
DMRZ-M15	0,86	0,89	1,57	0,98	0,78	1,14	1,44

Табела 21 Апсолутни одзив дозиметара према привидним референтним вредностима

Дозиметар	Cs-137	Со-60	N-80	N-200	Мешовито поље непознатог извора	Со-60 у заштити	Расејано зрачење
Automess 6150 AD-b	1,00	0,91	0,50	0,88	0,9	0,97	0,56
Automess 6150 AD6	1,00	1,13	0,39	0,77	0,92	1,00	0,27
Victoreen 451P	1,00	0,87	0,66	0,88	1,03	0,95	0,58
Gamma-scout	1,00	1,04	1,62	1,29	1,20	0,82	1,84
DMRZ-M15	0,96	1,00	1,76	1,09	0,87	1,28	1,61

Табела 22 Релативни одзив дозиметара према привидним референтним вредностима

ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада био је испитивање и поређење енергетске зависности амбијенталних дозиметара приликом излагања различитим изворима зрачења. Референтна поља реализована су према Стандарду IEC 4037-1 [11]. За изворе γ -зрачења коришћени су ⁶⁰Со и ¹³⁷Cs, док су поља рендгенског зрачења генерисана помоћу рендген јединице Hopewell Designs X80-225 kV-E. Експеримент је изведен са пет дозиметара различитих произвођача и спецификација и то: јонизациона комора Victoreen 451P, Гајгер-Милерови бројачи Automess 6150 AD6, Gamma-scout и DMRZ-M15 и сцинтилациони детектор Automess 6150 AD6, Peaлизација експеримента подразумевала је испитивања у седам различитих поставки, од којих су четири биле стандардне, а три нестандардне. Добијени резултати су коментарисани на основу Стандарда IEC 60846-1 [13] и Правилника о дозиметрима [14].

Резултати овог испитивања показују да у случају високих енергија, било да су у питању извори Х- или γ-зрака, дозиметријски уређаји имају релативно раван енергијски одзив и задовољавају неопходне критеријуме. Међутим, како се померамо ка нижим енергијама, упоредивост различитих дозиметара је лошија и енергетски некомпензовани дозиметри, попут Гајгер-Милерових бројача, све више одступају од референтних вредности. Као последица тога, они утичу на средњу вредност, те други дозиметри показују већа одступања него што би иначе. Ово је посебно дошло до изражаја у поставци експеримента са серијом квалитета Х-зрачења N-80 и приликом праћења одзива дозиметра у пољу расејаног зрачења. Приликом овог рада није узета у обзир мерна несигурност. Међутим, да је мерна несигурност узета у обзир, резултати који су били на граници би заправо задовољили неопходне критеријуме.

Добијени резултати су свакако у складу са оним што теорија предвиђа [1]. Некомпензовани Гајгер-Милерови бројачи показују велику енергетску зависност при ниским енергијама, због чега нису погодни за употребу у том енергетском распону. Са друге стране, јонизациона комора и сцинтилациони бројач су показали да поседују слабу зависност од употребљене енергије зрачења, те да су погодни за тачна и брза мерења ниског нивоа зрачења, што и видимо када одступања поредимо са правим референтним вредностима. Наведене особине дозиметара је важно узети у обзир приликом интеркомпарација како би оне биле веродостојне, јер у супротном квалитетни дозиметри могу испасти ван оквира захтева критеријума.

Литература

- [1] S. Ćeklić, D. Aranđić, M. Živanović, O. Ciraj-Bjelac i Đ. Lazarević, "Performance of Radiation Survey meters in X- and gamma-radiation fields," Radiation Protection Dosimetry, t. 162, br. 1-2, pp. 139-143, 2014.
- [2] Pavelić L, Lacković I, Mihić MS, Prlić I. "A techonology overview of active ionizing radiation dosemeters for photon fields" Radiation Protection Dosimetry, t. 188, br. 3, pp. 361-371, 2020.
- [3] Крмар, М. Увод у нуклеарну физику. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, 2013.
- [4] Кржановић Никола, Испитивање активних електронских дозиметара у циљ хармонизације мерења оспративних дозиметријских величина у области заштите од зрачења. Докторска дисертација, 2019.
- [5] Јањић, И. Основи атомске физике I део (скрипта), Нови Сад, 1992.
- [6] Martin, J. Physics for Radiation Protection: A Handbook. New York: John Wiley & Sons; 2006.
- [7] Службени гласник Републике Србије број 86/2011 и 50/2018, 2018. Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењнима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима
- [8] Петровић, Б. Физичке основе радиотерапије. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду,
 Природно-математички факултет, Департман за физику, 2018.
- [9] Тодоровић, Н. Дозиметрија и заштита од јонизујућег зрачења (скрипта)
- [10] Shapiro, J. Radiation protection. Cambridge, Massachusetts and London, England: Harvard University Press, 2002.
- [11] International Organization for Standardization (ISO), X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1. ISO 4037-1, Geneva: ISO, 2019.
- [12] International Organization for Standardization (ISO), X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 2. ISO 4037-2, Geneva: ISO, 2019.

- [13] International Electrotechnic Commission, IEC, "Radiation protection instrumentation -Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors; IEC 60846-1, "2010.
- [14] Службени гласник Републике Србије број 9/2016, 2016. Правилник о дозиметрима
- [15] N. Kržanović, K. Stanković, M. Živanović, M. Đaletić i O. Ciraj-Bjelac, "Development and testing of a low cost radiation protection instrument based on an energy compensated GeigerMüller tube," Radiation Physics and Chemistry, t. 164, 2019.
- [16] International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025;2005.
- [17] https://www.automess.de/assets/documents/en/Prospekt_ADb_E.pdf
- [18] https://www.automess.de/assets/documents/en/Prospekt_6150AD_E.pdf
- [19] https://assets.fluke.com/manuals/451P____omeng0000.pdf
- [20] https://www.radonshop.com/mediafiles/Anleitungen/Strahlung/GAMMA-SCOUT_Standard/GAMMA-SCOUT_Standard_ManualEN.pdf
- [21] https://zastita.vin.bg.ac.rs/proizvodi/dmrz-m15/



БИОГРАФИЈА

Јелена Влаховић је рођена 29.10.1997. године у Новом Саду. Основну школу "Коста Трифковић" завршава 2012. године након чега уписује друштвенојезички смер у Гимназији "Јован Јовановић Змај" који завршава 2016. године. Исте године уписује смер медицинске физике на Департману за физику Природноматематичког факултета у Новом Саду. Дипломски рад под називом "Радиолошка безбедност пијаћих вода" брани 2021. године и исте године уписује мастер студије медицинске физике на Департману за физику Природноматематичког факултета. Волонтира у Црвеном крсту од 2011. године, где активно учествује у вршњачкој едукацији и промоцији вредности Црвеног крста.

UNIVERZITET U NOVOM SADU PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:	
RBR	
Identifikacioni broj:	
IBR	
Tip dokumentacije:	Monografska dokumentacija
TD	
Tip zapisa:	Tekstualni štampani materijal
TZ	
Vrsta rada:	Master rad
VR	
Autor:	Jelena Vlahović
AU	
Mentor:	prof. dr Nataša Todorović
MN	dr Miloš Živanović
Naslov rada:	Poređenje ambijentalnih dozimetara u X- i γ-referentnim poljima i prilikom
NR	merenja nepoznatog uzorka
Jezik publikacije:	srpski (ćirilica)
JP	
Jezik izvoda:	srpski/engleski
JI	
Zemlja publikovanja:	Srbija
ZP	
Uže geografsko područje:	Vojvodina
UGP	
Godina:	2022
GO	
Izdavač:	Autorski reprint
Mesto i adresa:	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
МА	
Fizički opis rada:	Broj poglavlja: 6
	Broj strana: 54
FO	Broj tabela: 22
	Broj slika: 25
	Broj referenci: 21
Naučna oblast:	Fizika
NO	
Naučna disciplina:	Medicinska fizika
ND	
Predmetna odrednica/ ključne reči:	Dozimetrija, zaštita od zračenja, ambijentalni dozimetri, interkomparacija
PO	
UDK	
Çuva se:	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ĊU	
Važna napomena:	nema
VN	

Izvod: IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: DP Datum odbrane: DO Članovi komisije: KO

23.09.2022.

Predsednik: prof. dr Jovana Nikolov

član: prof. dr Olivera Klisurić član: dr Nikola Kržanović član: prof. dr Nataša Todorović član: dr Miloš Živanović

UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:	
ANO	
Identification number:	
INO	
Document type:	Monograph publication
	Transford and state in the second state
Type of record:	Textual printed material
IR Content of dec	Final more
Content coae:	Final paper
Author	Jelena Vlahović
	Jelena vianovie
Mentor/comentor	prof. dr Nataša Todorović
MN	dr Miloš Živanović
Title:	Comparison of ambiental dosimeters in X- and γ - referential fields and
TI	while measuring an unknown source
Language of text:	Serbian (Latin)
LT	
Language of abstract:	English
LA	
Country of publication:	Serbia
СР	
Locality of publication:	Vojvodina
LP	
Publication year:	2022
PY	
Publisher:	Author's reprint
PU	
Publication place:	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
Physical description:	
PD	

Scientific field:	Physics
Scientific discipline:	Medical Physics
Subject/ Key words:	Dosimetry, radiation protection, ambiental dosimeters, intercomparation
SKW UC	
Holding data: HD	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
Note:	none
N Abstract:	
AB	
Accepted by the Scientific Board:	
ASB	
Defended on:	23.09.2022.
DĚ	
Thesis defend board:	
DB	
President: prof. dr Jovana Nikolov	
Member:prof. dr Olivera Klisurić	
Member: dr Nikola Kržanović	
Member: prof. dr Nataša Todorović	
Member: dr Miloš Živanović	