

VLOGA RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE PRI NUKLEARNOMEDICINSKEM HIBRIDNEM SLIKANJU PATOLOŠKIH SPREMENB V PODROČJU VRATU

THE ROLE OF COMPUTER TOMOGRAPHY IN THE NUCLEAR-MEDICAL HYBRID IMAGING
FOR VISUALIZATION OF NECK LESIONS

Sebastijan Rep, Luka Ležaič

Klinika za nuklearno medicino, Univerzitetni klinični center Ljubljana, Zaloška 7, 1000 Ljubljana

Korespondenca/Correspondence: dr. Sebastijan Rep, dipl. inž. rad., e-mail: sebastian.rep@guest.arnes.si

Prejeto/Received: 20. 4. 2018

Sprejeto/Accepted: 30. 8. 2018

IZVLEČEK

Uvod in namen: Nuklearno medicinski slikovni metodi SPECT in PET temeljita na funkcionalni in metabolni informaciji o delovanju in značilnostih organov in tkiv po običajno intravenski aplikaciji radiofarmaka (RF), ki se akumulira v tarčnem tkivu. Ker fotoni iz akumuliranega RF potujejo skozi različna tkiva v telesu, na poti izgubljajo energijo zaradi atenuacije. Posledica tega efekta je slabša detekcija procesov, ki ležijo globlje v telesu. Učinek atenuacije lahko zmanjšamo s korekcijo atenuacije. Najuspešnejša metoda korekcije atenuacije je uporaba informacije o gostoti tkiv na podlagi Hounsfieldovih enot iz CT slikanja. Kombinirane, hibridne SPECT/CT in PET/CT naprave omogočajo kombinacijo funkcionalne informacije iz SPECT in PET slikanja in anatomske informacije iz CT slikanja. Hibridno slikanje se je pokazalo kot odlično diagnostično orodje pri medicinskem slikanju predvsem manjših patoloških procesov. Slabost hibridnega slikanja je dodatna sevalna obremenitev bolnikov zaradi uporabe CT slikanja. Namen naše raziskave je ugotoviti vpliv CT slikanja na kakovost scintigramov in sevalno obremenitev pacientov.

Materiali in metode: V raziskavo smo zajeli 20 bolnikov, pri katerih smo na SPECT/CT in PET/CT slikanju lokalizirali patološke lezije v področju vratu. Slikanja smo opravili v dveh fazah, in sicer 5 min in 60 min po aplikaciji RF. Za izvedbo SPECT/CT smo aplicirali 600 MBq ^{99m}Tc-MIBI in za PET/CT 100 MBq 18F-holina. Razliko med korigiranimi in nekorigiranimi slikami smo ocenili vizualno, po kvalitativni tristopenjski skali. Za izračun sevalne obremenitve bolnikov zaradi uporabe RF smo uporabili utežne faktorje iz publikacij Mednarodne komisije za varstvo pred sevanjem, sevalno obremenitev zaradi uporabe CT pa smo izračunali z uporabo ImPACT CT orodja za dozimetrijo.

Rezultati: Po vizualni oceni se je kakovost slik izboljšala v 16/20 (80 %) pri SPECT/CT in pri vseh opravljenih slikanjih (20/20; 100 %) pri PET/CT. Sevalna obremenitev je bila signifikantno višja po opravljenem CT slikanju v kombinaciji s SPECT/CT in PET/CT ($p < 0,0001$).

Zaključek: Korekcija atenuacije s CT je nujna za kakovostno oceno scintigramov kljub povečani sevalni obremenitvi bolnikov, saj se izboljša diagnostična vrednost preiskav.

Ključne besede: SPECT/CT, PET/CT, korekcija atenuacije, radiofarmak

ABSTRACT

Introduction and purpose: Nuclear medical imaging methods SPECT and PET are based on the functional and metabolic information about the functioning and characteristics of organs and tissues after (usually) intravenous application of radiopharmaceuticals (RF), which accumulated in the target tissue. Since photons from the accumulated RF travel through different tissues in the body, they lose their energy due to attenuation along the way. The consequence of this effect is a reduced ability to detect processes that lie deeper in the body. The effect of attenuation can be reduced by attenuation correction (AC). The most successful AC method is the use of tissue density information based on Hounsfield units from CT imaging, which enabled the development of hybrid devices. The combined, hybrid SPECT/CT and PET/CT systems provide functional information of the SPECT and PET imaging and anatomical information from the CT imaging. Hybrid imaging has proven to be a useful diagnostic tool for medical imaging of mainly minor pathological processes. The disadvantage of hybrid imaging is an additional radiation exposure of patients due to the use of CT imaging. The purpose of our research is to determine the impact of CT imaging on the quality of scintigrams and the radiation exposure of patients.

Materials and methods: Twenty patients with localized pathological lesions in the neck area after SPECT/CT and PET/CT imaging were included in the study. We performed acquisitions in two phases, i.e., 5 minutes and 60 minutes after the RF application. For the implementation of SPECT/CT, 600MBq ^{99m}Tc-MIBI and PET/CT 100 MBq 18F-Choline were administered. The difference between the corrected and uncorrected images was assessed visually by qualitative three-point scale. We used the weighing factors to calculate the radiation exposure of patients for different RF, recommended by the International Commission for Radiation Protection, and the ImPACT CT Patient Dosimetry Calculator to calculate the radiation exposure for patients after the use of CT.

Results: According to visual assessment, the image quality improved in 16/20 (80%) on SPECT/CT and in all performed imaging (20/20; 100%) on PET/CT. The radiation exposure of patients was significantly higher after CT scanning in combination with SPECT/CT and PET/CT ($p < 0.0001$).

Conclusion: Attenuation correction with CT is essential for the quality assessment of scintigrams despite the increased patient radiation exposure as it improves the diagnostic value of examinations.

Key words: SPECT/CT, PET/CT, attenuation correction, radiopharmaceutical

UVOD

Enofotonska emisijska računalniška tomografija (SPECT) in pozitronska emisijska tomografija (PET) sta slikovni metodi, ki omogočata ovrednotenje procesov bolezni, glede na funkcionalno in metabolno informacijo o delovanju tkiv in organov (Townsend, 2004; Zanzonico, 2012). SPECT in PET generirata računalniško sliko na osnovi signala, izhajajočega iz radiofarmakov (RF), ki se razporejajo v telesu in akumulirajo v tarčnem tkivu. RF, ki se najpogosteje aplicira v bolnika intravensko, je biomolekula, označena z radioaktivnim izotopom, ki se v telesu razporeja specifično glede na opazovani biološki proces. Emitirano sevanje je mogoče zaznati pri prehodu iz bolnika s pomočjo detektorjev. Pri SPECT slikanju se detektorji vrtijo okrog bolnika (običajno dva detektorja), pri PET slikanju pa so oblikovani kot obroč (Zanzonico, 2012). Nasprotno pa anatomsko slika, dobljena z računalniško tomografijo (CT), nastane na osnovi atenuacije rentgenskih (RTG) žarkov, ko potujejo skozi tkiva različne gostote v človeškem telesu. Pri CT je vir sevanja rentgenska cev, ki se vrti okrog bolnika, medtem ko detektor na nasprotni strani zaznava RTG žarke, ki prehajajo skozi telo. Zajeto informacijo obdelamo s primernim programom za rekonstrukcijo in korekcijo slike (Brenner, 2007; Goldman, 2007). CT slikanje zagotavlja informacijo o sestavi telesa, ki se uporablja za anatomsko korelacijo funkcionalnih podatkov, pridobljenih s SPECT slikanjem (t. i. hibridno slikanje); (Greenspan et al., 2012). Integracija CT s SPECT in PET se je izkazala kot izjemno uporabno diagnostično orodje pri medicinskem slikanju, v prvi vrsti v onkologiji, kjer zlitje metabolne in morfološke informacije omogoča načrtovanje kirurškega posega in/ali oceno odgovora na zdravljenje. Vendar pa SPECT/CT in PET/CT nista uporabna le v onkologiji, temveč se uporabljata tudi v kardiologiji, nevrologiji, endokrinologiji in opredelitvi vnetnih procesov (Beyer et al., 2014).

Tako CT kot nuklearnomedicinski modaliteti SPECT in PET temeljita na uporabi ionizirajočega sevanja. Pri vseh naštetih metodah se energija ionizirajočega sevanja deponira v telesu bolnika s frakcijami fotonov, absorbiranih v organih telesa in s sipanim sevanjem. Sevalna obremenitev bolnikov pri hibridnem (PET/CT in SPECT/CT) slikanju je rezultat sevalne obremenitve po aplikaciji RF in izvedbe CT slikanja (Hoang et al., 2015; Guttikonda et al., 2014).

Pogosto izvajani hibridni preiskavi v področju vratu sta SPECT/CT z ^{99m}Tc -MIBI (methoxyisobutylisonitrile – MIBI) in PET/CT z ^{18}F -fluoroholinom (FCH) za predoperativno lociranje prekomerno delujočih obščitničnih žlez (PDOŽ) v sklopu primarnega hiperparatiroidizma. MIBI je radiofarmak, ki se kopiči v PDOŽ in v priležni žlezi ščitnici, običajno pa se iz slednje hitro izplavi, medtem ko v PDOŽ zastaja, kar predstavlja osnovo dvofaznega protokola slikanja. Šele pred nekaj leti je bil v isti namen uporabljen PET/CT s FCH: rezultati zaenkrat malega števila pilotnih študij so pokazali višjo diagnostično vrednost FCH PET/CT v primerjavi s konvencionalnimi scintigrafskimi metodami, vključno s SPECT/CT (Ležaič, 2014; Michaud, 2015; Kjuifhout, 2015).

Obe preiskavi pri enaki indikaciji uporabljata primerljive metode korekcije funkcionalne informacije in korelacije z anatomsko informacijo, obenem pa obe preiskavi bolnika izpostavljata ionizirajočemu sevanju. Namen naše raziskave

je bila opredelitev vpliva CT slikanja na kakovost SPECT in PET scintigramov in sevalno obremenitev bolnikov pri obeh metodah.

MATERIALI IN METODE

V raziskavo smo zajeli 20 bolnikov (16 žensk in 4 moške; povprečna starost 53 ± 17 let), ki so imeli slikano področje vratu v sklopu diagnostike primarnega hiperparatiroidizma in pri katerih smo prikazali PDOŽ na SPECT/CT in PET/CT preiskavi v zgodnji in kasni fazi. Volumen PDOŽ smo izračunali po formuli $(A \times B \times C) \times \pi/6$, kjer je A dolžina, B širina, C višina PDOŽ po histoloških podatkih.

PET/CT slikanje

Vsa PET/CT slikanja smo opravili na SIEMENS Biograph mCT 128 hibridnem sistemu. PET/CT slikanje vratu in prsnega koša smo opravili 5 in 60 minut po aplikaciji 100 MBq ($105,62 \pm 15,67$ MBq) FCH. Slikanje smo opravili z enim snemalnim položajem trajanja 4 min na hibridnem sistemu, ki združuje 128-rezinski CT in LSO PET detektorski sistem. Za rekonstrukcijo smo uporabili iterativni algoritem TrueX (2 iteraciji, 21 podmnožic), ki vključuje funkcijo razširitve točke (point spread function – PSF) in časa preleta (TOF). Rekonstruirane slike smo prikazali v prečnih, sagitalnih in koronarnih ravninah z uporabo delovne postaje z vgrajeno programsko opremo OASIS.

SPECT/CT slikanje

Vsa SPECT/CT slikanja smo opravili na SIEMENS Simbia® T2 gama kameri. SPECT/CT slikanje vratu in prsnega koša smo opravili 5 in 60 minut po aplikaciji 600 MBq ($596,05 \pm 36,72$ MBq) ^{99m}Tc -sestaMIBI (MIBI). Hibridni SPECT/CT sistem vsebuje dva detektorja in dvorezinski nizkodozni CT sistem. Za SPECT slikanje smo uporabili kolimator s paralelnimi odprtini, velikost matrice 128×128 , 32 kotnih projekcij z 20-sekundnim zajemanjem podatkov na projekcijo in velikostjo vidnega polja 1,78.

Pri izvedbi nizko doznega CT smo uporabili anodni tok z vrednostjo 30 mAs in anodno napetost z vrednostjo 120 kV, 5 mm kolimacijo in pitch 0,75 za korekcijo atenuacije (KA) in fuzijo. Rekonstruirane slike smo prikazali v prečnih, sagitalnih in koronarnih ravninah z uporabo namenske SPECT/CT delovne postaje z nameščeno programsko opremo proizvajalca (Syngo; Siemens Medical Solution). Za obdelavo dobljenih podatkov smo uporabili iterativni rekonstrukcijski algoritem OSEM 3D.

Analiza podatkov

SPECT/CT in PET/CT scintigrame z in brez KA smo ocenili vizualno in jih ovrednotili kvalitativno po tristopenjski lestvici (scintigram s KA je boljši, enak ali slabši kot scintigram brez KA). Pri SPECT/CT je rekonstrukcijski algoritem Flash 3D vključeval korekcijo atenuacije, sipanega sevanja in korekcijo razmazanja točkastega izvora. Pri PET/CT je rekonstrukcijski algoritem poleg naštetih korekcij vključeval tudi običajne dodatne korekcije pri PET slikanju (čas razpada RF, naključni in sipani koincidenčni dogodki).

Sevalno obremenitev bolnikov kot posledico uporabe RF

smo izračunali s pomočjo utežnih faktorjev, priporočenih s strani Mednarodne komisije za varstvo pred sevanjem (ICRP – International Commission on Radiological Protection, Report 128) (ICRP, 2015). Za izračun sevalne obremenitve bolnikov kot posledico CT preiskave smo uporabili programsko orodje za dozimetrijo ImPACT (ImPACT CT Patient Dosimetry Calculator: ImPACT's CT dosimetry tool (impactscan.org); <http://www.impactscan.org/ctdosimetry.htm>). Sevalna obremenitev je izračunana na osnovi karakteristik uporabljenega CT aparata, dolžine slikanega področja in slikovnih parametrov, ki se nanašajo na CT aparat in vrsto preiskave. Analizo osnovnih podatkov smo izvedli s testi opisne statistike (opredeljeni so z anatomske skupinami). Neparometrični Wilcoxon test predznačenih rangov za dve spremenljivki smo uporabili za ovrednotenje sevalne obremenitve po aplikaciji RF in dodatno opravljenem CT slikanju. Vrednost $p < 0,05$ je bila statistično značilna.

REZULTATI

Pri 20 bolnikih (16 žensk in 4 moški; povprečna starost 53 ± 17 let) smo s PET/CT in SPECT/CT lokalizirali 21 lezij. Povprečni volumen lezij je bil 16 ± 6 ml. Vizualna ocena dobljenih scintigramov je pokazala, da je bila v 16/20 (80 %) primerih kvaliteta SPECT/CT slike boljša z uporabo KA. Pri PET/CT dobljenih scintigramih so bile korigirane slike v vseh (20/20; 100 %) primerih boljša od nekorigiranih. Efektivna doza po apliciranem RF FCH je bila $2,11 \pm 0,31$ mSv in $5,36 \pm 0,32$ mSv po aplikaciji MIBI (tabela 1).

Tabela 1: Prikaz povprečne vrednosti apliciranega radiofarmaka, utežnega faktorja za specifičen radiofarmak po ICRP priporočilu in efektivne doze na bolnika v mSv

Slikovna metoda	Radiofarmak (MBq)	Utežni faktor	Efektivna doza (mSv)
PET/CT	$105,62 \pm 15,67$	0,02	$2,11 \pm 0,31$
SPECT/CT	$596,05 \pm 36,72$	0,009	$5,36 \pm 0,32$

Povprečna vrednost dose length product (DLP) po izvedbi SPECT/CT je bila $100,81 \pm 17,84$ mGy/cm in po PET/CT $84,82 \pm 24,73$ mGy/cm (tabela 2).

Tabela 2: Povprečna izračunana vrednost efektivne doze na bolnika po izvedenem CT slikanju

Slikovna metoda	DLP v mGy/cm	Efektivna doza (mSv)
PET/CT	$84,82 \pm 24,73$	$0,82 \pm 0,24$
SPECT/CT	$100,81 \pm 17,84$	$1,39 \pm 0,25$

CT slikanje je pri izvedbi SPECT/CT slikanja prispevalo $1,39 \pm 0,25$ mSv in pri PET/CT $0,82 \pm 0,24$ mSv. Efektivna doza se je zaradi uporabe CT signifikantno povečala pri preiskavah SPECT/CT in PET/CT (tabela 3).

Tabela 3: Skupna efektivna doza po izvedeni SPECT/CT in PET/CT preiskavi

Slikovna metoda	ED v mSv po aplikaciji RF	ED v mSv po izvedbi CT	Skupna ED v mSv	% povečanja ED	p
PET/CT	$2,11 \pm 0,31$	$0,82 \pm 0,24$	$2,94 \pm 0,44$	39 %	$< 0,001$
SPECT/CT	$5,36 \pm 0,32$	$1,39 \pm 0,25$	$6,76 \pm 0,39$	26 %	$< 0,001$

RAZPRAVA

V naši raziskavi smo ovrednotili vlogo CT pri hibridnem slikanju PET/CT in SPECT/CT. Z vizualno oceno smo potrdili, da je nehomogena atenuacija fotonov v telesu ena od najpomembnejših pomanjkljivosti pri oblikovanju slikovne diagnostike v nuklearni medicini. Nehomogena atenuacija omejuje diagnostično natančnost, zaupanje v interpretacijo, kvantifikacijo in slikovno učinkovitost. KA z integracijo CT komponent je pomenila velik napredek. Izboljšala je predvsem specifičnost, pa tudi občutljivost nuklearnomedicinskih slikovnih metod, predvsem pri PET slikanju. Korigirane slike izboljšajo končno interpretacijo izvoda. Številne PET/CT (Souvatzoglu et al., 2007) in SPECT/CT (Preuss et al., 2007) študije so pokazale, da je zajem CT podatkov z nizkimi akvizicijskimi parametri uporaben za KA. Vendar pa morebitno neujemanje med podatki pri CT in SPECT slikanju pomeni tveganje nepopolne korekcije in s tem artefakte na pridobljeni scintigrafski sliki po KA. Artefakti, ki nastanejo zaradi neustrezne korekcije atenuacije lahko zmanjšajo specifičnost in občutljivost slikanja, ker se nehomogena porazdelitev RF razlaga kot razlika v akumulaciji radiofarmaka na mestu korekcije. Hibridni način slikanja zato zahteva skrben nadzor kakovosti, da se izognemo napakam, ki nastanejo pri korigiranju scintigrafskih slik. Študije, opravljene na PET/CT (Gould et al., 2007) in SPECT/CT (Kennedy et al., 2009) napravah so pokazale, da je pogostost neujemanja scintigrafske (PET oziroma SPECT) in CT informacije precej visoka in da so posledice klinično pomembne, če jih ne odpravimo. V zadnjem času je bilo dokazano, da so učinki neujemanja manj pomembni za SPECT/CT kot za PET/CT, predvsem zaradi manjše prostorske ločljivosti SPECT. Usklajevanje emisijskih in transmisijskih podatkov se po navadi opravi ročno in zahteva znanje in spretnost osebe, ki dela na obdelovalni postaji. Pomembno je, da lahko tudi CT preiskave z nizko kvaliteto, namenjene KA, omogočijo klinično koristne dodatne informacije, če jih ustrezno vrednotimo. Wei (2015) je v meta analizi ugotovil, da ima SPECT/CT boljšo diagnostično učinkovitost pri odkrivanju in lokalizaciji patoloških lezij v primerjavi s samostojnim SPECT, predvsem zaradi že opisane prednosti hibridnega SPECT/CT z možnostjo KA in fuzije funkcionalne in anatomske informacije. Fuzija slik z lociranjem patoloških sprememb na vratu je posebej uporabna pri bolnikih, ki imajo lokalno spremenjeno anatomijo zaradi predhodne operacije vratu, hiperplazijo obščitničnih žlez ali nodularno spremenjeno ščitnico. Ker so lahko PDOŽ tudi ektopične, je fuzija slik ključna za lokalizacijo PDOŽ v mediastinumu oziroma na mestu poteka embrionalnega razvoja. V primeru, da pri ektopičnem PDOŽ ni opravljena SPECT/CT preiskava, je potrebna dodatna diagnostika s CT, da se adenom lokalizira in izključi lažno pozitivne najdbe, npr. reaktivne bezgavke; SPECT/CT torej veliko prispeva k natančni lokalizaciji ektopičnih PDOŽ. V klinični študiji SPECT/CT ni le izboljšal lokalizacije, ampak tudi izvedbo kirurškega posega in kirurški pristop pri vseh 10 ektopičnih PDOŽ (Krausz et al., 2006).

Lavelly (2007) je v svoji raziskavi zaključil, da hibridni SPECT/CT, ki združuje tridimenzionalno funkcionalno informacijo SPECT z anatomsko informacijo CT, izboljša predoperativno lokalizacijo. Zgodnji SPECT/CT v kombinaciji s katerokoli kasno metodo slikanja (SPECT/CT, SPECT ali planarni protokoli) je točnejši od metod brez uporabe CT, tudi od dvofaznega SPECT protokola. Za vse tri modalitete (planarni protokoli, SPECT in SPECT/CT) je bilo dvofazno slikanje točnejše od enofaznega. Te ugotovitve močno nakazujejo, da bi lahko bil dvofazni SPECT/CT z obveznim zgodnjim slikanjem – če je to logistično izvedljivo – del rutinske predoperativne ocene bolnikov s primarnim hiperparatiroidizmom.

Ker je sevalna obremenitev pri hibridnem slikanju bolnikov povezana z aplikacijo RF in CT, je ena od očitnih omejitev hibridnega slikanja povezana s sevalno obremenitvijo bolnikov. Poteka aktivna razprava o izpostavljenosti sevanju in s tem povezanim tveganjem tudi v zvezi s samostojnim CT (Einstein et al., 2007). Po ugotovitvah raziskave je sevalna obremenitev po aplikaciji RF za PET preiskavo nižja od sevalne obremenitve, kateri je preiskovanec izpostavljen pri SPECT slikanju. Sevalna obremenitev pri SPECT slikanju se lahko izrazito zmanjša s kombinacijo novih metod iterativnih rekonstrukcij in bolj občutljivih detektorjev (van Raalte et al., 2015). Sevalna obremenitev pri opravljenem CT slikanju za KA in diagnostiko se močno razlikuje glede na protokol, instrumentacijo in velikost bolnika. Razpon sevalne obremenitve znaša med 0,5 in 11 mSv za skeniranje in se lahko uporablja za izvajanje KA (Sharma et al., 2012). Sevalna obremenitev je po uporabi CT običajno višja, če se uporabi manjšo debelino rezine, ker je treba dozo povečati, da dobimo enako razmerje med signalom in šumom (Brenner, 2007; Goldman, 2007). Sharma (2012) je v svoji raziskavi ugotovil, da se z izvajanjem SPECT/CT slikanja povečuje efektivna doza (ED) na bolnika in da v številnih primerih presega ED po apliciranem RF. Ugotovili so, da se ED pri bolnikih zaradi uporabe CT poveča v razponu med 0,06 do 11,9 mSv, odvisno od preiskave. Glede na njihove rezultate se je ED pri SPECT/CT običajno povečala za $1,9 \pm 0,9$ mSv, kar je primerljivo z našimi rezultati. Zaključili so, da je priporočljivo uporabiti CT za KA in fuzijo samo v primerih, ko rezultati niso zanesljivi pri lokalizaciji patološkega procesa. Larkin (2011) je v raziskavi ugotavljal porast ED pri uporabi SPECT/CT v primerjavi s SPECT. Pri bolnikih, pri katerih so opravili SPECT/CT običajno, se je povprečna ED po aplikaciji MIBI (925 MBq) povečala za $5,4 \pm 1,7$ mSv, kar bistveno presega naše vrednosti. Zaključili so, da relativno povečanje izpostavljenosti sevanju, povezano s SPECT/CT, velja za sprejemljivo glede na koristne lastnosti za bolnika. Radiološki inženirji in zdravniki morajo storiti vse potrebno, da zmanjšajo ta učinek z uporabo ustreznih tehničnih postopkov in z izobraževanjem. Montes (2013) je v svoji raziskavi zaključil, da je ED zaradi izvedbe CT relativno nizka v primerjavi z ED po aplikaciji RF. Zaključili so, da je CT slikanje samo za izvedbo fuzije in KA upravičeno zaradi nižjega odmerka doze. V rezultatih njihove študije se je ED pri SPECT/CT običajno povečala za 0,6 mSv. Brix (2005) in Khamwan (2010) sta v svoji raziskavi ugotavljala porast ED zaradi uporabe CT pri PET/CT preiskavi celega telesa. Ugotovila sta, da se ED na bolnika po CT slikanju poveča med 14,1 in 18,6 mSv. ED pri PET/CT običajno je opisal van Raalte (2015) in izračunal, da se zaradi uporabe CT ED poveča za 1,5–2 mSv. Sevalna obremenitev po aplikaciji RF FCH je bila 4,3 mSv, kar je za 100 % višje kot v naši raziskavi.

ZAKLJUČEK

CT slikanje v kombinaciji s SPECT in PET ima pomembno vlogo pri korekciji atenuacije in fuziji anatomske in funkcionalne informacije pri hibridnih nuklearnomedicinskih preiskavah (SPECT/CT in PET/CT), kar je nujen predpogoj za kvalitetno oceno scintigramov. Kljub nekoliko povečani sevalni obremenitvi bolnikov se pri oceni korigiranih fuzijskih slik pomembno izboljša senzitivnost in specifičnost diagnostičnega postopka, dodatna sevalna obremenitev pa za bolnika ne predstavlja pomembnega dodatnega tveganja

LITERATURA

Beyer T, Veit-Haibach P. (2014). State-of-the-art SPECT/CT: technology, methodology and applications-defining a new role for an undervalued multimodality imaging technique. *Eur J of Nucl Med Mol I* 41(Suppl 1): 1. doi: 10.1007/s00259-014-2696-8.

Brenner DJ, Hall EJ. (2007). Computed tomography - an increasing source of radiation exposure. *New Engl J Med* 357(22):2277–84. doi: 10.1056/NEJMra072149.

Brix G, Lechel U, Glatting G, Ziegler SI, Munzing W, Muller SP, Beyer T. (2005). Radiation exposure of patients undergoing whole-body dual-modality 18F-FDG PET/CT examinations. *J Nucl Med* 46(4):608–13.

Einstein AJ, Henzlova MJ, Rajagopalan S. (2007). Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA* 298(3): 317–23.

Goldman LW. (2007). Principles of CT: radiation dose and image quality. *J Nucl Med Technol* 35(4): 213–25.

Gould KL, Pan T, Loghin C, Johnson NP, Guha A, Sdringola S. (2007). Frequent diagnostic errors in cardiac PET/CT due to misregistration of CT attenuation and emission PET images: a definitive analysis of causes, consequences, and corrections. *J Nucl Med* 48(7): 1112–21.

Greenspan BS, Dillehay G, Intenzo C, Lavelly WC, O'Doherty M, Palestro CJ, Scheve W, Stabin MG, Sylvestros D, Tulchinsky M (2012). SNM practice guideline for parathyroid scintigraphy 4.0. *J Nucl Med Technol* 40(2): 111–8. doi: 10.2967/jnmt.112.105122.

Guttikonda R, Herts BR, Dong F, Baker ME, Fenner KB, Pohlman B. (2014). Estimated radiation exposure and cancer risk from CT and PET/CT scans in patients with lymphoma. *Eur J Rad* 83 (6):101–5. doi: 10.1016/j.ejrad.2014.02.015.

Hoang JK, Reiman RE, Nguyen GB, Januzis N, Chin BB, Lowry C, Yoshizumi TT (2015). Lifetime Attributable Risk of Cancer From Radiation Exposure During Parathyroid Imaging: Comparison of 4D CT and Parathyroid Scintigraphy. *AJR* 204(5): W579–8. doi: 10.2214/AJR.14.13278.

ICRP. (2015). Radiation Dose to Patients from

- Radiopharmaceuticals: a Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP 44, 1–321.
- Kennedy JA, Israel O, Frenkel A (2009). Directions and magnitudes of misregistration of CT attenuation-corrected myocardial perfusion studies: incidence, impact on image quality, and guidance for reregistration. *J Nucl Med* 50(9): 1471–8. doi: 10.2967/jnumed.109.062141.
- Khamwan K, Krisanachinda A, Pasawang P (2010). The determination of patient dose from (18)F-FDG PET/CT examination. *Radiat Prot Dosim* 41(1): 50–5. doi: 10.1093/rpd/ncq140.
- Kluijfhout WP, Vorselaars WMCM, Vriens MR, BorelRinkes IHM, Valk GD, de Keizer B (2015). Enabling minimal invasive parathyroidectomy for patients with primary hyperparathyroidism using Tc-99m-sestamibi SPECT-CT, ultrasound and first results of (18)F-fluorocholine PET-CT. *Eur J Radiol* 84(1): 1745–1751. doi: 10.1016/j.ejrad.2015.05.024.
- Krausz Y, Bettman L, Guralnik L et al. (2006). Technetium-99m-MIBI SPET/CT in PHPT. *World J Surg* 30(1): 76–83.
- Larkin AM, Serulle Y, Wagner S, Noz ME, Friedman K (2011). Quantifying the increase in radiation exposure associated with SPECT/CT compared to SPECT alone for routine nuclear medicine examinations. *Int J Mol Imaging* 2011: 897202. doi: 10.1155/2011/897202.
- Lavelly WC, Goetze S, Friedman KP et al. (2007). Comparison of SPET/CT, SPET, and planar imaging with single- and dual-phase 99mTc-MIBI parathyroid scintigraphy. *J Nucl Med* 48(7): 1084–9.
- Lezaic L, Rep S, Sever MJ, Kocjan T, Hocevar M, Fettich J (2014). 18F-Fluorocholine PET/CT for localization of hyperfunctioning parathyroid tissue in primary hyperparathyroidism: a pilot study. *Eur J Nucl Med Mol I* 41(11): 2083–9. doi: 10.1007/s00259-014-2837-0.
- Micaud L, Balogova S, Burgess A, Ohnona J, Huchet V, Kerrou K et al. (2015). A pilot comparison of 18F-fluorocholine PET/CT, ultrasonography and 123I/99mTc-sestaMIBI dual-phase dual-isotope scintigraphy in the preoperative localization of hyperfunctioning parathyroid glands in primary or secondary hyperparathyroidism: influence of thyroid anomalies. *Medicine (Baltimore)* 94(41): e1701. doi: 10.1097/MD.0000000000001701.
- Preuss R, Weise R, Lindner O, Fricke E, Fricke H, Burchert W. (2008). Optimisation of protocol for low dose CT-derived attenuation correction in myocardial perfusion SPECT imaging. *Eur J Nucl Med Mol I* 35:1133–41.
- Sharma P, Sharma S, Ballal S, Bal C, Malhotra A, Kumar R. (2012). SPECT-CT in routine clinical practice: increase in patient radiation dose compared with SPECT alone. *Nuc Med Commun* 33(9): 926–32. doi: 10.1097/MNM.0b013e328355b6d5.
- Souvatzoglou M, Bengel F, Busch R, Kruschke C, Fernolendt H, Lee D, Schwaiger M, Nekolla SG. (2007). Attenuation correction in cardiac PET/CT with three different CT protocols: a comparison with conventional PET. *Eur J Nucl Med Mol I* 34 (12):1991–00.
- Townsend DW. (2004). Physical principles and technology of clinical PET imaging. *Ann Acad Med Singapore* 33(2): 133–45.
- Van Raalte, D.H., Vlot, M.C., Zwijnenburg, A., & ten Kate, R.W. F18-Choline PET/CT: a novel tool to localize parathyroid adenoma? *Clin Endocrinol (Oxf)* 82(6): 910–912.
- Wei WJ, Shen CT, Song HJ, Qiu ZL, Luo QY. (2015). Comparison of SPET/CT, SPET and planar imaging using 99mTc-MIBI as independent techniques to support minimally invasive parathyroidectomy in primary hyperparathyroidism: A meta-analysis. *Hell J Nucl Med* 18(2): 127–35. doi: 10.1967/s002449910207.
- Zanzonico P. (2012). Principles of nuclear medicine imaging: planar, SPECT, PET, multi-modality, and autoradiography systems. *Radiat Res* 177(4): 349–64.