

Primjena niskodoznih kompjutoriziranih tomografskih pregleda u pedijatrijskoj radiologiji

Application of low dose computed tomography protocols in pediatric radiology

Bruno Atalić^{1*}, Danijela Veljković Vujaklija², Slaven Jurković³, Mirko Balić², Goran Roić⁴,
Damir Miletić²

¹ Medicinski fakultet Rijeka, Sveučilište u Rijeci

² Klinički zavod za radiologiju, Klinički bolnički centar Rijeka

³ Zavod za medicinsku fiziku i zaštitu od zračenja, Klinički bolnički centar Rijeka

⁴ Klinika za dječje bolesti Zagreb

Sažetak. Djeca su zbog svoje male veličine, brojnih staničnih dioba još uvijek rastućih i razvijajućih tkiva i organa, kao i dužeg očekivanog životnog vijeka, otprilike tri puta osjetljivija na iste doze ionizirajućeg zračenja od odraslih. To je posebno izraženo kod pregleda kompjutoriziranom tomografijom (engl. *computerized tomography*, CT) koji, iako čine samo 17 % ionizirajućih radioloških pregleda, sudjeluju s čak 49 % u ukupnom ozračivanju pacijenata. Zbog toga se pod utjecajem kampanje *Image Gently* početkom 2010-ih godina razmišljalo o potpunom napuštanju CT pregleda u pedijatrijskoj radiologiji te njihovoj zamjeni ultrazvučnim odnosno pregledima učinjenim magnetskom rezonancijom kao metodama izbora. Pojava Flash CT tehnike koja istovremeno skraćuje vrijeme snimanja i smanjuje doze zračenja dovela je do odustajanja od toga. Tome u prilog išle su i činjenice da su s jedne strane CT pregledi praktički nezamjenjivi u slučajevima trauma, dok su s druge strane djeca, kao uostalom i pripadnici svih drugih dobnih skupina, neprestano izložena manjoj ili većoj količini pozadinskog ionizirajućeg zračenja (Zemlja, svemir, zrakoplovi). U tome smislu danas se sve više preporučuje uporaba *low dose* CT (LDCT) tehnika individualno prilagođenih svakom pacijentu zbog njihove manje količine ionizirajućeg zračenja. Na tome putu nastojali smo napraviti pregled najnovijih spoznaja o spomenutoj problematici na temelju znanstvenih radova objavljenih u protekle tri godine (2016. – 2018.). Oni pokazuju da CT pregledi ne samo da nisu napušteni u pedijatrijskoj radiologiji, već naprotiv, u slučajevima brojnih indikacija LDCT pregledi čine *zlatni standard*.

Ključne riječi: abdomen; glava; muskuloskeletni sustav; niskodozni CT; pedijatrijska radiologija; toraks

Abstract. Due to their small size, numerous cellular divisions of the still growing and developing tissues and organs, as well as a longer life expectancy, children are approximately three times more sensitive to the same doses of ionizing radiation than adults. This is especially the case with the computerized tomography (CT) examinations, which despite making only 17 % of the ionizing radiological examinations, account for as much as 49 % of the total patient irradiation. Because of this, the *Image Gently* campaign in the early 2010s was thinking about abandoning the CT examinations in pediatric radiology and replacing them with the ultrasound or magnetic resonance imaging as the methods of choice. The appearance of Flash CT technology, which simultaneously shortens the recording time and reduces radiation doses, has led to the abandonment of this way of thinking. This is also supported by the fact that, on the one hand, CT examinations are practically irreplaceable in the cases of trauma, while on the other hand, children, as well as members of all the other age groups, are constantly exposed to a smaller or larger amount of the environmental ionizing radiation (Earth, space, airplanes). In this sense, it is increasingly recommended to use the low dose CT (LDCT) techniques individually adapted to each patient, due to their small amount of ionizing radiation. On this track, we have tried to make a review of the latest findings on the mentioned problem based on the scientific papers published over the past

*Adresa za dopisivanje:
Bruno Atalić, dr. med.
Klinički zavod za radiologiju,
Klinički bolnički centar Rijeka,
Krešimirova 42, 51 000 Rijeka
brunoatalic@yahoo.co.uk

<http://hrcak.srce.hr/medicina>

three years (2016-2018). They show that the CT examinations are not only abandoned in the pediatric radiology, but that on the contrary, in the cases of numerous indications LDCT examinations make the *gold standard*.

Key words: abdomen; head; low dose CT; musculoskeletal system; pediatric radiology; thorax

Pokrate:

AAPM – Američko udruženje medicinskih fizičara
 AC – kriteriji prikladnosti
 ACR – Američki radiološki koledž
 AFARA – ‘as fast as reasonably achievable’
 ALADA – ‘as low as diagnostically acceptable’
 ALARA – ‘as low as reasonably achievable’
 ASIR – adaptivne statističke iterativne rekonstrukcije
 ASRT – Američko društvo radioloških tehnologa
 CT – kompjutorizirana tomografija
 CTA – CT angiografija
 DECT – dvoenergijski CT
 DSCT – dvoizvorni CT
 EBM – medicina utemeljena na dokazima
 ESR – Europsko radiološko društvo
 FDA – Američko udruženje za hranu i lijekove
 LDCT – niskodozni CT
 LDHRCT – niskodozni CT visoke rezolucije
 MBIR – model bazirane iterativne rekonstrukcije
 MDCT – višedetektorski CT
 MECT – monoenergijski CT
 MOSCT – jednoizvorni CT
 MSCT – višeslojni CT
 PAS – pedijatrijska bodovna tablica za procjenu apendicitisa
 PCT – perfuzijski CT
 SCT – spiralni CT
 SPCT – spektralni CT
 SPR – Društvo za pedijatrijsku radiologiju
 ULDCCT – ultraniskodozni CT
 UTS – ultrazvuk

RAZVOJ KOMPJUTORIZIRANE TOMOGRAFIJE – VIŠE INFORMACIJA UZ MANJE ZRAČENJA

Kompjutorizirana tomografija (engl. *computed tomography*, CT) je radiološka tehnika slojevnog snimanja koja se temelji na kompjutorskoj rekonstrukciji tomografskih presjeka skeniranog dijela tijela dobivenih iz različitih kuteva prolaska ionizirajućeg zračenja kroz tijelo, kod čega je detektor na suprotnoj strani u odnosu na izvor zračenja.

CT karakterizira izvrsna prostorna rezolucija i brzina dobivanja dijagnostičke informacije, što ovu metodu čini nezamjenjivom u hitnim stanjima. No, CT je i najveći izvor zračenja populacije, prvenstveno zbog kontinuiranog porasta broja CT pregleda u razvijenim zemljama. CT je izum engleskog elektroinženjera Sir Godfreyja Newbolda Hounsfielda (1919. – 2004.) iz 1967. godine, a prvi CT pregled glave učinjen je davne 1971. godine. Hounsfield je za svoj izum 1979. godine primio Nobelovu nagradu, 1981. godine je proglašen vite-

Kompjutorizirana tomografija (engl. *computerized tomography*, CT) je radiološka tehnika slojevnog snimanja koja se temelji na kompjutorskoj rekonstrukciji tomografskih presjeka pregledavanog dijela tijela dobivenih iz različitih kuteva snimanja ionizirajućim zračenjem detektiranim višestrukim detektorima.

zom, a po njemu je nazvana i relativna ljestvica za kvantificiranje denziteta struktura prikazanih na CT presjecima. CT ubrzo dobiva komercijalnu uporabu, prvenstveno zbog mogućnosti prikaza mekotivnih struktura unutar koštanog okvira, primjerice mozga i kralježnične moždine, što ranijim metodama nije bilo moguće¹.

Već tijekom prvog desetljeća njegove uporabe smjenjuju se četiri generacije CT uređaja, od kojih se danas zbog svoje praktičnosti koristi treća generacija, koja se temelji na lučnome kretanju cijevi i detektora oko dijela pacijentova tijela, čime se prikazuje njegov poprečni presjek. Razvojem tehnike nastaje spiralni CT (engl. *spiral CT*, SCT) koji rješava raniji problem mogućeg preskakanja anatomskih struktura zbog različito dubokog udaha između susjednih skenova. U novije vrijeme višedetektorski CT (engl. *multidetector CT*, MDCT) koristi detektor podijeljen u više redova uz spiralnu tehniku te postiže prikaz izotropnog voksel, odnosno dobivanje optimalnih rekonstrukcija kroz skenirani volumen u sve tri dimenzije. Napredne tehnike poput perfuzijskog CT-a (engl. *perfusion CT*, PCT) koji se temelji na doziranoj primjeni jednog kontrasta s ciljem uočavanja ispada cirkulacije te dvoenergijskog CT-a (engl. *dual energy CT*, DECT) koji koristi dvije različite energije prilikom snimanja s ciljem prikazivanja različiti-

tih atenuacijskih osobina snimanog dijela tijela za razliku od tradicionalno korištenog monoenergij-skog CT-a (engl. *mono energy CT*, MECT) koji koristi samo jednu energiju, donose nove opasnosti od prekomjernog izlaganja ionizirajućem zračenju. Opravdana je zabrinutost zbog posljedica izloženosti visokim dozama ionizirajućeg zračenja, jer iako CT pregledi čine samo 17 % ionizirajućih radioloških pregleda, oni sudjeluju s čak 49 % u ukupnom ozračivanju pacijenata. Nadalje, CT protokoli često zahtijevaju ponavljana snimanja, pa se tako u prosjeku 30 % CT-om pregledanih pacijenata snima tri puta, 7 % pet puta, a 4 % devet ili više puta, što povećava njihovu pojedinačnu izloženost ionizirajućem zračenju. Konačno, to je posebice izraženo kod djece koja su zbog svoje male veličine, brojnih staničnih dioba još uvijek rastućih i razvijajućih tkiva i organa, kao i dužeg očekivanog životnog vijeka, otprilike tri puta osjetljivija na iste doze ionizirajućeg zračenja od odraslih².

Parametri koji utječu na dozu ionizirajućeg zračenja tijekom CT snimanja su: napon (kV), jakost struje (mA), vrijeme rotacije rendgenske cijevi (koje je jednako vremenu izlaganja ionizirajućem zračenju), debljina sloja (kolimacija), *pitch* (pomak stola tijekom jedne rotacije kućišta od 360°), udaljenost rendgenske cijevi od CT izocentra i dužina trajanja ekspozicije³. Dok je povezanost između napona cijevi i doze ionizirajućeg zračenja nelinearna, povezanost između jakosti struje i doze ionizirajućeg zračenja je linearna, što treba uzeti u obzir prilikom izrade adekvatnih protokola za izvođenje pregleda. Biološki učinci ionizirajućeg zračenja mogu se podijeliti na determinističke i stohastičke⁴. Deterministički su određeni pragom doze koji se mora prijeći da bi se oni pojavili te se rijetko javljaju u dijagnostičkoj radiologiji, s iznimkom intervencijskih postupaka u angio salama i CT fluoroskopije ako se zanemare mjere opreza, a tipično se javljaju kao posljedica radioterapije tumora. Vjerojatnost pojave stohastičkih učinaka raste proporcionalno s porastom doze, pri čemu njihova težina ne ovisi o dozi zračenja već o kompleksnim čimbenicima kao što je dioba stanica, što znači da su na njih posebno osjetljiva djeca zbog već ranije navedene veće zastupljenosti stanica koje se dijele u njihovim organizmima.

Za razliku od determinističkih, stohastički učinci se ne manifestiraju odmah nakon izlaganja ionizirajućem zračenju, nego ih karakterizira različito dugo vrijeme latencije⁵.

Niz je studija koje su pokušale odrediti rizik nastanka karcinoma nakon izloženosti ionizirajućem zračenju. Većina starijih studija temeljila se na podacima dobivenim dugogodišnjim praćenjem pojave karcinoma u ljudi ozračenih nakon bacanja atomskih bombi u Japanu te u radnika u nuklearnoj industriji⁶⁻⁸. Svega je nekoliko epidemioloških studija koje procjenu rizika nastanka tumora nakon radioloških pregleda u dječjoj dobi temelje na procjeni doze zračenja dobivene tijekom pojedinih radioloških pregleda, prvenstveno CT pregleda⁹⁻¹¹. Studija Pearce i sur. iz 2012. godine uključila je 180 000 ispitanika mlađih od 22 godine, među kojima je u razdoblju od 17 godina učinjeno ukupno 280 000 CT pregleda¹². Za svakog pacijenta utvrđena je individualna doza zračenja za koštanu srž i mozak s obzirom na to da najkraću latenciju pojave nakon ozračenja imaju upravo tumori tih dvaju organa. Na temelju sakupljenih podataka o broju karcinoma nakon ozračenja tijekom CT pregleda utvrđena je značajna linearna povezanost između doze zračenja i rizika od leukemije i tumora mozga, pa je tako utvrđen desetogodišnji rizik za razvoj leukemije i tumora mozga 1 : 10 000, a cjeloživotni rizik za tumore mozga 1 : 1 000 te leukemije 1 : 7 500. Najnovije velike kohortne studije iz Australije i Europe, koje su redom uključivale 680 000 i 1 170 186 ispitanika, potvrdile su povećanu incidenciju karcinoma u osoba koje su u dobi do 19 odnosno 22 godine jednokratno ili višekratno bile izložene ionizirajućem zračenju tijekom CT pregleda¹³. Pri tome je europska studija potvrdila o dozi ovisan povećan rizik od nastanka tumora mozga i leukemije¹⁴, dok je australska studija ukazala na povećani rizik za većinu solidnih tumora, leukemija i mijelodisplazija. Prema australskoj studiji apsolutni rizik za nastanak tumora induciranih ionizirajućim zračenjem je 9,38 novih slučajeva na 100 000 ozračenih u dobi od 0 do 19 godina u usporedbi s očekivanim rizikom¹⁵.

S ciljem smanjivanja doza ionizirajućeg zračenja u pregledima djece 2006. godine osniva se Udruga za radijacijsku sigurnost u pedijatrijskoj dijagno-

stici pod nazivom Image Gently koja u skladu s općeprihvaćenim radiološkim postulatima o ionizirajućem zračenju 'as low as reasonably achievable' (ALARA), te za pedijatrijsku radiologiju prilagođenim postulatima 'as fast as reasonably achievable' (AFARA), nastoji definirati najbolju praksu za radiološku dijagnostiku pedijatrijskih pacijenata s ciljem ispunjenja postulata 'as low as diagnostically acceptable' (ALADA). Njihova misija je putem edukacije unaprijediti sigurnost i efektivnost radiološke dijagnostike kod djece. Navedenu kampanju financijski i logistički podupiru četiri američka radiološka društva (SPR – *Society for Pediatric Radiology*, ACR – *American College of Radiology*, ASRT – *American Society for Radiologic Technologists*, AAPM – *American Association of Physicists in Medicine*)¹⁶. Treba imati na umu da smanjenje doze zračenja ne smije ugroziti dobivanje relevantne dijagnostičke informacije. Smanjenje zračenja neminovno dovodi do smanjenja omjera signala i šuma i čini CT sliku zrnatijom, no cilj radiološke dijagnostike nije slika vrhunske kvalitete, nego slika s očuvanom dijagnostičkom informacijom.

Početkom 2010-ih godina čak se razmišlja o potpunoj obustavi CT pregleda djece, te se ultrazvučni (engl. *ultrasound*, UTS) i pregledi učinjeni magnetskom rezonancijom (engl. *magnetic resonance*, MR) preporučuju kao metoda izbora u pedijatrijskoj radiologiji zbog toga jer se MR pregledi ne temelje na ionizirajućem zračenju, zbog čega se percipiraju sigurnima. Treba, međutim, imati na umu da zbog svoje dugotrajnosti te potrebe za potpunom nepomičnošću pacijenta tijekom izvođenja pregleda kod nesuradljivih pacijenata, kakav je značajan postotak djece, pogotovo one mlađe, MR pregledi zahtijevaju primjenu anestezije sa svim njezinim potencijalnim komplikacijama, koje su posebice izražene u djece do dvije godine starosti, kod kojih mozak još nije u potpunosti mijeliziran¹⁷⁻¹⁹. Zbog toga su Bai i sur. izradili model za proučavanje neurotoksičnosti anestezika na nerazvijeni mozak. Na temelju prethodnih *in vivo* istraživanja provedenih na glodavcima i primatima, koja su ustanovila da produžena izloženost nerazvijenog mozga anestetikima uzrokuje smrt neurona s posljedičnim otežanim pamćenjem te poteškoćama u učenju,

kreirali su *in vitro* model kulture tkiva novorođenačkih životinjskih neurona. Njime su dokazali da izofluran utječe na proliferaciju ljudskih neurona te neurogenezu, dok ketamin uzrokuje neuroapoptozu²⁰.

Budući da zbog etičkih razloga nije moguće kreirati prospektivnu kliničku studiju koja bi sa stopostotnom sigurnošću utvrdila utjecaj anestetika na neurokognitivne funkcije djece do dvije godine starosti, zaključci se moraju izvoditi iz kombinacije istraživanja na laboratorijskim životinjama te retrospektivnih kliničkih studija već ranije učinjenih operacija i pregleda uz primjenu anestezije. Metaanalize provedene na temelju njih pokazale su da anestezija uzrokuje neuroapoptozu te druge neurodegenerativne promjene u nerazvijenom dječjem mozgu s kasnijim raznolikim neurobihevioralnim ispadima²¹. Zbog toga je 14. prosinca 2016. godine Američka agencija za hranu i lijekove (*United States Food and Drug Administration*, FDA) izdala upozorenje koje se odnosi na uporabu inhalacijskih anestetika isoflurana, sevoflurana i desflurana kod djece do tri godine starosti te procedura koje traju duže od tri sata, neovisno je li riječ o operacijama ili pregledima. Kao potencijalno rješenje predložena je zamjena alternativnim metodama. U slučaju MR pregleda to znači njihovo zamjenjivanje drugim radiološkim metodama, konkretno UTZ ili CT pregledima unatoč štetnosti njihovih ionizirajućeg zračenja²². Pojavom iznimno brzih MDCT uređaja i naprednih detektora, koji istovremeno skraćuju vrijeme snimanja i smanjuju dozu zračenja, CT metoda u pedijatriji dobiva novu dimenziju. Ne smije se zaboraviti da su CT pregledi praktički nezamjenjivi u pretragama pluća i kod politraume, dok s druge strane treba imati na umu da su djeca, kao uostalom i pripadnici svih drugih dobnih skupina, neprestano izložena manjoj ili većoj količini pozadinskog ionizirajućeg zračenja (radioaktivni materijali, kozmičko zračenje)²³. Kampanja *Image Gently* zalaže se za individualno prilagođavanje vrijednosti kVp te mAs svakom pojedinom djetetu, zatim za snimanje pojedinačnih skenova umjesto njihovih serija te za točno određivanje granica anatomske regije koje se snimaju. Uporaba niskodoznih tehnika CT-a (engl. *low dose*, LDCT), zbog njihove manje doze ionizirajućeg zra-

čenja, postaje dobra alternativa konvencionalnim CT pretragama, posebice u pedijatrijskoj radiologiji²⁴.

Na istom putu Europsko radiološko društvo (*European Society of Radiology*, ESR) odlučilo je ponuditi aktualne te internetski lako dostupne smjernice za izvođenje radioloških dijagnostičkih pregleda. Cilj im je kroz metodologiju proizašla iz medicine utemeljene na dokazima (engl. *Evidence Based Medicine*, EBM) uspostaviti zajedničke kriterije za cijelu Europu. U skladu s time radna skupina iskusnih radiologa koje je imenovao ESR, na temelju Kriterija prikladnosti (engl. *Appropriateness Criteria*, AC) već ranije navedenog ACR-a kreirao je internetsku platformu spremnu ponuditi adekvatne odgovore na 80 % svakodnevnih pitanja radiologa iz različitih europskih zemalja, među kojima je njih 10 dosad službeno usvojilo njihove smjernice kao svoje protokole. Treba istaknuti da se njihovi kriteriji unaprjeđuju godišnje u skladu s najnovijim istraživanjima. Pritom posebno mjesto među obuhvaćenim područjima (kardijalna, torakalna, gastrointestinalna, urogenitalna, muskuloskeletna, vaskularna radiologija te radiologija dojke i neuroradiologija) zauzima pedijatrijska radiologija. Vezano za CT preglede djece s ciljem smanjivanja doza ionizirajućeg zračenja, oni također preporučuju optimizaciju CT protokola putem individualnog prilagođavanja vrijednosti kVp te mAs svakom pojedinom djetetu te snimanja polovičnih (engl. *half-slice*) skenova²⁵.

Nasuprot ranije navedenim činjenicama Siegel i sur. iznijeli su tezu da radiofobija, odnosno strah od zračenja, u konačnici šteti i djeci i roditeljima, jer povećava stres te kroz izbjegavanje adekvatnih radioloških metoda u dijagnostičkom procesu u konačnici dovodi do pogrešnog postavljanja dijagnoze. Autori čak idu toliko daleko da na temelju rezultata različitih studija tvrde da je pogrešno ranije izneseno općeprihvaćeno shvaćanje da su djeca radiosenzitivnija od odraslih te zaključuju da nema opravdanja za smanjivanjem doza ionizirajućeg zračenja kod pregleda djece. Prema njima naponi za smanjivanjem rizika od ozračivanja dovode do porasta radiofobije sa svim njezinim negativnim popratnim posljedicama²⁶. Yang i sur. su pak vrednovali automatsku kontrolu zračenja s ciljem optimizacije LDCT protokola za pacijente ra-

zličitih dobnih skupina, uključujući i djecu. U tu svrhu su koristili četiri antropomorfna fantoma koji su predstavljali djecu od 1, 5 i 10 godina te odraslu osobu. Pokazali su da se s ciljem smanjenja ozračivanja trebaju izraditi posebni protokoli za svaku dobnu skupinu²⁷.

Kao primjer uspješnog smanjivanja doza ionizirajućeg zračenja prilikom izvođenja CT pregleda može se navesti Pedijatrijska bolnica Saint Louis u Missouriju u Sjedinjenim Američkim Državama. Kroz međuođjelnu suradnju, povećanu dostupnost alternativnih dijagnostičkih metoda te uvođenje LDCT protokola tijekom sedmogodišnjeg razdoblja od 2005. do 2012. godine, u toj bolnici je za 50 % smanjena ukupna doza ionizirajućeg zračenja primljenog tijekom CT pregleda pedijatrijskih pacijenata. Istodobno je uvođenjem adekvatnih protokola te zbog svojih ionako malih doza ionizirajućeg zračenja LDCT postao *zlatni standard* u pedijatrijskoj radiologiji u njihovoj bolnici²⁸.

Tsujiguchi i sur. vrednovali su efektivnu dozu ionizirajućeg zračenja na temelju CT pregleda 753 pacijenta. Pritom su koristili specifičnu metodu za procjenu doze prema veličini pacijenata. Njihovi rezultati pokazali su veće doze zračenja u pacijenata manje veličine, što znači djece, kod istih protokola, u skladu s čime su predložili izradu posebnih LDCT protokola za preglede djece²⁹. Nagayama i sur. predložili su optimizaciju akvizicijskih parametara s ciljem postizanja dijagnostički prihvatljivog prikaza pri najnižoj mogućoj dozi ionizirajućeg zračenja, zbog čega su radili skenove učinjene niskim naponima rendgenske cijevi, kod kojih je doza ionizirajućeg zračenja značajno manja. Kao nuspojavu uočili su povećanje šuma, s posljedičnim smanjenjem kontrastne rezolucije koju su pripisali korištenju nižoj energiji RDG zraka i njihovoj manjoj prodornosti. Spomenuto nije bilo toliko izraženo kod djece kao kod odraslih, zbog njihove manje tjelesne veličine, pri čemu su za poboljšanu kontrastnost prikaza predložili primjenu jodnih kontrastnih sredstava, kao i izradu iteracijskih rekonstrukcijskih algoritama za smanjivanje šuma³⁰.

Ovim preglednim radom želimo dati presjek trenutne pozicije CT dijagnostike u pedijatrijskoj radiologiji te moguće projekcije razvoja ovog

dijagnostičkog postupka u budućnosti, koristeći podatke iz relevantne literature. Kako bismo predložili aktualna istraživanja, orijentali smo se prvenstveno na radove objavljene u posljednje tri godine (2016. – 2018.), koje smo zbog lakše preglednosti grupirali po anatomskim regijama. Pritom smo se, kao sredstvom njihova probira, služili PubMed tražilicom.

LDCT PREGLEDI RAZLIČITIH REGIJA U PEDIJATRIJSKOJ RADIOLOGIJI

LDCT pregledi glave i vrata

Kaul i sur. istraživali su snižavanje doze ionizirajućeg zračenja kroz uporabu prilagođenih statističkih iteracijskih rekonstrukcija, pri čemu su se koncentrirali na LDCT preglede glave. Svojom kliničkom studijom koja je obuhvatila 78 pedijatrijskih pacijenata u dobi od 0 do 12 godina pokazali su sniženja doza ionizirajućeg zračenja za 34,4 %, odnosno 64,4 % ovisno o uporabi $\frac{1}{2}$ odnosno $\frac{1}{4}$ prethodno standardno korištenih akvizicijskih parametara. Istodobno su uspjeli zadržati prihvatljivu razinu šuma i kontrastne rezolucije odnosno dijagnostičku vrijednost tako dobivenih pregleda³¹. Iteracijske rekonstrukcije su novije softverske metode naknadne obrade podataka o slabljenju snopa dobivenih na detektorima CT uređaja. Radi se o složenim matematičkim postupcima kojima se značajno smanjuje šum na slici, što se koristi za dobivanje dijagnostički dostatne slike uz značajno smanjenje doze zračenja. U Pedijatrijskoj bolnici Seattle provedeno je retrospektivno istraživanje koje je uključilo dosad najveći broj pedijatrijskih pacijenata (2774) tako što su vrednovani svi LDCT pregledi glave (624) kao i svi standardni CT pregledi glave (2150) učinjeni od studenog 2011. do listopada 2012. godine. Ponovo su, kao i u prethodnoj studiji, korištene dvije različite vrijednosti LDCT pregleda koje su predstavljale $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{2}$ prethodno standardno korištenih akvizicijskih parametara CT pregleda glave. Najčešće indikacije za izvođenje pregleda su bile vrednovanje položaja ventrikularnog katetera kod pacijenata s hidrocefalusom (70 %) te kontrola nakon kraniosinostoze (12 %). Svi pregledi učinjeni navedenim LDCT tehnikama bili su dijagnostički zadovoljavajući i nije bilo potrebe za njihovim ponavljanjima. Istovremeno je značajno

smanjena izloženost ionizirajućem zračenju promatrane populacije neurokirurških pedijatrijskih pacijenata³². Zacharias i sur. izvijestili su o uporabi *limited sequence* LDCT pregleda kod djece s hidrocefalusom na temelju istraživanja provedenog u John Hopkins Hospital koje je pokazalo da uporaba 7 umjesto standardnih 32 do 40 skenova, s jedne strane daje dovoljno informacija za procjenu funkcioniranja drenažnog katetera, dok s druge strane reducira dozu ionizirajućeg zračenja za 91,8 %³³.

Tada i sur. uspoređivali su kvalitetu prikaza temporalnih kostiju između 13 LDCT (120 kV/50 mAs) i 9 standardnih CT (120 kV/100 mAs) pregleda djece s 5 godina starosti. Dvojica radiologa ocjenjivala su mogućnost vizualizacije 14 malih anatomskih struktura putem ljestvice od 5 bodova. Šum je bio značajno viši, a omjer između signala i šuma značajno manji kod LDCT pregleda. Usprkos tome kvaliteta svih dobivenih prikaza objema tehnikama bila je prihvatljiva, odnosno iznad 3 boda na opisanoj ljestvici. Pri tome je *doze-length product* kao dozni parametar ionizirajućeg zračenja CT cijevi po sloju fantoma iznosio 59,6 mGy/cm za LDCT te 119,3 mGy/cm za standardne CT preglede³⁴.

Wuest i sur. proveli su prospektivno istraživanje na kohorti od 129 pacijenata različite dobi, uključujući i djecu, kako bi istraživali učinkovitost LDCT pregleda paranazalnih sinusa. Pritom su 64 slučajno odabrana pacijenta skenirana standardnim CT protokolom (100 kV, 150mAs, 192x0,6-mm kolimacija snopa) te 65 pacijenata LDCT protokolom (100 kV, 50mAs, 128 x 0,6-mm kolimacija snopa). Unatoč navedenim razlikama u skeniranju sve dobivene snimke imale su dobru dijagnostičku kvalitetu koštanih i mekih tkiva, pri čemu je doza ionizirajućeg zračenja bila značajno manja u drugoj skupini ispitanika ($p < 0,001$), zbog čega su preporučili da se navedeni pregled izvodi s akvizicijskim parametrima kod kojih je efektivna doza $< 0,05$ mSv³⁵. Sun i sur. vrednovali su kliničku primjenu iterativnih rekonstrukcija kod ultraniskodoznih CT (engl. *ultra low dose*, ULDCT) pregleda paranazalnih sinusa djece. Također su pokazali da se na taj način mogu dobiti skenovi podjednake dijagnostičke kvalitete i značajno manje ionizirajuće doze u odnosu na standardne protokole³⁶.

CT je zbog svoje brzine akvizicije podataka te visoke prostorne rezolucije, kao i mogućnosti prikaza detaljnih anatomskih informacija, metoda izbora za dijagnostiku pojedinih regija glave i vrata u odnosu na MR. Navedeno se prvenstveno odnosi na dijagnostiku larinksa, hipofarinksa, paranasalnih sinusa i temporalne kosti. Moguće nuspojave takvog dijagnostičkog pristupa su nastanak katarakte te razvoj malignih tumora u radiosenzitivnim organima, primjerice štitnjači, žlijezdama slinovnicama i mrežnici, što je osobito izraženo kod djece, zbog čega su Yabuuchi i sur. predložili smanjivanje doze ionizirajućeg zračenja u sklopu LDCT pristupa te optimizaciju parametara izvođenja kontrolnih pregleda, poput perfuzijskog CT-a, dinamičkog CT-a i CT praćenja malignih tumora³⁷.

Cheng i sur. su vrednovali kvalitetu dijagnostičkog prikaza glave i vrata CT angiografijom (CTA) izvođenom u pedijatrijskih pacijenata kombinacijom primijenjenog niskog napona rendgenske cijevi i iteracijskih rekonstrukcija. Osamdeset i tri pedijatrijska pacijenta podijeljena su na grupu A (42 sudionika), kod kojih je pregled izvođen sa 100 kV i 50 ml kontrastnog sredstva, i grupu B (41 sudionik), kod kojih je pregled izvođen s 80 kV i 30 ml kontrastnog sredstva. Grupa B je posljedično primila 69,8 % manju dozu ionizirajućeg zračenja i 40,0 % manje kontrastnog sredstva, te je imala značajno više CT vrijednosti denziteta prikazanih arterija i manji šum u odnosu na grupu A ($p < 0,01$)³⁸.

LDCT pregledi torakalnih organa

Zacharias i sur. u svojoj već ranije prikazanoj studiji ponudili su smjernice za korištenje CT-a srca kod pedijatrijskih pacijenata, imajući na umu njihove visoke srčane frekvencije. Iako retrospektivni spiralni CT skenovi imaju najveće doze ionizirajućeg zračenja u odnosu na alternativne *flash* i prospektivne sekvencijsko-adaptacijske skenove, oni istodobno daju najviše dijagnostičkih podataka o morfologiji i funkciji srca, zbog čega se koriste kao metoda izbora kod pacijenata s prirođenim srčanim greškama. Zbog toga su s ciljem njihove daljnje uporabe predložili uporabu EKG kontrolirane modulacije struje cijevi s posljedično značajnim smanjenjem doze ionizirajućeg zračenja³³. Kao što je već navedeno, djeca imaju

više srčane frekvencije od odraslih, zbog čega su Habib i sur. proveli istraživanje s ciljem utvrđivanja mogućnosti uporabe LDCT angiografije kod djece sa srčanom frekvencijom većom od 65 u minuti. Retrospektivno su analizirali preglede 125 djece starosti od 0 do 6 godina. Pokazali su da je moguće koristiti LDCT angiografije i kod djece sa srčanom frekvencijom većom od 65 u minuti, jer su kvalitete dobivenih pregleda bile zadovoljavajuće, neovisno o sistoli i dijastoli, a pri značajno manjim dozama ionizirajućeg zračenja³⁹.

Plućni parenhim je zbog prevelike refleksije ultrazvučnog snopa i premalene količine vodika nepogodan za UTZ, odnosno MR dijagnostiku, te je CT, usprkos tome što se temelji na uporabi ionizirajućeg zračenja, metoda izbora u radiološkoj dijagnostici pluća. Budući da je unatoč visokim dozama ionizirajućeg zračenja CT metoda izbora u radiološkoj dijagnostici toraksa, Lambert i sur. su na tri reprezentativna primjera demonstrirali kvalitetu dijagnostičkog prikaza ULDCT-a. Kod 18-godišnje djevojke oboljele od reumatoidnog atritisa opisali su alveolitis, kod 11-godišnjakinje multifokalni osteomijelitis, a kod 9-godišnje djevojčice oboljele od mukopolisaharidoze tri hamartoma, peribronhijalne infiltrate i deformaciju kralježnice. Iako se spomenute dijagnoze obično postavljaju na CT pregledima dobivenim standardnim akvizicijskim parametrima, oni su uporabom ULDCT tehnika uspjeli postići sniženje doza ionizirajućeg zračenja na vrijednosti od svega nekoliko klasičnih radiograma grudnih organa, istodobno ne kompromitirajući njihovu dijagnostičku vrijednost⁴⁰. Roik i sur. su kroz kombinaciju LDCT pregleda i iteracijskih rekonstrukcija kreirali protokol za CT pregled toraksa novorođenčadi primijenili su za dijagnosticiranje raznovrsnih prirođenih grešaka, pri čemu su uz smanjenje doze ionizirajućeg zračenja uspjeli održati dijagnostičku kvalitetu slike⁴¹.

Višeslojni CT (engl. *multislice* CT, MSCT) toraksa obično se izvodi pri umnošcima jakostima struje i vremena između 100 i 200 mAs, što za sobom povlači visoke doze ionizirajućeg zračenja. Nasuprot tome, snižavanje jakosti struje ne snižava samo doze ionizirajućeg zračenja, već također posljedično povećava šum te smanjuje kontrastnu rezoluciju prikaza⁴². Zbog toga su Lucaya i sur.

proveli tri uzastopne studije na ukupno 203 pedijatrijska pacijenta različite dobi, kojima su učinjeni pregledi pluća niskodoznom CT tehnikom visoke rezolucije (engl. *low dose high resolution CT*, LDHRCT). LDHRCT pregledi su izvođeni pri umnošcima jakosti struja i vremena od 180, 50 i 34 mAs u tri grupe od po 25 pedijatrijskih pacijenata. Efektivne doze ionizirajućeg zračenja iznosile su $5,4 \pm 1,6$ mSv pri 180 mAs, $1,5 \pm 0,5$ mSv pri 50 mAs i $1,1 \pm 0,3$ mSv pri 34 mAs. Budući da se radilo o djeci, suradnja je postignuta u 66 % pregleda, dok su artefakti bili najčešći u nesuradljivih pacijenata. Nikakva razlika u kvaliteti pregleda nije uočena na skenovima dobivenim pri 180 mAs i 50 mAs ($p < 0,05$), a tek mala pri 34 mAs za fisure ($p = 0,005$) i periferne strukture ($p = 0,02$). Tako su LDHRCT pregledi uz značajno smanjenje doze ionizirajućeg zračenja (72 % kod 50 mAs te 80 % kod 34 mAs) uspjeli ostvariti slikovne prikaze dobre kvalitete pri 50 mAs, unatoč nesuradljivosti pacijenata, te pri 34 mAs kod suradljivih pacijenata⁴³.

Chen i sur. kreirali su prospektivnu studiju koja je obuhvatila 206 pedijatrijskih pacijenata s kompleksnim prirođenim srčanim greškama kojima je učinjena *dual energy* angiografija skeniranjem energijama različitih vrijednosti kilovolta. Pacijenti su bili podijeljeni u dvije grupe: grupu A, kod kojih je učinjena *low dose* retrospektivna EKG kontrolirana CT angiografija te grupu B, kod koje je učinjena prospektivna EKG kontrolirana CT angiografija. Kod retrospektivne EKG metode srce i velike krvne žile se skeniraju spiralnom tehnikom i kontinuiranom ekspozicijom te se naknadno iz dobivenog zapisa uzimaju segmenti u kojima je srce bilo u željenoj fazi srčanog ciklusa. Ta je metoda jednostavnija za izvođenje uz sigurniji uspjeh pretrage, ali i veće zračenje za pacijenta. S druge strane, prospektivna EKG sinkronizacija podrazumijeva zračenje samo u unaprijed zadanim vremenskim razmacima koji su usklađeni sa srčanim ciklusom. Njihovi rezultati pokazali su da su obje grupe imale preglede podjednake dijagnostičke kvalitete, pri čemu su djeca iz grupe B primila značajno manje doze ionizirajućeg zračenja od djece iz grupe A⁴⁴.

Poseban izazov predstavljaju pedijatrijski pacijenti liječeni od tumora kod kojih se javlja febrilna

neutropenija. S jedne strane potrebno je što brže postaviti točnu dijagnozu kako ne bi došlo do generaliziranja infekcije u imunokompromitiranih pacijenata, pri čemu je CT toraksa metoda izbora za dijagnostiku plućnih bolesti, što s druge strane rezultira njihovim ponavljanim ozračivanjima koja mogu dovesti do razvoja novih tumora. Zbog toga su Zaleska-Dorobisz i sur. kreirali LDCT protokol za pregled toraksa kojim su obuhvatili 138 pedijatrijskih pacijenata srednje dobi od 8,08 godina. U njih 116 (84,06 %) detektirali su *ground-glass* zamućenja ($n = 79$), nodule ($n = 60$) i zračno-bronhogramske konsolidacije ($n = 58$). Nadalje, kod njih 94 (81,03 %) točno su dijagnosticirali upalne infiltrate⁴⁵.

Sun i sur. demonstrirali su prednosti model baziranih iterativnih rekonstrukcija (engl. *model based iterative reconstructions*, MBIR) nasuprot adaptivnih statističkih iterativnih rekonstrukcija (engl. *adaptive statistical iterative reconstructions*, ASIR) kod LDCT pregleda djece s nekrotizirajućom pneumonijom. Obuhvatili su 26 djece u dobi od 2 mjeseca do 11 godina čije su LDCT preglede toraksa neovisno analizirala dvojica radiologa te uspoređivali svoje rezultate Friedmanovim testom. Zaključili su da su pregledi dobiveni MBIR-tehnikom imali značajno veću dijagnostičku kvalitetu u odnosu na preglede dobivene ASIR-tehnikom⁴⁶. U istu svrhu Kim i sur. vrednovali su kvalitetu prikaza i smanjenje doze između ULDCCT pregleda toraksa djece rekonstruiranih MBIR i ASIR-tehnikama. U istraživanje su uključili 57 djece srednje dobi od 14 godina čije su preglede neovisno analizirala trojica radiologa te svoje rezultate uspoređivala statističkom analizom. Također su pokazali da pregledi učinjeni MBIR-tehnikom imaju značajno veću dijagnostičku kvalitetu te 90 % manje doze ionizirajućeg zračenja u odnosu na preglede učinjene ASIR-tehnikom⁴⁷.

LDCT pregledi abdomena

Budući da glavni dijagnostički izazov kod djece predstavlja akutni *appendicitis*, Sayed i sur. uspoređivali su dijagnostičku pouzdanost LDCT-a, pedijatrijske bodovne ljestvice *apendicitisa* (engl. *pediatric appendicitis score*, PAS) i UTZ abdomena kod djece s akutnim *apendicitisom*. S tim ci-

ljem su kreirali retrospektivnu studiju koja je obuhvatila 140 djece operirane zbog sumnje na akutni appendicitis (45 s potvrđenim te 95 s opovrgnutim akutnim apendicitisom). Rezultati su pokazali osjetljivost, specifičnost i točnost za LDCT 97,8 %, 100 % i 99,3 %, za PAS 95 %, 84 % i 89 %, te za UTZ abdomena 55,6 %, 85 % i 71 %, što i dalje LDCT preglede čini *zlatnim standardom*⁴⁸. Yi i sur. kreirali su sličnu studiju tako što su 475 pedijatrijskih pacijenata mlađih od 10 godina podijelili u 3 grupe prema vrsti učinjene radiološke

Osjetljivost i specifičnost niskodoznih CT pregleda (engl. *low dose* CT, LDCT) statistički su značajno veće nego kod ultrazvučnih pregleda te pregleda učinjenih magnetskom rezonancijom, pri čemu uporaba Flash CT tehnologije omogućava izvođenje pregleda novorođenčadi te nesuradljive djece bez uporabe anestezije i svih njezinih neželjenih nuspojava.

dijagnostičke pretrage: LDCT, UTZ abdomena ili standardni CT s ciljem dijagnosticiranja akutnog apendicitisa. Njihovi rezultati pokazali su da osjetljivost i specifičnost iznose 95,5 % i 94,9 % za LDCT, 95,0 % i 80,0 % za UTZ abdomena te 94,5 % i 98,8 % za standardni CT. Uzevši u obzir znatno manje doze ionizirajućeg zračenja LDCT je ponovo potvrđen kao *zlatni standard*⁴⁹. Konačno, Yun i sur. kreirali su metaanalizu također s ciljem uspoređivanja dijagnostičkih točnosti LDCT-a i standardnog CT-a u dijagnosticiranju akutnog apendicitisa. U nju su uključili 9 reprezentativnih studija odabranih između ukupno 154 koje su obuhvatile 2 957 pacijenata, uključujući i pedijatrijske. Osjetljivost i specifičnost su iznosile 96,25 % i 93,22 % za LDCT u odnosu na 96,40 % i 92,17 % za standardni CT, pri čemu njihove razlike nisu bile statistički značajne ($p = 0,71$)⁵⁰. Kod radiološke dijagnostike akutne upale crvuljka bitno je naglasiti različiti dijagnostički pristup u Sjevernoj Americi u odnosu na Europu, gdje je *zlatni standard* ultrazvuk. Naime, ultrazvučnu dijagnostiku u Europi provode pedijatrijski radiolozi koji postižu veću dijagnostičku točnost u odnosu na sonografe koji tu dijagnostiku provode na pacijentima u Americi.

Yu i sur. su istraživali korisnost kombinacije ASIR-a te dvoizvornog CT-a (engl. *dual source* CT, DSCT)

koji koristi kombinaciju energije iz dvije rendgenske cijevi obično postavljene pod kutem od 90° nasuprot jednoizvornog CT-a (engl. *mono source* CT, MSCT) koji koristi brzo oscilirajuće promjene kVp-a jedne rendgenske cijevi te ASIR-a u snižavanju doze radijacijskog zračenja i doze jednog kontrasta kod pregleda djece s abdominalnim solidnim tumorima. Kod 45 pedijatrijskih pacijenata kod kojih je učinjen inicijalni CT pregled abdomena DSCT tehnikom s 320 mg/ml jednog kontrasta, kontrolni pregled učinjen je LDCT tehnikom s 270 mg/ml jednog kontrasta. Skenovi dobiveni pri 40 kV i 60 kV uspoređivani su između dviju grupa. Rezultati su pokazali da su ukupna doza ionizirajućeg zračenja, ukupna doza jednog kontrasta, brzina injiciranja i maksimalni pritisak kod injiciranja kod kontrolnog pregleda bili manji za 19 %, 15 %, 34,4 % odnosno 18,3 % u odnosu na inicijalni pregled. Dijagnostička kvaliteta prikaza, koju su neovisno procjenjivala dvojica radiologa, nije se značajnije razlikovala između skenova dobivenih pri 40 kV u odnosu na 60 kV⁵¹.

LDCT pregledi muskuloskeletnog sustava

Skeletne displazije obuhvaćaju oko 350 raznovrsnih entiteta koji mogu biti posljedica individualne mutacije gena odnosno koji se mogu nasljeđivati autosomno dominantno, autosomno recesivno i vezano za X kromosom. Izuzetno je važno pravodobno postaviti adekvatnu dijagnozu prenatalnom dijagnostikom zbog planiranja izvođenja porođaja i pravodobnog početka liječenja. CT pregled iznimno je točan, ali kao visokodozni dijagnostički postupak sa sobom nosi rizik od oštećenja ploda. Zbog toga su Imai i sur. kreirali protokol za prenatalno dijagnosticiranje skeletne displazije koji uključuje ULDT i MBIR s ciljem smanjivanja doza ionizirajućeg zračenja. Njihovi rezultati pokazali su da je pri ozračivanju ploda s efektivnom dozom zračenja od 0,7 mSv moguće dobiti dijagnostički kvalitetne preglede⁵².

Posljednjih godina pokazala se potreba za 3D dijagnostikom skolioze umjesto dosadašnje prakse klasičnih radiograma kralježnice. Zbog nedovoljne dostupnosti MR pregleda, CT pregledi su unatoč uporabi ionizirajućeg zračenja postali uobičajeni. U skladu s time, Little i sur. kreirali su prospektivnu kohortnu studiju koja je uključila 29 adolescentica s idiopatskom skoliozom koje su

prije i poslije operacije podvrgnute LDCT pregledima kralježnice te su dokazali njihovu dijagnostičku vrijednost uz značajno smanjenje zračenja⁵³.

Osteoidni osteom je benigni tumor koji može uzrokovati jaki bol i funkcionalnu nesposobnost kod djece te mlađih odraslih pacijenata. Zbog malih dimenzija ovog tumora, dijagnostička metoda izbora je CT, koji omogućava i njihovu terapiju putem navođene ablacije. S ciljem smanjivanja doza ionizirajućeg zračenja Krokidis i sur. opisali su uspješnu primjenu LDCT-om navođene perkutane ablacije osteoidnog osteoma u sedmogodišnjeg pacijenta⁵⁴.

Delevan i sur. su u kliničkoj seriji vrednovali dijagnostičku specifičnost CT i MR pregleda u dijagnostici pedijatrijske lumbalne spondiloze. Trojica dječjih neuroradiologa neovisno su analizirala 2D MR, 2D + 3D MR i LDCT preglede učinjene kod 42 pedijatrijska pacijenta s bolnošću donjeg dijela leđa te sumnjom na spondilozu. Rezultati su pokazali njihovo 100 % slaganje kod LDCT pregleda u odnosu na svega 31 % i 40 % kod 2D MR te 2D + 3D MRI pregleda. Imajući na umu da su doze ionizirajućeg zračenja kod LDCT pregleda kralježnice usporedive s dozama kod klasičnih radiograma kralježnice, LDCT se nameće kao metoda izbora u dijagnosticiranju deformantne spondiloze⁵⁵.

ZAKLJUČAK

Pregled recentnih radova koji se odnose na primjenu kompjutorizirane tomografije u pedijatrijskoj populaciji ukazuje na mogućnost primjene LDCT pregleda u širokoj paleti kliničkih indikacija, što se značajno razlikuje od ranije prihvaćenog stava da CT dijagnostika više nema mjesta u radiologiji dječje dobi. LDCT je zastupljen u radiološkoj dijagnostici svih organskih sustava, čak i u prenatalnoj dijagnostici skeletnih displazija, s ciljem planiranja izvođenja porođaja i pravodobnog početka liječenja. Recentna istraživanja pokazala su da se primjenom LDCT tehnike značajno smanjuju doze ionizirajućeg zračenja u odnosu na standardne CT preglede, dok se istodobno dobivaju dijagnostički dovoljno kvalitetni slikovni prikazi koje nije potrebno ponavljati. Njihova dijagnostička vrijednost je u mnogim indikacijama superiorna konkurentnim slikovnim dijagnostičkim tehnikama. Nadalje, uporaba

Flash CT tehnologije i novijih inačica omogućuje izvođenje CT pregleda novorođenčadi te nesu-radljive djece bez uporabe opće anestezije, inače neophodne kod MR pregleda tih dobnih skupina, što znači izbjegavanje neželjenih nuspojava anestetika i potencijalnog taloženja gadolinijskog kontrastnog sredstva u mozgu^{56,57}. Niskovoltažne i dvoenergijske CT tehnike omogućuju povećanje signala joda (kontrastnog sredstva), te osim smanjenja doza zračenja smanjuju i količinu kontrastnog sredstva za isti efekt na slici, dok spektralni CT (engl. *spectral* CT, SCT) koristi spektralnu analizu za razlikovanje materijala na temelju njihovih atomskih brojeva (za sada joda i kalcija), što mu omogućava do sada komplicirano razlikovanje sličnih struktura, primjerice kontrasta i kalcifikata kod bubrežnih kamenaca te aterosklerotskih plakova odnosno žuči i kolesterolskih žučnih kamenaca³⁰. Iteracijske metode rekonstrukcije omogućuju smanjivanje šuma, odnosno poboljšanje odnosa signala i šuma na CT slici, što omogućuje izvođenje CT pretraga dijagnostičke kvalitete sa značajno nižim dozama zračenja. Navedeni podatci idu u prilog primjene LDCT pregleda u pedijatrijskoj radiologiji kada za to postoji kliničko opravdanje, a u određenim indikacijama je to metoda izbora za što ranije i točnije postavljanje dijagnoze.

Izjava o sukobu interesa: Autori izjavljuju da ne postoji sukob interesa.

LITERATURA

1. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report no. 160: ionizing radiation exposure of the population of the United States. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection & Measurements; 2009;1-15.
2. Food and Drug Administration. FDA public health notification: reducing radiation risk from computed tomography for pediatric and small adult patients. *Pediatr Radiol* 2002;32:314-6.
3. Prokop M, Galanski M, van der Molen AJ, Schaefer-Prokop CM. *Spiral and Multislice computed tomography of the body*. 1st Edition. Stuttgart – New York: Thieme; 2003;1-55.
4. Mettler FA, Wiest PW, Locken JA, Kelsey CA. CT scanning: patterns of use and dose. *J Radiol Prot* 2000;20:353-9.
5. Hall EJ, Brenner DJ. Cancer risks from diagnostic radiology. *Br J Radiol* 2008;81:362-8.
6. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography--an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007;22:2277-84.

7. Brenner D, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR* 2001;76:289-96.
8. Preston DL, Ron E, Yonehara S, Kobuke T, Fujii H, Kishikawa M et al. Tumors of the nervous system and pituitary gland associated with atomic bomb radiation exposure. *J Natl Cancer Inst* 2002;94:1555-63.
9. Chodick G, Ronckers CM, Shalev V, Ron E. Excess lifetime cancer mortality risk attributable to radiation exposure from computed tomography examinations in children. *Isr Med Assoc J* 2007;9:584-90.
10. Doody MM, Lonstein J, Stovall M, Hacker D, Luckyanov N, Land C. Breast cancer mortality after diagnostic radiography: findings from the U.S. Scoliosis Cohort Study. *Spine* 2000;25:2052-63.
11. Ronckers CM, Doody MM, Lonstein JE, Stovall M, Land CE. Multiple Diagnostic X-rays for Spine Deformities and Risk of Breast Cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 2008;17:605-13.
12. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukemia and brain tumors: a retrospective cohort study. *Lancet* 2012;380:499-505.
13. Bernier MO, Baysson H, Pearce MS, Moissonnier M, Cardis E, Hauptmann M et al. Cohort Profile: the EPI-CT study: a European pooled epidemiological study to quantify the risk of radiation-induced cancer from paediatric CT. *International Journal of Epidemiology* 2019;48:379-81.
14. Matthews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 2013;346:2360-70.
15. Shrimpton PC, Jansen JTM, Harrison JD. Updated estimates of typical effective doses for common CT examinations in the UK following the 2011 national review. *Br J Radiol* 2016;89:20150346-61.
16. Goske MJ, Applegate KE, Boylan J, Butler PF, Callahan MJ, Coley BD et al. The 'Image Gently' campaign: increasing CT radiation dose awareness through a national education and awareness program. *Pediatr Radiol* 2008;38:265-9.
17. Almohiy H. Paediatric computed tomography radiation dose: A review of the global dilemma. *World J Radiol* 2014;6:1-6.
18. Andropoulos DB. Effect of Anesthesia on the Developing Brain: Infant and Fetus. *Fetal Diagn Ther* 2018;43:1-11.
19. Walters JL, Paule MG. Review of preclinical studies on pediatric general anesthesia-induced developmental neurotoxicity. *Neurotoxicol Teratol* 2017;60:2-23.
20. Bai X, Twaroski D, Bosnjak ZJ. Modeling anesthetic developmental neurotoxicity using human stem cells. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 2013;17:276-87.
21. Loepke AW, Soriano SG. An assessment of the effects of general anesthetics on developing brain structure and neurocognitive function. *Anesth Analg* 2008;106/6:1681-707.
22. Olutoye OA, Baker BW, Belfort MA, Olutoye OO. Food and Drug Administration warning on anesthesia and brain development: implications for obstetric and fetal surgery. *Am J Obstet Gynecol* 2018; 218:98-102.
23. Frush DP, Perez MDR. Children, medical radiation and the environment: An important dialogue. *Environ Res* 2017;156:358-63.
24. Image Gently [Internet]. The Image Gently Alliance [Cited 2019 April 7]. Available from: <https://www.image-gently.org/Procedures/Computed-Tomography>.
25. ESR iGuide [Internet]. Clinical Decision Support using European Imaging Referral Guidelines [Cited 2019 April 7]. Available from: <https://www.myesr.org/esriguide>.
26. Siegel JA, Sacks B, Pennington CW, Welsh JS. Dose Optimization to Minimize Radiation Risk for Children Undergoing CT and Nuclear Medicine Imaging Is Misguided and Detrimental. *J Nucl Med* 2017;58:865-8.
27. Yang CC, Yang BH, Tu CY, Wu TH, Liu SH. Low-dose computed tomography scans with automatic exposure control for patients of different ages undergoing cardiac PET/CT and SPECT/CT. *Nucl Med Commun* 2017;38:546-55.
28. Greenwood TJ, Lopez-Costa RI, Rhoades PD, Ramirez-Giraldo JC, Starr M, Duncan J et al. CT Dose Optimization in Pediatric Radiology: A Multiyear Effort to Preserve the Benefits of Imaging While Reducing the Risks. *Home Radio Graphics* 2015;35:1539-54.
29. Tsujiguchi T, Obara H, Ono S, Saito Y, Kashiwakura I. Consideration of the usefulness of a size-specific dose estimate in pediatric CT examination. *J Radiat Res* 2018;59:430-5.
30. Nagayama Y, Oda S, Nakaura T, Tsuji A, Urata J, Furusawa M et al. Radiation Dose Reduction at Pediatric CT: Use of Low Tube Voltage and Iterative Reconstruction. *Radiographics* 2018;38:1421-40.
31. Kaul D, Kahn J, Huizing L, Wiener E, Böning G, Renz DM et al. Dose reduction in paediatric cranial CT via iterative reconstruction: a clinical study in 78 patients. *Clin Radiol* 2016;71:1168-77.
32. Morton RP, Reynolds RM, Ramakrishna R, Levitt MR, Hopper RA, Lee A et al. Low-dose head computed tomography in children: a single institutional experience in pediatric radiation risk reduction: clinical article. *J Neurosurg Pediatr* 2013;12:406-10.
33. Zacharias C, Alessio AM, Otto RK, Iyer RS, Philips GS, Swanson JO et al. Pediatric CT: Strategies to Lower Radiation Dose. *Am J Roentgenol* 2013;200:950-6.
34. Tada A, Sato S, Masaoka Y, Kanazawa S. Imaging of the temporal bone in children using low-dose 320-row area detector computed tomography. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2017;61:489-93.
35. Wuest W, May M, Saake M, Brand M, Uder M, Lell M. Low-Dose CT of the Paranasal Sinuses: Minimizing X-Ray Exposure with Spectral Shaping. *Eur Radiol* 2016;26:4155-61.
36. Sun J, Zhang Q, Duan X, Zhang C, Wang P, Jia C et al. Application of a full model-based iterative reconstruction (MBIR) in 80 kVp ultra-low-dose paranasal sinus CT imaging of pediatric patients. *Radiol Med* 2018;123:117-24.
37. Yabuuchi H, Kamitani T, Sagiyama K, Yamasaki Y, Matsuura Y, Hino T et al. Clinical application of radiation dose reduction for head and neck CT. *Eur J Radiol* 2018;107:209-15.
38. Cheng B, Xing H, Lei D, Guo Y, Ning G, Gong Q et al. Impact of iterative model reconstruction combined with dose reduction on the image quality of head and neck CTA in children. *Sci Rep* 2018;8:12613-8.
39. Habib Geryes B, Calmon R, Donciu V, Khraiche D, Warin-Fresse K, Bonnet D et al. Low-dose paediatric cardiac and thoracic computed tomography with prospective triggering: Is it possible at any heart rate? *Phys Med* 2018;49:99-104.

40. Lambert L, Banerjee R, Votruba J, El-Lababidi N, Zeman J. Ultra-low-dose CT Imaging of the Thorax: Decreasing the Radiation Dose by One Order of Magnitude. *Indian J Pediatr* 2016;83:1479-81.
41. Roik D, Barczuk M, Burzyńska Z, Biejat A, Żerańska M, Mierzewska-Schmidt M et al. Postnatal Evaluation of Congenital Chest Pathologies Using a Low-Dose Computed Tomography (CT) Protocol – a Pictorial Review. *Pol J Radiol* 2017;81:466-72.
42. Long FR, Castile RG, Brody AS. Lungs in infants and young children: improved thin-section CT with noninvasive controlled-ventilation technique—initial experience. *Radiology* 1999;212:588-93.
43. Lucaya J, Piqueras J, García-Peña P, Enríquez G. Low-Dose High-Resolution CT of the Chest in Children and Young Adults: Dose, Cooperation, Artifact Incidence, and Image Quality. *American Journal of Roentgenology* 2000;175:985-92.
44. Chen XF, Jiang F, Li L, Chen Y, Chen X, Jiang YY et al. Application of low-dose dual-source computed tomography angiography in children with complex congenital heart disease. *Exp Ther Med* 2017;14:1177-83.
45. Zaleska-Dorobisz U, Olchoway C, Lasecki M, Sokołowska-Dąbek D, Pawlus A, Frączkiewicz J et al. Low-dose computed tomography in assessment of pulmonary abnormalities in children with febrile neutropenia suffering from malignant diseases. *Adv Clin Exp Med* 2017;26:695-701.
46. Sun J, Yu T, Liu J, Duan X, Hu D, Liu Y et al. Image quality improvement using model-based iterative reconstruction in low dose chest CT for children with necrotizing pneumonia. *BMC Med Imaging* 2017;17:24-30.
47. Kim HJ, Yoo SY, Jeon TY, Kim JH. Model-based iterative reconstruction in ultra-low-dose pediatric chest CT: comparison with adaptive statistical iterative reconstruction. *Clin Imaging* 2016;40:1018-22.
48. Sayed AO, Zeidan NS, Fahmy DM, Ibrahim HA. Diagnostic reliability of pediatric appendicitis score, ultrasound and low-dose computed tomography scan in children with suspected acute appendicitis. *Ther Clin Risk Manag* 2017;13:847-54.
49. Yi DY, Lee KH, Park SB, Kim JT, Lee NM, Kim H et al. Accuracy of low dose CT in the diagnosis of appendicitis in childhood and comparison with USG and standard dose CT. *J Pediatr* 2017;93:625-31.
50. Yun SJ, Ryu CW, Choi NY, Kim HC, Oh JY, Yang DM. Comparison of Low- and Standard-Dose CT for the Diagnosis of Acute Appendicitis: A Meta-Analysis. *Am J Roentgenol* 2017;208:198-207.
51. Yu T, Gao J, Liu ZM, Zhang QF, Liu Y, Jiang L et al. Contrast Dose and Radiation Dose Reduction in Abdominal Enhanced Computerized Tomography Scans with Single-phase Dual-energy Spectral Computerized Tomography Mode for Children with Solid Tumors. *Chin Med J* 2017;130:823-31.
52. Imai R, Miyazaki O, Horiuchi T, Asano K, Nishimura G, Sago H et al. Ultra-Low-Dose Fetal CT with Model-Based Iterative Reconstruction: A Prospective Pilot Study. *Am J Roentgenol* 2017;208:1365-72.
53. Little JP, Izatt MT, Adam CJ, Lofgren O, Sundberg A, Labrom RD et al. Evaluating the Change in Axial Vertebral Rotation Following Thoracoscopic Anterior Scoliosis Surgery Using Low-Dose Computed Tomography. *Spine Deform* 2017;5:172-80.
54. Krokidis M, Tappero C, Bogdanovic D, Ziebarth K, Stamm AC. Computed tomography guided navigation assisted percutaneous ablation of osteoid osteoma in a 7-year-old patient: the low dose approach. *Skeletal Radiol* 2017;46:989-93.
55. Delavan JA, Stence NV, Mirsky DM, Gralla J, Fadell MF. Confidence in Assessment of Lumbar Spondylolysis Using Three-Dimensional Volumetric T2-Weighted MRI Compared with Limited Field of View, Decreased-Dose CT. *Sports Health* 2016;8:364-71.
56. CT Scan vs. MRI Differences between Machines, Costs, Uses [Internet]. *MedicineNet* [Cited 2019 April 7]. Available from: https://www.medicinenet.com/ct_scan_vs_mri/article.htm#ct_scan_vs_mri_quick_comparison_of_differences
57. Magnetic Resonance Imagin (MRI Scan) [Internet]. *MedicineNet* [Cited 2019 April 7]. Available from: https://www.medicinenet.com/mri_scan/article.htm#magneticresonance_imaging_mri_scan_definition_and_facts.