

ZPŮSOBY ODHADU DÁVEK NA PLOD Z RŮZNÝCH RTG VÝKONŮ PROVEDENÝCH U GRAVIDNÍCH ŽEN

WAYS HOW TO ESTIMATE FETAL DOSES FROM DIFFERENT X-RAY PROCEDURES PERFORMED ON PREGNANT WOMEN

přehledový článek

Lucie Sūkupová

Úsek ředitele IKEM, Praha

Přijato: 15. 9. 2016.

Korespondenční adresa:

Ing. Lucie Sūkupová, Ph.D.
Institut klinické a experimentální
medicíny
Videňská 1958/9, 140 21 Praha 4
e-mail: lucie.sukupova@gmail.com

Autorka sdělení děkuje
Mgr. Filipovi Jirů, Ph.D. za podnětné
připomínky.

Konflikt zájmů: žádný.

Hlavní stanovisko práce

Obsahem tohoto článku je přehled různých způsobů, jak lze stanovit dávku na plod u gravidních žen, které podstoupily rtg výkon.

SOUHRN

Sūkupová L. Způsoby odhadu dávek na plod z různých rtg výkonů provedených u gravidních žen

Článek poskytuje přehled metod použitelných pro odhad dávky na plod pro různé fáze gravidity. Součástí článku je ukázka toho, jak lze použít jednotlivé programy (PCXMC, CT-Expo, CODE), stejně tak je zahrnuto použití odvozených rovnic a normalizovaných dávkových koeficientů z publikovaných studií. Ukázky jsou doprovázeny objasněním, v jakých případech a za jakých podmínek je možné danou metodu použít.

Klíčová slova: dávka na plod, normalizované dávkové koeficienty, skiagrafie, CT.

Major statement

The article provides a review of different methods used for fetal dose estimates in pregnant women undergoing X-ray procedures.

SUMMARY

Sūkupová L. Ways how to estimate fetal doses from different X-ray procedures performed on pregnant women

The article provides a review of methods used for fetal dose estimates in different periods of pregnancy. The use of special softwares (PCXMC, CODE, CT-Expo) is demonstrated, as well as the use of derived equations and normalized dose coefficients from published data. All methods are used for different examples and are accompanied by explanations as to under which circumstances certain softwares or data can or cannot be used.

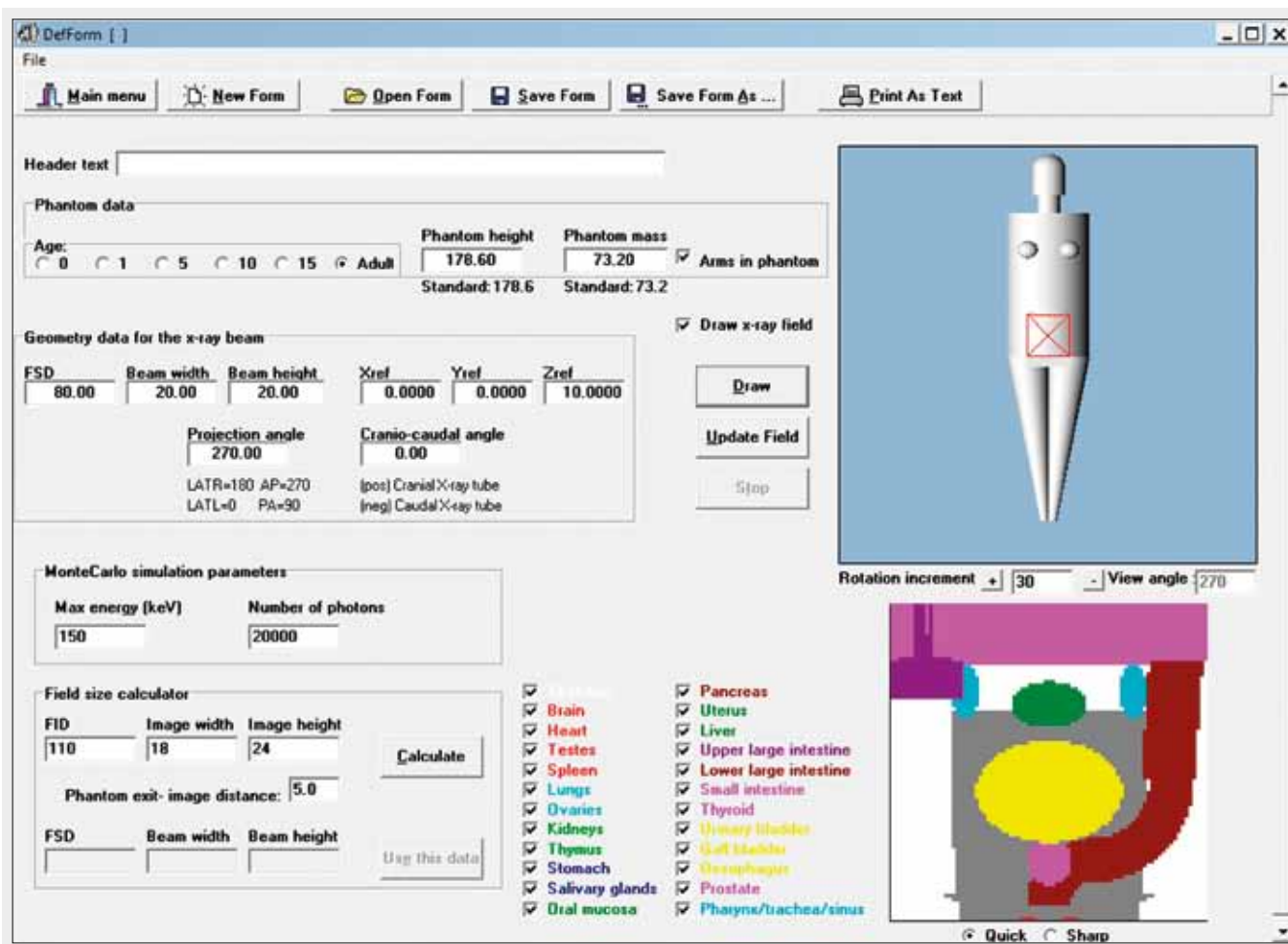
Key words: fetal dose, normalized dose coefficients, radiography, CT.

ÚVOD

Každoročně se stává, že jsou provedena rtg vyšetření u gravidních žen, u kterých je poté nutné stanovit dávku na plod. Může se to stát jednak v brzké fázi gravidity, kdy pacientky o graviditě neví, nebo v pozdější fázi gravidity, kdy jsou některé rtg výkony provedeny akutně, např. CT hrudníku z důvodu plicní embolie. Většina rtg výkonů provedených u gravidních

žen, jako jsou rtg výkony mimo oblast břicha a pánve, představuje pouze velmi malé riziko pro plod, a proto není třeba se jich obávat.

V případech, kdy jsou dávky na plod velmi malé až zanedbatelné (všechny rtg výkony mimo oblast břicha a pánve, skiagrafické výkony v oblasti pánve), není třeba odhad dáv-



▲ Obr. 1

Obr. 1. Ukázka rozhraní programu PCXMC
Fig. 1. An interface of the PCXMC software

ky na plod vůbec provádět. Na druhou stranu ale existují situace, např. v případě CT nebo intervenčních výkonů v oblasti břicha nebo pánve, kdy se děloha nebo plod nachází v primárním rtg svazku, a je tedy třeba provést odhad dávky na plod.

Tento článek poskytuje přehled metod, kterými lze stanovit dávku na plod, včetně několika řešených příkladů jejího výpočtu.

Poznámka: Ačkoliv se plod do 8. týdne gravidity označuje jako embryo, je nadále v článku používán pouze termín „plod“ pro embryo i plod.

ODHAD DÁVKY NA PLOD

Při odhadu dávky na plod je nutné vycházet z typu výkonu, fáze gravidity a také z expozičních parametrů. Období gravidity lze z hlediska zobrazování, resp. anatomických poměrů při zobrazování, rozdělit na dvě fáze: období 1. trimestru a období pozdější. V první fázi dávka na plod odpovídá dávce na dělohu. V druhé fázi, tedy ve 2. a 3. trimestru, již nelze předpokládat, že dávka na dělohu odpovídá dávce na plod, a proto je pro výpočet dávky nutné použít speciální algoritmus, který již zahrnuje i velikost a umístění plodu, které jsou podstatně odlišné od 1. trimestru. To vylučuje použití někte-

rých programů, které nemají možnost stanovit dávku na plod v pozdější fázi gravidity.

Odhad dávky na plod je možné provést nejpřesněji, známe-li konkrétní expoziční parametry včetně geometrie a rozsahu vyšetřené oblasti, méně přesně pak pouze podle typu výkonu a přibližných expozičních parametrů.

Odhad dávky na plod ze znalosti expozičních parametrů lze provést dvěma způsoby:

1. použitím speciálních programů
2. použitím odvozených rovnic a normalizovaných dávkových koeficientů

POUŽITÍ SPECIÁLNÍCH PROGRAMŮ

Pro různé druhy výkonů se doporučuje použití různých programů. Pro výkony, u kterých je získaný obraz dvourozměrný (skiografie, skiaskopie, intervenční výkon), lze použít program PCXMC (STUK, Finsko, <http://goo.gl/Yshoj3>), přičemž do programu je třeba zadat zvlášť každou projekci v případě skiografie a každou skiaskopickou část, DSA nebo kino scénu v případě intervenčních výkonů. Program je možné použít obecně pro odhad orgánových dávek, tedy i dávky na dělohu, která představuje dávku na plod v brzké fázi

DEPARTMENT OF MEDICAL PHYSICS
SCHOOL OF MEDICINE, UNIVERSITY OF CRETE

Conceptus Dose Estimation

Home | About Code | Help

PATIENT EXPOSURE

Radiography

Fluoroscopy

Computed Tomography

OCCUPATIONAL EXPOSURE

Fluoroscopically-guided Procedures

Computed Tomography (CT)

0-7 week

Clear

Embryo Depth (cm)	11
Tube Load (mAs)	200
Tube Voltage (kV)	120
Pitch	1.38
Beam Collimation (mm)	28.8
Patient Circumference (cm)	107
CTDI free-in-air (mGy/100 mAs)	19.6
CTDIw (mGy / 100 mAs)	14.7

Start of scan -10 cm End of scan +20 cm

▲ Obr. 2

Obr. 2. Ukázka rozhraní programu CODE
Fig. 2. An interface of the CODE software

gravidity. PCXMC též umožňuje stanovit efektivní dávku pro daný výkon, avšak použití efektivní dávky pro odhad rizika pro individuální pacienty se nedoporučuje (1). Efektivní dávka je použitelná pro porovnání průměrné radiační zátěže vyplývající z různých zobrazovacích modalit, např. CT vyšetření a vyšetření v nukleární medicíně.

Program PCXMC umožňuje stanovit dávku na dělohu pro průměrného jedince ve věku 0, 1, 5, 10 a 15 let a také pro dospělého jedince, u kterého je možné měnit hodnotu výšky a hmotnosti. Mimo základní informace o pacientovi je nutné zadat geometrii použitou při expozici, tj. vzdálenost ohnisko – kůže, vzdálenost ohnisko – detektor, projekci a velikost pole. V neposlední řadě je nutné zadat údaje o expozičních parametrech, jako je napětí (kV), filtrace, dopadající kerma (dávka) nebo součin kermu a plochy. Odhad dávky na dělohu, která představuje dávku na plod, je založen na simulacích Monte Carlo.

Jedná-li se o skiagrafický výkon, pak je provedena simulace ozáření pro výpočet dávky na plod pouze pro jednu nebo dvě použité projekce, v případě skiaskopických nebo intervenčních výkonů je potřeba provést simulaci ozáření pro každou scénu nebo skiaskopickou část. Celková dávka na plod je pak získána jako součet dávek na plod ze všech použitých projekcí. Ukázka rozhraní programu PCXMC je uvedena na obrázku 1.

Program PCXMC je velmi užitečný v tom, že umožňuje zadat libovolnou, i nestandardní projekci a pro každou orgánovou dávku uvádí i chybu, se kterou je dávka stanovena. Tento program však neumožňuje stanovit dávku na plod v pokročilejších fázích gravidity (2. a 3. trimestr), kdy již dávka na dělohu neodpovídá dávce na plod. Protože PCXMC není primárně určen pro stanovení dávky na plod, nevyžaduje zadání hloubky umístění plodu. Pořizovací cena softwaru PCXMC je 750 € bez DPH.

Kromě programu PCXMC lze pro odhad dávky na plod použít pro výkony s dvourozměrným obrazem i program CODE (Conceptus Dose Estimation, <http://embryodose.med.uoc.gr/code/>) vyvíjený na University of Crete, Řecko, který je přístupný přes webové rozhraní po bezplatné registraci, což je jeho velkou výhodou. Ukázka rozhraní programu CODE je uvedena na obrázku 2.

Tento program poskytuje různé možnosti v závislosti na použité modalitě, např. pro skiagrafii, intervenční výkony a CT výkony. Program samozřejmě požaduje základní informace o pacientce, jako je fáze gravidity (1., 2. nebo 3. trimestr), dále výběr standardizované projekce a typ výkonu, avšak nijak nezohledňuje výšku ani hmotnost pacientky. Také co se týká projekcí, není tento program příliš flexibilní, protože umožňuje pouze výběr standardizovaných projekcí pro různé typy výkonů. Program CODE je podobně jako PCXMC založen na simulacích Monte Carlo, avšak tento program má již v sobě zahrnutý předem spočítané normované dávkové koeficienty a neprovádí simulace po zadání expozičních parametrů, jako je tomu v případě programu PCXMC. Výsledná dávka na plod je získána sečtením dávek na plod z různých projekcí.

Program CODE lze použít mimo výkony s dvourozměrným obrazem i pro CT výkony. Zde je již nutné zadat mimo

Calculate

1. Age Group: Adult | Gender: female

2. Scan Range: Get Values

3. Scanner Model: Siemens | Definition DS (tube A)

4. Select mode: ☐ Body mode for head/neck region ☐ Spiral mode

5. Scan Parameters: Please Enter Actual Settings:

U [kV]	I [mA]	t [s]	Q _{el} [mAs]	Q [mAs]	N * h _{col} [mm]	TF [mm]	h _{rec} [mm]	p	Ser.
120			200	200	38,4	46,0	5,0	1,19791667	1

6. Results

Dose Values per Scan or per Series*

CTDI _w [mGy]	CTDI _{vol} [mGy]	DLP _w [mGy*cm]	E* [mSv]	D _{uterus} [mSv]
13,0	10,9	331	6,7	17,0

CTDI and DLP values refer to 32cm body phantom
Effective dose E refers to ICRP 60

7. Effective Dose

ICRP: ☒ 60 ☐ 103

Dose Values per Examination

DLP _w [mGy*cm]	E [mSv]	D _{uterus} [mSv]
331	6,7	17,0

Effective dose E refers to ICRP 60

Please note:
All organ doses H_T are based on conversion coefficients for stand-
and patients (ADAM, EVA, CHILD, BABY) and serve for information
purposes only (in particular for organs outside the scan range)!

Scan Range Data (Slice Positions)

Scan Range z from z-	to z+	L [cm]
0	30	30

Scanner Data for Scan Region "Body"

nCTDI _w [mGy/mAs]	U _{ref} [kV]	P _{B,H}	k _{CT}	k _{CB}	ΔL [cm]
0,065	120	0,34	0,65	1,00	0,0

Tissue or Organ | H_T per Series [mSv] | Tissue or Organ | H_T per Series [mSv]

Brain	0,0	Upp. large int.	13,3
Salivary glands	0,0	Thymus	0,0
Thyroid	0,0	Spleen	2,4
Breasts	0,1	Pancreas	1,9
Oesophagus	0,0	Adrenals	1,0
Lungs	0,2	Kidneys	7,2
Liver	3,5	Small intest.	12,9
Stomach	4,8	Uterus	17,0
Low. Large int.	12,0	Prostate	0,0
Testicles	0,0	Gall bladder	1,9
Ovaries	12,7	Heart	0,2
Bladder	13,7	ET tissue	0,0
Bone marrow	5,3	Oral mucosa	0,0
Bone surfaces	6,1	Lymph nodes	5,2
Skin	3,8	Muscle	5,2
		Eye lenses	0,0

▲ Obr. 3

Obr. 3. Ukázka rozhraní programu CT-Expo
Fig. 3. An interface of the CT-Expo software

fázi gravidity i hloubku umístění plodu (pouze u pacientky do 12. týdne gravidity) a také obvod gravidní pacientky. Samozřejmostí je zadání expozičních parametrů, jako jsou napětí (kV), elektrické množství (mAs), pitch faktor, celková kolimace svazku, parametry CT skeneru – CTDI_{free-in-air} a CTDI_w ze zkoušky dlouhodobé stability a rozsahu skenované oblasti.

Další program, který je možné použít pro odhad dávky na dělohu, a tedy dávky na plod v rané fázi gravidity, je **CT-Expo** (Sascrad, Německo, <http://www.sascrad.com>). Tento program je použitelný pro novější CT skenery, pro starší CT skenery je nutné použít program **ImPACT CT** (National Health Service, Velká Británie, <http://www.impactscan.org/>), který byl vyvíjen cca do roku 2007. CT-Expo obsahuje určité parametry naměřené pro dané nastavení na daném CT skeneru a dávky podle expozičních parametrů jsou stanoveny na základě simulací Monte Carlo, stejně jako u předešlých programů. Použití CT-Expo je relativně jednoduché, uživatel nejprve zvolí typ CT skeneru, poté zadá rozsah CT vyšet-

ření, pak akvizční parametry: napětí, elektrické množství, celkovou kolimaci, posun stolu na jednu rotaci, pitch faktor a tloušťku rekonstruovaného řezu. Program sám dopočítá hodnoty CTDI a DLP, které uživatel může porovnat s reálnými hodnotami pro daného pacienta. Na základě zadaných dat jsou poté stanoveny orgánové dávky, včetně dávky na dělohu, a také efektivní dávka. Ukázka rozhraní programu CT-Expo je uvedena na obrázku 3.

Výhodou programu CT-Expo je, že jsou do něho stále přidávány nové CT skenery, dále že udávané hodnoty CTDI a DLP velmi dobře souhlasí s reálnými hodnotami a také pořizovací cena programu, která je cca 50 €. Nevýhodou je, že program neobsahuje naměřené hodnoty pro výpočet dávek pro starší CT skenery. Další nevýhodou je, že tento program lze použít pouze v brzkých fázích gravidity, kdy dávka na plod odpovídá dávce na dělohu, ale ne v pozdějších fázích pro odhad dávek na plod.

Mimo výše zmíněné programy existují i jiné, které lze použít pro odhad dávek na plod, např. **ImpactDose** (CT Ima-

ging GmbH, Německo, <http://www.ct-imaging.de>) nebo **ImpactMC** (CT Imaging GmbH, Německo, <http://www.ct-imaging.de>). Program ImpactDose zahrnuje několik namodelovaných pacientů, u kterých je možné měnit AP a LAT rozměr.

Všechny výše zmíněné programy mimo ImpactMC stanovují dávku na plod pro fantom představující průměrnou pacientku se standardní anatomí, tj., neberou v potaz reálnou anatomii pacientky. Avšak program ImpactMC již dokáže na základě naimportovaných CT dat provést odhad dávky na plod na základě anatomických dat skutečné gravidní pacientky, a to i pro jiné než CT výkony. Nicméně tento výpočet je velmi časově náročný a nelze ho provést bez znalosti CT dat.

POUŽITÍ ODVOZENÝCH ROVNIC A NORMALIZOVANÝCH DÁVKOVÝCH KOEFICIENTŮ

Použití speciálních programů představuje velmi elegantní způsob, jak stanovit odhad dávky na plod u gravidních pacientek. Nicméně v případech, kdy není potřebný program k dispozici, je možné stanovit dávku na plod i použitím vhodných rovnic a normalizovaných dávkových koeficientů, které jsou publikovány v dostupné literatuře. Tyto koeficienty představují hodnotu orgánové dávky, zde tedy dávky na plod, normalizované na nějakou jednotkovou dávku, např. pro CT se jedná o dávku na plod vztaženou k hodnotě CTDI.

Pro skiagrafické výkony lze použít normalizované dávkové koeficienty z publikované studie (2). Autoři v této studii simulovali skiagrafické vyšetření břicha v AP a PA projekci u gravidní ženy v 1., 2. a 3. trimestru. Simulace byly provedeny pro různé hodnoty napětí a různé hodnoty celkové filtrace. Výsledky simulací pak byly ověřeny použitím termoluminiscenčních dozimetřů při měření na antropomorfním fantomu. Normalizované dávkové koeficienty vzhledem k dopadající kermě jsou uvedeny ve studii (2) pro všechny tři trimestry pro AP i PA projekce pro různá napětí a různé celkové filtrace rtg svazku. V 1. trimestru je zohledněna také hloubka umístění plodu.

Ke stanovení dávky na plod při CT výkonech je možné použít data z více studií, např. ze studie (3), (4) a (5). Autoři Angel et al. publikovali studii (3), ve které uvádějí rovnici pro odhad dávky na plod DO_f v závislosti na obvodu matky P a hloubce uložení plodu DE_f . Rovnice je následující:

$$DO_f = -0,119 \cdot P - 0,29 \cdot DE_f + 24,56 \quad [1]$$

V případech, kdy není známa hloubka umístění plodu lze použít rovnici [2]:

$$DO_f = -0,122 \cdot P + 23,11 \quad [2]$$

Stanovená dávka DO_f je dávka na plod v mGy na nazářených 100 mAs.

Normalizované dávkové koeficienty, které jsou používány v následujících výpočtech dávky na plod, jsou závislé na mnoha faktorech, např. na obvodu gravidní pacientky a na hloubce uložení plodu, proto výpočet běžně probíhá v několika

krocích, jak bude vysvětleno dále. Tabulované normované dávkové koeficienty jsou většinou vztaženy na 100 mAs, proto je nutné je vždy korigovat dávku na plod na aktuální hodnotu mAs.

Výpočet dávky na plod umožňují normalizované dávkové koeficienty a rovnice ze studie (4). V této studii provedli autoři simulace Monte Carlo pro různé fantomy představující gravidní pacientku v prvních týdnech gravidity a také ve všech třech trimestrech. Studie (4) obsahuje normalizované dávkové koeficienty pro počáteční fázi gravidity a pro každý ze tří trimestrů pro dva různé CT skenery (Siemens Sensation 16 a Siemens Sensation 64), pro dvě různá napětí (120 kV a 140 kV) a pro dvě různé tloušťky celkové kolimace (Sensation 16 – 12 mm a 24 mm, Sensation 64 – 19,2 mm a 28,8 mm). Koeficienty zde uvedené představují normovanou dávku na plod pro různé oblasti rozsahu CT vyšetření. Použitím těchto koeficientů a současně použitím příslušné rovnice (3) nebo (5) lze získat dávku na plod. Rovnice [3] vhodná pro brzkou fázi gravidity a 1. trimestr je následující:

$$D(p_x, d_x) = CTDI_a \cdot NCD(p_0, d_0) \cdot \left(\frac{NCD_{dx}}{NCD_9} \right)_{px} \quad [3]$$

kde $NCD(p_0, d_0)$ je normalizovaná dávka na plod pro obvod matky $p_0 = 88,7$ cm a hloubku uložení plodu $d_0 = 9$ cm. $NCD(p_0, d_0)$ lze stanovit pomocí rovnice [4]:

$$NCD(p_0, d_0) = \frac{20 \text{ mm}}{BC \text{ (mm)}} \cdot \frac{1}{\text{pitch}} \cdot \sum_z f_z \quad [4]$$

kde BC je celková kolimace rtg svazku, pitch je pitch faktor pro dané nastavení CT skenu a f_z jsou normované dávkové koeficienty, jejichž suma odpovídá rozsahu CT skenu (viz vysvětlení dále a tab. 1).

Rovnice [3] a [4] vypadají složitě, proto následuje detailnější vysvětlení jednotlivých kroků výpočtu. Nejprve se zaměříme na rovnici [4], jejíž výsledná hodnota je pak dosazena do rovnice [3].

Hodnota $NCD(p_0, d_0)$ je normalizovaná dávka na plod pro standardní pacientku (obvod 88,7 cm, hloubka uložení plodu 9 cm), která již bere v potaz, jaká je celková kolimace CT skeneru (BC) i pitch faktor, tj., bere v potaz, jak „hustě“ je proskanovaný daný objem pacientky. Koeficienty f_z odpovídají tomu, které části pacientky byly při CT výkonu v primárním svazku, tj. normalizují to, když je ozářeno určitou dávkou břicho nebo pánev pacientky, jaká dávka „pronikne“ až k plodu. Hodnoty koeficientů f_z i s bližším objasněním jsou uvedeny dále v tabulce 1. Hodnota $CTDI_a$ kvantifikuje, jak moc „září“ CT skener, tj., kolik vyprodukuje záření na 100 mAs. Hodnota NCD_{dx} z rovnice [3] je normalizovaná dávka na plod v hloubce d_x a NCD_9 je normalizovaná dávka na plod v hloubce 9 cm. Poměr těchto hodnot pak říká, jak se mění dávka na plod s různou hloubkou umístění plodu pro daný obvod pacientky p_x . Tyto hodnoty lze získat ze studie (4), ve které jsou uvedeny rovnice pro výpočet poměru $(NCD_{dx}/NCD_9)_{px}$ pro pět hodnot obvodu pacientky. Rovnice jsou následující:

$$\text{obvod matky } 88,7 \text{ cm: } \frac{\text{NCD}_{d_x}}{\text{NCD}_9} = 1,317 - 0,036 \cdot \text{DE}_f \quad [5]$$

$$\text{obvod matky } 101,1 \text{ cm: } \frac{\text{NCD}_{d_x}}{\text{NCD}_9} = 1,202 - 0,043 \cdot \text{DE}_f \quad [6]$$

$$\text{obvod matky } 115,7 \text{ cm: } \frac{\text{NCD}_{d_x}}{\text{NCD}_9} = 1,152 - 0,047 \cdot \text{DE}_f \quad [7]$$

$$\text{obvod matky } 126,9 \text{ cm: } \frac{\text{NCD}_{d_x}}{\text{NCD}_9} = 1,081 - 0,051 \cdot \text{DE}_f \quad [8]$$

$$\text{obvod matky } 138,1 \text{ cm: } \frac{\text{NCD}_{d_x}}{\text{NCD}_9} = 0,995 - 0,049 \cdot \text{DE}_f \quad [9]$$

Rovnice [3] a [4] jsou použitelné pro počáteční fázi gravidity a také pro 1. trimestr, pro případ 2. a 3. trimestru rovnice [3] přechází na rovnici [10], tj. z rovnice [3] se vypouští hloubka umístění plodu:

$$D(p_x) = \text{CTDI}_a \cdot \text{NCD}(p_0) \cdot \left(\frac{\text{NCD}}{\text{NCD}_0} \right)_{p_x} \quad [10]$$

Rovnice [4] přechází ve 2. a 3. trimestru na rovnici [11], která je však velmi podobná rovnici [4]:

$$\text{NCD}(p_0, d_0) = \frac{20 \text{ mm}}{\text{BC (mm)}} \cdot \frac{1}{\text{pitch}} \cdot \sum_z f_z \quad [11]$$

Poslední člen rovnice [10] lze stanovit pro 2. trimestr z rovnice [12], pro 3. trimestr z rovnice [13].

$$\text{2. trimestr: } \frac{\text{NCD}}{\text{NCD}_0} = 2,014 - 0,009 \cdot P \quad [12]$$

$$\text{3. trimestr: } \frac{\text{NCD}}{\text{NCD}_0} = 1,974 - 0,009 \cdot P \quad [13]$$

Rovnice [12] a [13] jsou obdobné jako rovnice [5 až 9], tzn., že tyto rovnice kvantifikují dávku na plod v závislosti na obvodu pacientky, ale existuje již pouze jedna rovnice pro 2. trimestr a jedna pro 3. trimestr.

Pro lepší představu jsou koeficienty f_z tabulované ve studii (4), pro počáteční fázi gravidity pro CT skener Siemens Sensation 64 pro 120 kV a celkovou kolimaci 19,2 mm a 28,8 mm uvedeny v tabulce 1. V prvním sloupci je uveden parametr vzdálenost, kdy se jedná o vzdálenost daného řezu od umístění plodu. Poloha plodu je tedy 0 cm, poloha od plodu kaudálně je záporná (jde do -10 cm), poloha řezu od plodu kraniálně je kladná, jde do +50 cm. Ukázka umístění CT řezů na pacientce je uvedena na obrázku 4 pro tři oblasti skenu (-10 cm, +50 cm), (0 cm, +10 cm) a (+30 cm, +50 cm). Pro každou oblast CT skenu je pak nutné vždy sečíst všechny koeficienty pro danou oblast, např. pro CT sken provedený od -10 cm do +50 cm je potřeba sečíst všechny koeficienty od -10 cm do +50 cm.

Ačkoliv jsou normované dávkové koeficienty ve studii (4) primárně určeny pro odhad dávky na plod z CT výkonů, při

Tab. 1. Koeficienty f_z pro odhad dávek na plod ze studie (4)

Table 1. Coefficients f_z for an estimate of fetal doses from the study (4)

Vzdálenost od plodu (cm)	Koeficienty f_z pro Siemens Sensation 64, 120 kV (dávka na plod normalizovaná na kermový index ve vzduchu CTDI _a)	
	Celková kolimace 19,2 mm	Celková kolimace 28,8 mm
-10	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$
-8	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$3,02 \cdot 10^{-2}$
-6	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$
-4	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$6,55 \cdot 10^{-2}$
-2	$7,58 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$
0	$1,68 \cdot 10^{-1}$	$2,27 \cdot 10^{-1}$
2	$7,39 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$
4	$4,17 \cdot 10^{-2}$	$6,40 \cdot 10^{-2}$
6	$2,82 \cdot 10^{-2}$	$4,23 \cdot 10^{-2}$
8	$1,94 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-2}$
10	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
12	$9,54 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
14	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$
16	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$
18	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$
20	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$
22	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$
24	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$
26	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$
28	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$
30	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$
32	$9,00 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$
34	$7,90 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
36	$7,30 \cdot 10^{-4}$	$9,20 \cdot 10^{-4}$
38	$6,90 \cdot 10^{-4}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$
40	$6,55 \cdot 10^{-4}$	$7,40 \cdot 10^{-4}$
42	$5,90 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-4}$
44	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^{-4}$
46	$4,98 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$
48	$4,30 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$
50	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$4,80 \cdot 10^{-4}$

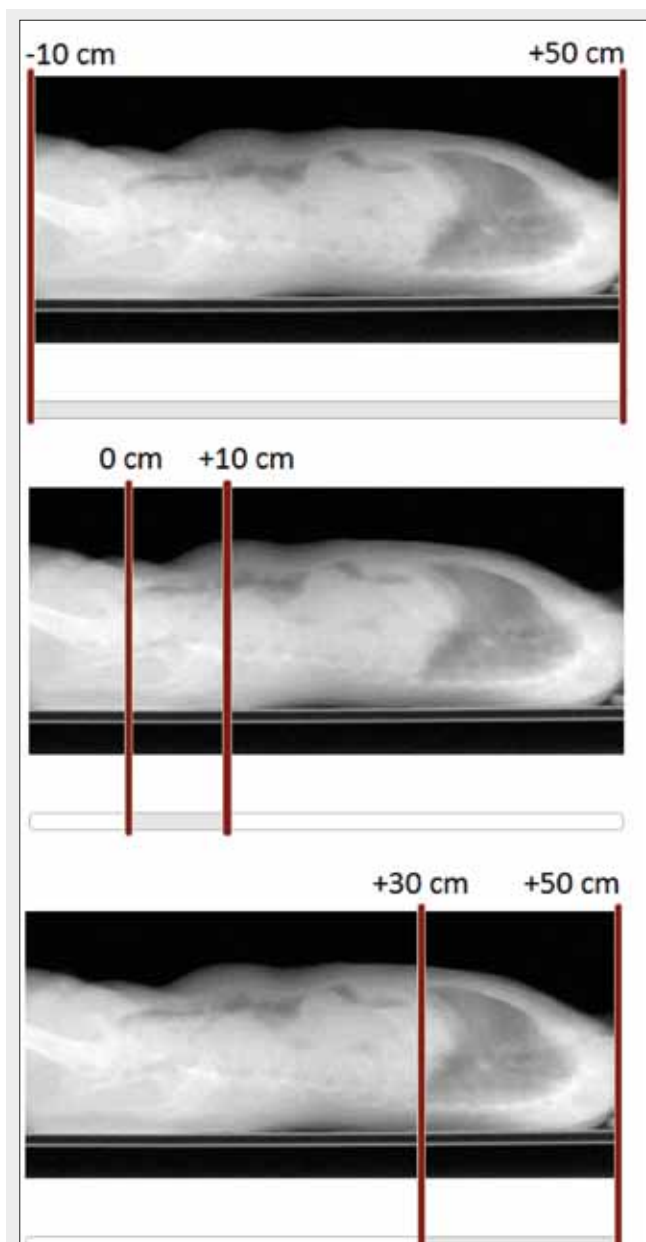
kterých se plod nachází v primárním rtg svazku, lze je použít pro odhad dávky na plod i v případech, kdy je plod při CT výkonu mimo primární rtg svazek, jako je tomu na obrázku 4 v dolní části.

Mimo normalizované dávkové koeficienty je možné získat odhad dávky na plod ještě jiným způsobem, jak doporučuje studie (5). V této studii autoři, uvádějí podobnou rovnici jako ve studii (3) pro případy, kdy je známý obvod pacientky i hloubka uložení plodu. Rovnici [14] je však možné použít pouze v brzkých fázích gravidity:

$$\text{DO}_f = \frac{\text{CTDI}_a \cdot \text{NCD} \cdot \left(\frac{\text{CTDI}_w}{\text{CTDI}_a} \right)_x}{\left(\frac{\text{CTDI}_w}{\text{CTDI}_a} \right)_s} \quad [14]$$

kde NCD je normalizovaná dávka na plod stanovená z rovnice [15], kde P je obvod pacientky a DE_f je hloubka uložení plodu:

$$\text{NCD} = 1,179 - 0,0043 \cdot P - 0,0238 \cdot \text{DE}_f \quad [15]$$



▲ Obr. 4

Obr. 4. Umístění skenované oblasti na pacientce (z programu CODE)
Fig. 4. A placement of the scanned area on the patient (from the CODE software)

Rovnice [14] stanovuje dávku na plod pro hodnotu 100 mAs a taktéž pro pitch faktor = 1, proto je nutné výslednou hodnotu zkorrigovat na hodnotu pitch faktoru a dále na aktuální hodnotu mAs. Poměry ($CTDI_w/CTDI_a$) představují korekci na použitý typ CT skeneru, přičemž tato korekce se významně uplatňuje tehdy, jsou-li parametry použitého scanneru odlišné od scannerů firmy Siemens, protože koeficienty f_z a rovnice [14] byly stanoveny pro CT skenery firmy Siemens. Doporučuje se použít tuto korekci i v případech, kdy jsou použity rovnice [3] a [10]. Dle autorů studie (5) je odchylka v dávce na plod pro různé typy CT skenerů max. 12 %.

Nyní několik příkladů na odhad dávky na plod použitím všech výše zmíněných metod, tj. použitím normalizovaných dávkových koeficientů, rovnic i speciálních softwarů.

TESTOVACÍ PŘÍKLAD 1

Gravidní pacientka v 5. měsíci gravidity podstoupila CT pánve v rozsahu od -10 cm do +8 cm (poloha 0 cm znamená oblast plodu, -10 cm je 10 cm kaudálně pod plodem, +8 cm je 8 cm kranálně nad plodem). Byl použit CT skener GE Light Speed 16, napětí 120 kV, 200 mAs, celková kolimace 20 mm a pitch faktor 1,38, obvod pacientky je 107 cm. Jaká je odhadovaná dávka na plod?

Hodnoty získané z protokolu zkoušek dlouhodobé stability (pro korekci dávky na plod pro daný CT skener):

$CTDI_a$ Siemens Sensation 16 = 17,1 mGy/100 mAs

$CTDI_w$ Siemens Sensation 16 = 7,6 mGy/100 mAs

$CTDI_a$ GE Light Speed 16 = 25,1 mGy/100 mAs

$CTDI_w$ GE Light Speed 16 = 9,9 mGy/100 mAs

Metoda Angel et al (3): Použijeme rovnici [2]:

$DO_f = -0,122(P) + 23,11$, do které dosadíme $P = 107$ cm. Dávka na plod je rovna 10,056 mGy pro 100 mAs a pitch faktor = 1,00. Po korekci na 200 mAs a pitch faktor 1,38 je výsledná dávka na plod $DO_f = 10,06 \text{ mGy} \cdot 2/1,38 = 14,6 \text{ mGy}$.

Metoda Damilakis et al (4): Použijeme rovnici [10] a [11].

$$D(p_x) = CTDI_a \cdot NCD(p_0) \cdot \left(\frac{NCD}{NCD_0} \right)_{px} \quad [10]$$

$$NCD(p_0, d_0) = \frac{20 \text{ mm}}{BC \text{ (mm)}} \cdot \frac{1}{\text{pitch}} \cdot \sum_z f_z \quad [11]$$

Suma f_z pro oblast CT vyšetření od -10 cm do +8 cm je rovna 0,479 (data, která zde nejsou uvedena, je nutné je převzít ze studie (4)). $BC = 20$ mm, pitch faktor = 1,38. Pak tedy $NCD(p_0) = 20/20 \cdot 1/1,38 \cdot 0,479 = 0,347$.

Nyní si vypočteme $(NCD/NCD_0)_{p_{107}}$. Z rovnice [12] dostáváme $NCD/NCD_0 = 2,014 - 0,009 \cdot 107 = 1,051$. Výše získané hodnoty dosadíme do rovnice [10] a dostáváme:

$D(p_{107}) = 25,1 \cdot 0,347 \cdot 1,051 = 9,15$ mGy pro 100 mAs. Použito však bylo 200 mAs, proto $D(p_{107}) = 2 \cdot 9,15 \text{ mGy} = 18,30 \text{ mGy}$.

Po korekci na použitý CT skener ($CTDI_a/CTDI_w$)_{Siemens/}($CTDI_a/CTDI_w$)_{GE} = $(17,1/7,6)/(25,1/9,9) = 0,887$. Pak dávka na plod $D(p_{107}) = 18,30 \text{ mGy} \cdot 0,887 = 16,2 \text{ mGy}$.

Metoda Damilakis et al (5): Nelze použít, nejedná se o brzkou fázi gravidity.

Program CT-Expo: Nelze použít, program neumožňuje odhad dávky na plod v pozdějších fázích gravidity.

Program CODE: Zadáním 2. trimestru, 120 kV, 200 mAs, 1,38 pitch faktor, obvod pacientky 107 cm, $CTDI_a = 25,1$ mGy, $CTDI_w = 9,9$ mGy dostáváme dávku na plod **16,5 mGy**.

Z jednotlivých metod odhadu vyplynulo, že odhadovaná dávka na plod se pohybuje mezi 14,6 mGy a 16,5 mGy.

TESTOVACÍ PŘÍKLAD 2

Gravidní pacientka ve 4. týdnu gravidity podstoupila CT břicha a pánve v rozsahu -10 cm do +18 cm. Byl použit CT skener Somatom Definition Flash 128, napětí 120 kV, 300 mAs, celková kolimace 28,8 mm a pitch faktor 1,1, obvod pacientky je 89 cm, hloubka uložení plodu 11 cm. Jaká je odhadovaná

dávka na plod? Zanedbejme zde korekci na typ použitého CT skeneru.

Hodnoty získané z protokolu zkoušek dlouhodobé stability:
CTDI_a Siemens Definition Flash 128 = 19,6 mGy/100 mAs
CTDI_w Siemens Definition Flash 128 = 7,4 mGy/100 mAs

Metoda Angel et al (3): Použijeme rovnici [1]:

$DO_f = -0,119 \cdot P - 0,29 \cdot DE_f + 24,56$, do které dosadíme $P = 89$ cm a $DE_f = 11$ cm. Dávka na plod pro 100 mAs a pitch faktor = 1,00 je tedy 10,8 mGy. Po korekci na 300 mAs a pitch faktor 1,1 je výsledná dávka na plod $DO_f = 10,8 \text{ mGy} \cdot 3/1,1 = 29,4 \text{ mGy}$.

Metoda Damilakis et al (4): Použijeme rovnici [3] a [4] a současně rovnici [5] pro výpočet NCD_{dx}/NCD_g . $NCD_{dx}/NCD_g = 1,317 - 0,036 \cdot 11 = 0,921$. f_z zjistíme sečtením koeficientů ze studie (4) nebo z tabulky 1 pro Sensation 64 a kolimaci 28,8 cm (parametry nejbližší našim parametrům skenování) v rozsahu -10 cm +18 cm, kdy dostáváme $f_z = 0,832$. Dosadíme do rovnice [4] a dostáváme $NCD(p_0, d_0) = 20/28,8 \cdot 1/1,1 \cdot 0,832 = 0,525$. Dosadíme do rovnice [3], kde $CTDI_a = 19,6 \text{ mGy/100 mAs}$ a dostáváme $D(p_{89}, d_{11}) = 19,6 \cdot 0,525 \cdot 0,921 = 9,48 \text{ mGy}$. Po korekci na 300 mAs pak $D(p_{89}, d_{11}) = 28,4 \text{ mGy}$.

Metoda Damilakis et al (5): Z rovnice [15] dostáváme $NCD = 1,179 - 0,0043 \cdot 89 - 0,0238 \cdot 11 = 0,5266$. To dosadíme do rovnice [14] bez korekce na typ CT skeneru. $DO_f = 19,6 \cdot 0,5266 = 10,3 \text{ mGy}$. Po korekci na 300 mAs a pitch faktor 1,1 dostáváme $DO_f = 10,48 \cdot 3/1,1 = 28,1 \text{ mGy}$.

Program CT-Expo: Výběrem CT skeneru Siemens Definition Flash, zadáním rozsahu skenu, napětí 120 kV, 300 mAs, celkové kolimace 28,8 mm dostáváme dávku na plod, resp. dávku na dělohu **28,4 mGy**.

Program CODE: Zadáním 4. týdne gravidity, 120 kV, 300 mAs, celková kolimace 28,8, pitch faktor 1,1, obvod pacientky 89 cm, hloubka uložení plodu 11 cm, CTDI_a = 19,6 mGy, CTDI_w = 7,4 mGy dostáváme dávku na plod **19,9 mGy**.

Z jednotlivých metod odhadu vyplynulo, že odhadovaná dávka na plod se pohybuje mezi 19,9 mGy a 29,4 mGy.

TESTOVACÍ PŘÍKLAD 3

Gravidní pacientka ve 3. trimestru podstoupila CT vyšetření hrudníku z důvodu podezření na plicní embolii. Použit byl CT skener Somatom Definition Flash 128, rozsah skenu +20 cm až +50 cm, 120 kV, 150 mAs, celková kolimace 38,4 mm, pitch faktor 1,2, obvod pacientky 125 cm. Jaká je odhadovaná dávka na plod? Zanedbejme zde korekci na typ použitého CT skeneru.

CTDI_a Siemens Definition Flash 128 = 19,6 mGy/100 mAs
CTDI_w Siemens Definition Flash 128 = 7,4 mGy/100 mAs

Zde je potřeba si uvědomit, které metody lze použít, protože plod není v primárním rtg svazku.

Metoda Angel et al (3): Nelze použít, protože se plod nachází mimo primární rtg svazek.

Metoda Damilakis et al (4): Použijeme rovnici [10] a [11]:

$$D(p_x) = CTDI_a \cdot NCD(p_0) \cdot \left(\frac{NCD}{NCD_0} \right)_{p_x} \quad [10]$$

$$NCD(p_0, d_0) = \frac{20 \text{ mm}}{BC \text{ (mm)}} \cdot \frac{1}{\text{pitch}} \cdot \sum_i f_z \quad [11]$$

Suma f_z pro oblast CT vyšetření od +20 cm do +50 cm pro 3. trimestr je rovna 0,0199 (data, která zde nejsou uvedena, je nutné je převzít ze studie (4)). $BC = 38,4$ mm, pitch faktor = 1,2. Pak tedy $NCD(p_0) = 20/38,4 \cdot 1/1,2 \cdot 0,0199 = 0,0086$.

Nyní si vypočteme $(NCD/NCD_0)_{p_{125}}$. Z rovnice [13] dostáváme $NCD/NCD_0 = 1,974 - 0,009 \cdot 125 = 0,849$. Výše získané hodnoty dosadíme do rovnice [10] a dostáváme:

$D(p_{125}) = 19,6 \cdot 0,0086 \cdot 0,849 = 0,14 \text{ mGy}$ pro 100 mAs. Použito však bylo 150 mAs, proto $D(p_{125}) = 1,5 \cdot 0,14 \text{ mGy} = 0,21 \text{ mGy}$.

Metoda Damilakis et al (5): Nelze použít, nejedná se o brzkou fázi gravidity.

Program CT-Expo: Nelze použít, program neumožňuje odhad dávky na plod v pozdějších fázích gravidity.

Program CODE: Zadáním 3. trimestru, 120 kV, 150 mAs, 1,2 pitch faktor, celková kolimace 38,4 mm, obvod pacientky 125 cm, CTDI_a = 19,6 mGy, CTDI_w = 7,4 mGy dostáváme dávku na plod **0,54 mGy**.

Z jednotlivých metod odhadu vyplynulo, že odhadovaná dávka na plod se pohybuje mezi 0,2 mGy a 0,5 mGy.

Na jednotlivých příkladech je vidět, že téměř ve všech případech rtg zobrazení je možné použít alespoň některý ze způsobů pro odhad dávky na plod.

SHRNUTÍ

Každý ze způsobů odhadu dávky na plod je vhodný pro různé typy rtg výkonů. Studie (2) poskytuje návod a normalizované dávkové koeficienty pro výpočet dávky na plod při skiagrafických vyšetřeních břicha. Programy PCXMC a CT-Expo jsou použitelné pro odhad dávky na plod ve fázi gravidity, kdy je možné předpokládat, že dávka na plod odpovídá dávce na dělohu. Tento předpoklad platí pouze v brzkých fázích gravidity. Odhad dávky na plod je možné provést také v 1. trimestru, ale odhad již nebude tak přesný. Program CODE lze použít za všech okolností ve všech fázích gravidity, stejně tak normalizované dávkové koeficienty a rovnice ze studie (4). Program CODE a studie (4) umožňují odhad dávky na plod z CT výkonů i v případech, kdy se plod nenachází v primárním rtg svazku. Studie (3) umožňuje odhad dávek na plod pro všechny fáze gravidity již na základě znalosti obvodu pacientky a hloubky uložení plodu. Studie (5) umožňuje odhad dávek na plod pouze v brzkých fázích gravidity pro různé obvody pacientky a hloubky uložení plodu.

Jako nejuniverzálnější způsob výpočtu dávky na plod pro všechny typy rtg výkonů se jeví program CODE (přístupný zdarma po registraci). Pro odhad dávky na plod z CT je velmi užitečný také výpočet použitím rovnic a normalizovaných dávkových koeficientů ze studie (4).

LITERATURA

1. **International Commission on Radiological Protection.** The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP 2007; 37(2–4).
2. **Damilakis J, Tzedakis A, Sideri L, et al.** Normalized conceptus doses for abdominal radiographic examinations calculated using a Monte Carlo technique. Med Phys 2002; 29(11): 2641–2648.
3. **Angel E, Wellnitz CV, Goodsitt MM, et al.** Radiation dose to the fetus for pregnant patients undergoing multidetector CT imaging: Monte Carlo simulations estimating fetal dose for a range of gestational age and patient size. Radiology 2008; 249(1): 220–227.
4. **Damilakis J, Tzedakis A, Perisinakis K, Papadakis AE.** A method of estimating conceptus doses resulting from multidetector CT examinations during all stages of gestation. Med. Phys. 2010; 37(12): 6411–6420.
5. **Damilakis J, Perisinakis K, Tzedakis A, Papadakis AE, Karantanis A.** Radiation dose to the conceptus from multidetector CT during early gestation: A method that allows for variations in maternal body size and conceptus position. Radiology 2010; 257(2): 483–489.