

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ
-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена
(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију 18.01.2018., Наставно-научно веће Природно-математичког факултета у Новом Саду</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>др Борислава Петровић, доцент ПМФ у Новом Саду, уже научна област Медицинска физика 06.09.2011. – председник</p> <p>др Миодраг Крмар, редовни професор ПМФ у Новом Саду, уже научна област Нуклеарна физика, 21.12.2012. – ментор</p> <p>др Оливера Клисурић, редовни професор доцент ПМФ у Новом Саду, уже научна област Биофизика, 26.10.2017. - члан</p> <p>др Јована Николов, доцент ПМФ у Новом Саду, уже научна област Нуклеарна физика, 13.02.2014 - члан</p> <p>др Владимир Удовичић, виши научни сарадник Института за физику у Земуну, уже научна област Нуклеарна физика, 27.04.2017. - члан</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Арпад (Арпад) Тот</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 16.01.1989. Зрењанин, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Природно-математички факултет у Новом Саду, Физика – медицинска физика, Мастер физичар</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2013., Физика – нуклеарна физика</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:-</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:</p>

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Карактеризација фотона и неутрона мегаволтажних терапијских акцелератора

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација има укупно 121 страна. Текст дисертације је изложен на 108 страна. У дисертацији је дат сажетак на српском и енглеском језику. Садржај се налази на 3 стране, литература коју чини 87 референци на 5 страна. Дисертација садржи 52 слике и графикона, као и 9 табела. Дисертација се састоји из два дела и укупно 4 поглавља. На почетку су представљени проблем и циљ истраживања - Увод (2 стр.). Први део се састоји из три поглавља: Медицински линеарни акцелератори (26 стр.), неутрони код медицинског линеарног акцелератора (11 стр.) и методе мерења фотона и неутрона код медицинског акцелератора (16 стр.). Други део се састоји из једног поглавља: приказ и дискусија експерименталних мерења које је подељено на четири подпоглавља: мерење еквивалентне дозе неутрона (13 стр.), активациона мерења (9 стр.), атенуациона мерења (15 стр.) и мерење дозе расејаног фотонског зрачења на улазу у лавиринт (7 стр.). На крају дисертације изложен је закључак - Закључак (4 стр.).

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Циљ истраживања је био да се развије нова техника за одређивање параметара фотонског спектра која би се могла примењивати у клиничким условима за различите медицинске акцелераторе. Такође, предмет истраживања је и унапређивање методе одређивања параметара којима би се на најједноставнији начин описало понашање расејаних фотона као и неутрона у близини медицинских акцелератора. С друге стране циљ је и добијење нових и поузданих експерименталних података о испитиваним медицинским акцелераторима, као и унапређење постојећих метода за планирање заштите и то у стандарним акцелераторским просторима и за атипичне геометрије примарне заштите зрачења.

У првом делу дисертације кандидат је описао рад медицинских линеарних акцелератора, настанак фотона закочним зрачењем у мети акцелератора као и начин обликовања снопа за радиотерапију. У наставку је представљен основни принцип дизајна собе за радиотерапију као и основни принципи заштите. Објашњен је и појам *Flattening Filter Free (FFF)* акцелератора који су се од пре неколико година уведени у клиничку праксу. Такође описани је настанак неутрона код медицинског линеарног акцелератора као и могуће интеракције истих. На крају су представљене методе за мерење фотона и неутрона код медицинског акцелератора и то активациона техника, дозиметријске технике за мерење фотона и неутрона као и атенуациона техника.

У другом делу дисертације приказани су и резултати експерименталних мерења. Прво су приказана детаљна мерења еквивалентне дозе неутрона за нетипичну геометрију бункера, урађено је поређење и детаљна анализа постојећих модела за израчунавање дозе неутрона. На крају је предложена модификација постојећег модела за израчунавање дозе. Након тога приказана је употреба активационе методе за одређивање особина фотонског снопа за два различита акцелератора. Код оба акцелератора је урађено по два сета мерења и то један у *FF* а други *FFF* моду рада акцелератора. Затим су приказани резултати атенуационих мерења за два начина рада линеарног акцелератора: *FF* и *FFF*. На основу атенуационих мерења реконструисан је спектар фотона и то нумеричком методом и методом Лапласових трансформација. На крају су приказана детаљна дозиметријска мерења расејаних фотона за два начина рада акцелератора (*FF* и *FFF*), две различите оријентације акцелераторске главе и разне величине зрачног поља. На основу експерименталних мерења указано је на потенцијални правац побољшања модела за рачунање еквивалентне дозе неутрона као и метода за реконструкцију спектра фотона.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

B. Anđelić, D. Knežević, N. Jovančević, M. Krmar, J. Petrović, Á. Tóth, Ž. Medić, J. Hansman, Presence of neutrons in the low-level background environment estimated by the analysis of the 595.8 keV gamma peak, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (852) 80-84 (2017) DOI: 10.1016/j.nima.2016.12.025 **M21**

Á. Á. Tóth, B. Petrović, N. Jovančević, M. Krmar, L. Rutonjski, O. Čudić, The evaluation of the neutron dose equivalent in the two-band maze, *Physica Medica* 36 119-125 (2017) DOI:0.1016/j.ejmp.2017.03.017 **M22**

Á. Á. Tóth, A. Effendi, E. Szil, N. Ignjatov, H. Јованчевић, J. Хансман, M. Крмар, Spektralne karakteristike FFF terapijskih fotonskih snopova merene fotoaktivacijom 115m-In, 29. simpozijum DZZ SCG, Institut za nuklearne nauke "Vinča", pp. 266 - 273, isbn: 978-86-7306-144-3, Srebrno Jezero, Srbija, 27. - 29. Sep, 2017 **M63**

Á. Á. Tóth, M. Krmar, N. Jovančević, B. Petrović, Neutrons in two-band maze: suggestion for some changes in existing protocol for estimation of neutron dose equivalent, 8th international Student Summer School NUCPHYS-SC&APPL, Brasov, Romania, 26 July- 4 August, 2017. **M34**

Á. Á. Tóth, N.A. Todorović, M. Krmar, O.R. Klisurić. Neutrons from Medical Accelerator: Simplified Activation Technique. 9th International Physics Conference of Balkan Physical Union, Istanbul, Turkey, August 24-27, 2015. **M34**

VII ZAKЉUČICI OДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У овој дисертацији је рађена карактеризација фотона и неутрона мегаволтажних терапијских акцелератора. У првом делу направљен је осврт на принцип рада медицинских акцелератора, на основни принцип дизајна терапијске собе као и заштиту особља, настанак неутрона код медицинског линеарног акцелератора и њихову интеракцију, на крају првог дела приказане су методе мерења фотона и неутрона код акцелератора и то: активациона техника, дозиметрија фотона и неутрона и атенуациона техника.

У другом делу представљени су и дискутовани резултати експерименталних мерења.

Урађена су детаљна дозиметријска мерења еквивалентне дозе неутрона у терапијској соби са два заокрета ходника и на основу резултата предложена је корекција методе за израчунавање неутронске дозе на улазним вратима. Урађена су активациона мерења на два различита акцелератора (Електа и Вариан) и на основу добијених резултата процењено је колико се може очекивати неутрона приликом рада акцелератора произвођача Електа. Упоредна су директне мерене еквивалентне дозе неутрона на већем броју места дуж ходника лавиринта са постојећим теоријским моделом. Један од најважнијих дозиметријских истраживања је да други заокрет значајно смањује еквивалентну дозу неутрона. Мерења су потврдила да друга кривина ходника, дужине 4.5 м, редукује еквивалентну дозу неутрона за фактор већи од 30. Користећи процењену вредност јачине извора неутрона уређена је евалуација еквивалентне дозе неутрона на крају првог ходника процењене уз помоћ оба предложена модела. Керсејев метод, познат као конзервативан, даје 20 пута већу вредност дозе од измерене, док модификовани Керсејев метод прецењује дозу више од 5 пута. На основу измерених вредности ТВД-а утврђено је да се оно релативно добро слаже са оном која се користи у Керсејевој методи у првом ходнику. Међутим, ТВД у другом ходнику је, као што је потврђено мерењима знатно мањи и на основу тога предложена је модификација јединог модела за процену еквивалентне дозе неутрона за бункер са две кривине. Модификација предлаже коришћење ТВД-а у другом ходнику који је приближно једнак половини вредности ТВД-а у првом ходнику. Такође, мерењима је утврђено да је еквивалентна доза неутрона на попречном пресеку ближе унутрашњем зиду два пута већа у односу на супротну страну ходника и да се приближавањем излазним вратима ова разлика смањује.

У раду су извршена фотоактивациона мерења, где су се у оба начина рада, са и без хомогенизационог филтера, терапијског акцелератора пратиле активности изомера ^{115m}In . Тестирана су два акцелератора различитих произвођача, Варијан и Електа. Установљено је да за исту дозу фотонског зрачења у изоцентру Електин акцелератор производи преко три пута више активности изомера ^{115m}In у средини поља, а преко два пута више на ивици поља величине $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Након филтрације, та разлика није толико велика и активност индијумске мете се разликују за око 30%. Поређењем сатурационе активности једног истог акцелератора на средини поља и на његовој ивици, за два произвођача се добијају слични односи, с тим да је на средини поља сатурациона активност преко два пута већа него на ивици. Ови резултати указују да се код два типа акцелератора облик спектра у високоенергетском делу знатно разликују, као и да постоји разлика у облику спектра на ивици поља и у његовој средини.

Урађена су атенуациона мерења фотонског снопа са циљем да се одреди разлика у енергетском спектру у два начина рада акцелератора: са и без хомогенизационог филтера. На основу стандардног метода реконструкције фотонског спектра путем Лапласових трансформација, добијене су извесне разлике у облицима спектра за два различита. Реконструкција спектра је обављена и путем одабира параметара корекционе функције која теоријски облик спектра (Шифова функција) преводи у реалан спектар за оба начина рада и поново је добијена добра назнака.

Урађена су детаљна дозиметријска мерења фотонске дозе на улазним вратима терапијске собе са

једним заокретом, са и без хомогенизационог филтера за различите величине поља и са и без воденог канистера који симулира пацијента у снопу. У оба мода рада акцелератора, за мале вредности поља до $10 \times 10 \text{ cm}^2$ измерена доза на улазним вратима је нешто већа за угао гентрија од 270° . Утврђено је да је пораст дозе на улазним вратима скоро линеарна функција величине поља за *FF* мод рада акцелератора, а да у *FFF* моду рада измерена доза на улазним вратима није линеарна функција величине поља. Добијени резултати су показали да је измерена доза на улазним вратима у *FFF* моду рада увек нижа од измерене дозе у случају да се користи хомогенизациони филтер. За једноставну геометрију у којој је канистер са водом дебљине 20 cm смештен у изоцентар, доза у *FFF* моду је више од три пута нижа у односу на ону у *FF* моду рада. Што значи да у случају да се започињу *FFF* терапије у некој од постојећих терапијских соба, нема потребе за додатну заштиту односно да је већ постојећа довољна.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Сви резултати у дисертацији су описани текстуално и представљени графички и табеларно, а неки и изразима из формализованог математичког апарата. Дискусија приказаних резултата је детаљна и јасно изложена. Верификација свега што је у дисертацији приложено као допринос науци обављена је од стране рецензента у међународним научним часописима у којима су резултати публиковани. Према томе, оцена приказа и тумачења резултата истраживања је позитивна.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Дисертација је написана тако да стриктно прати образложење наведено у пријави теме. У овој дисертацији је рађена карактеризација фотона и неутрона мегаволтажних терапијских акцелератора при чему је урађено следеће: (1) детаљна дозиметријска мерења еквивалентне дозе неутрона у нетипичним геометријама терапијске собе, и на основу њих је предложен нови модификовани модел за рачунање дозе неутрона, (2) утврђено је да активациона метода може користити за карактеризацију фотонског снопа и то за оба начина рада акцелератора (FF и FFF), (3) показано је да је атенуациона техника довољно осетљива да уочи разлику у облику спектра фотона са и без хомогенизационог филтера, (4) детаљним дозиметријским мерењима фотонске дозе на улазним вратима терапијске собе са једним заокретом за рад акцелератора са и без хомогенизационог филтера за различите величине поља установљено је да је измерена доза на улазним вратима у FFF моду рада увек нижа од дозе у случају када се користи хомогенизациони филтер.

Изазов покренут дубином проблема је главни разлог зашто је у дисертацији урађено и више него што је првобитно наведено у пријави. Овакав искорак је само допринео да дисертација буде више заокружена.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Дисертација садржи све битне елементе. Дакле (1) увод који садржи јасан преглед истраживања; (2) опис рада медицинског линеарног акцелератора као и дизајн бункера и основне принципе заштите; (3) опис настанка неутрона код линеарног акцелератора као и њихову интеракцију; (4) опис метода мерења фотона и неутрона код медицинског акцелератора; (4) приказ и дискусију експерименталних мерења и то дозиметријска мерења еквивалентне дозе неутрона, активациона мерења карактеристика фотонског снопа, атенуациона мерења и реконструкцију фотонског снопа, и мерење дозе расејаног фотонског зрачења на улазним вратима терапијске собе; (5) закључак. Сваки од наведених делова представља једну целину са поруком које су на крају сажете и склопљене у јасном закључку. Опиширна и брижљиво одабрана литература представља један јасан водич кроз област којом се кандидат бави у овој дисертацији.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

У овом раду су приказани резултати неколико различитих врста мерења путем којих би се извршила карактеризација неких параметара фотонског снопа медицинског линеарног акцелератора као и неутрона који се стварају приликом рада акцелератора на вишим енергијама. Прво је обрађен проблем одређивања еквиваленте дозе неутрона на улазним вратима терапијске собе са два заокрета ходника. О овом проблем постојао је само један модел који, у нашем случају, не процењује довољно добро еквивалентну дозу неутрона. На основу експерименталних мерења предложена је корекција овог модела која је одлично прихваћена у научној заједници. Ово је први модел за прорачун неутронске дозе за терапијске просторе који немају стандардну геометрију. Такође утврђено је да је ТВД у другом делу ходника приближно једнака половини вредности ТВД-а у првом ходнику. С обзиром да за Електине акцелераторе не постоје јавни подаци из којих би се установило колико неутрона производе, активационим мерењима је по први пут процењен тај параметар за њих.

Друго, будући да својства терапијског снопа у режиму рада без хомогенизационог филтера још увек нису сасвим истражена, извршена су фотоактивациона мерења, где су за оба начина рада терапијског акцелератора пратиле активности изомера ^{115m}In , као један од могућих показатеља квалитета фотонског снопа. Тестирана су два акцелератора различитих произвођача, Варијан и Електа и утврђено је да фотоактивациона мерења дају различите резултате за снопове који развијају једнаку дозу у изоцентру.

Треће, показано је да атенуационим мерењима фотонског снопа у два различита режима рада акцелератора може одредити разлика у енергетском делу спектра. Овај проблем се до сада обрађивао Монте Карло симулацијама, а до сада не постоји ни један експериментални резултат који пореди енергетске спектре фотона акцелератора који функционишу у ова два режима рада. На основу оба метода реконструкције спектра (метод Лапласових трансформа и нумеричка метода) добијене су извесне разлике у облицима спектра за два режима рада. Ова мерења отварају могућност употребе апсорпционе технике за мерење облика спектра акцелератора који не поседују филтре за изравнавање поља, што је први допринос те врсте у овој области.

Четврто, дозиметријским мерењима фотонске дозе на улазним вратима терапијске собе са једним заокретом, утврђено је да је пораст дозе на улазним вратима скоро линеарна функција величине поља за *FF* мод рада акцелератора, а да у *FFF* моду није линеарна функција величине поља. Такође, утврђено је да је измерена доза на улазним вратима у *FFF* моду рада увек нижа од измерене дозе у случају када се користи хомогенизациони филтер, што значи да у случају када се започиње *FFF* терапија у некој од постојећих терапијских соба, нема потребе за додатну заштиту односно да је већ постојећа довољна. У овом раду су по први пут приказане вредности дозиметријских мерења и околини *FFF* акцелератора што би требало да у великој мери одреди начине планирања дизајна заштите на клиникама где се примењује радијациона терапија.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Докторска дисертација нема недостатака унутар оквира постављених темом. Постојали су сви услови да овај захтев буде и формално задовољен.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

да се докторска дисертација **Карактеризација фотона и неутрона мегаволтажних терапијских акцелератора** прихвати, а кандидату **мастер физичару Арпад Тоту** одобри одбрана.

Доц. др Борислава Петровић, доцент, ПМФ Нови Сад, председник

Проф. др Миодраг Крмар, редовни професор, ПМФ Нови Сад, ментор

Проф. др Оливера Кисурић, редовни професор, ПМФ Нови Сад, члан

Доц. др Јована Николов, доцент, ПМФ Нови Сад, члан

др Владимир Удовичић, виши научни сарадник, Институт за физику у Земуну, члан
