

## FUNKČNÉ VYŠETRENIE FETÁLNEHO SRDCA

František Grochal, Róbert Dankovčík

**Prenatálna ultrazvuková diagnostika umožňuje neinvazívne posúdenie funkcie fetálneho srdca využívajúc tak 2D, ako aj 3D/4D technológie či dopplerovské merania. Hodnotenie funkcie srdca nadobúda význam hlavne pri plodoch s intrauterinnou rastovou retardáciou, materským diabetom, kongenitálnymi anomáliami srdca a pod. Článok poukazuje na niektoré súčasné možnosti ultrazvukového posúdenia fetálnej kardiálnej funkcie využívajúc viacero parametrov známych z pediatickej či adultnej kardiológie, ako srdcový vývrhový objem (SV – Stroke Volume), kardiálny výdaj (CO – Cardiac Output), ejekčná frakcia (EF – Ejection Fraction), frakčné skrátenie (SF – Shortening Fraction), index myokardiálnej výkonnosti (MPI – Myocardial Performance Index).**

**Kľúčové slová:** 2D ultrazvuk, 3D/4D ultrazvuk, fetálna kardiálna funkcia

### FUNCTIONAL EXAMINATION OF THE FOETAL HEART

**Prenatal ultrasonography enables non-invasive assessment of foetal cardiac function utilizing 2D, 3D/4D or Doppler techniques. Evaluation of cardiac function is particularly important in cases of foetal intrauterine growth restriction, maternal diabetes, congenital cardiac defects, and so on. The article shows some of the current possibilities of ultrasonographic assessment of the foetal cardiac function utilizing some parameters known in paediatric or adult cardiology, like SV – Stroke Volume, CO – Cardiac Output, EF – Ejection Fraction, SF – Shortening Fraction, or MPI – Myocardial Performance Index.**

**Key words:** 2D ultrasound, 3D/4D ultrasound, foetal cardiac function

Gynekol. prax 2012; 10 (3): 106-109

Funkcia fetálneho srdca je ukazovateľom závažnosti viacerých patologických stavov plodu sprevádzajúcich nielen kongenitálne defekty srdca, ale aj intrauterinnú rastovú retardáciu, hydrops plodu, komplikácie viacpočetných gravidít (twin-to-twin transfúzny syndróm), fetálne infekcie, fetálne arytmie a ďalšie. Posúdenie kardiálnej funkcie plodu umožňuje lepší odhad prognózy takýchto stavov, načasovanie pôrodu alebo v poslednom období dokonca selekciu prípadov pre fetálne kardiálne intervencie.

Základné stavebné a funkčné jednotky myokardu, kardiomyocyty, sú usporiadané do spleti vlákien s pomerne zložitou priestorovou architektúrou. Povrchové vlákna prebiehajú ako geodetické línie po vnorených, hlbšie uložených vláknach, vytvárajúcich štruktúru dvoch vedľa seba umiestnených toroidov, ktoré svojím celkovým tvarom pripomínajú pračlík. Povrchové vlákna prebiehajú longitudinálne, ale zároveň šikmo vstupujú do hlbších vrstiev od epikardu až po endokard<sup>(1)</sup>. Toto výnimočné usporiadanie vlákien kardiomyocytov umožňuje vyvinúť dostatočný intrakardiálny tlak a objemové zmeny zabezpečujúce potrebný srdcový výdaj aj napriek tomu, že samotný kardiomyocyt dokáže po elektrickej aktivácii skrátiť svoju dĺžku len približne o 10-35%<sup>(2)</sup>.

Fetálne srdce predstavuje systém dvoch paralelne pracujúcich púmp zásobujúcich malý a veľký krvný obeh, prepojených dvomi významnými skratmi – foramen ovale a ductus arteriosus. Keď tlak v komorách poklesne pod úroveň tlaku v predsieniach, otvoria sa atrioventrikulárne chlopne a krv sa dostáva do komôr najprv pasívne a po depolarizácii a kontrakcii predsiení (tzv. atrial kick) aj aktívne. Pri-

spevok predsieňovej kontrakcie k plneniu komôr, a v konečnom dôsledku aj k srdcovému výdaju, sa stáva dôležitý hlavne pri zvýšenej srdcovej frekvencii, keď sa fáza pasívneho plnenia výrazne skracuje. Následná depolarizácia komôr vedie k prudkému vzostupu tlaku v komorách a uzatvoreniu atrioventrikulárnych chlopní. Počas nasledujúcej fázy izovolumickej kontrakcie tlak v komorách stúpa až dovedy, kým jeho hodnota prevýši tlak v aorte a pulmonálnej artérii. V tomto momente sa otvoria semilunárne chlopne a krv je ejektovaná do arteriálnej cirkulácie. Tlak v komorách následne klesá až dovedy, kým tlak v arteriálnom riečisku prevýši tlak v komorách a dôjde k uzavretiu semilunárnych chlopní. Komory sa relaxujú, ale ich objem sa začne zväčšovať influxom krvi z predsiení až po otvorení atrioventrikulárnych chlopní. Táto fáza od zatvorenia semilunárnych chlopní, až po otvorenie atrioventrikulárnych chlopní sa nazýva fáza izovolumickej relaxácie. Predsiene sa kontinuálne plnia venóznou krvou počas komorovej kontrakcie a tlak v predsieniach stúpa až dovedy, kým sa neotvoria atrioventrikulárne chlopne, čím sa celý cyklus začne opakovať<sup>(3)</sup>.

Hodnotenie funkcie fetálneho srdca využíva viacero parametrov známych z pediatickej či adultnej kardiológie, ako srdcový vývrhový objem (SV – Stroke Volume), kardiálny výdaj (CO – Cardiac Output), ejekčná frakcia (EF – Ejection Fraction), frakčné skrátenie (SF – Shortening Fraction), index myokardiálnej výkonnosti (MPI – Myocardial Performance Index). Sonografické získavanie a meranie týchto parametrov využíva viaceré modalítity – M-mód, 2D ultrazvuk, 3D/4D ultrazvuk či dopplerovské techniky. V poslednom období sú tiež rozpracované veľmi sofistiko-

vané merania využívajúce špeciálny softvér umožňujúci kvantifikovať myokardiálnu deformáciu použitím tkanivového dopplera (TDI – Tissue Doppler Imaging) alebo 2D mapovaním rýchlosti deformácie (strain rate) a deformácie (strain) sledovaných bodov určitej oblasti myokardu, tzv. 2D speckle tracing (2D-strain).

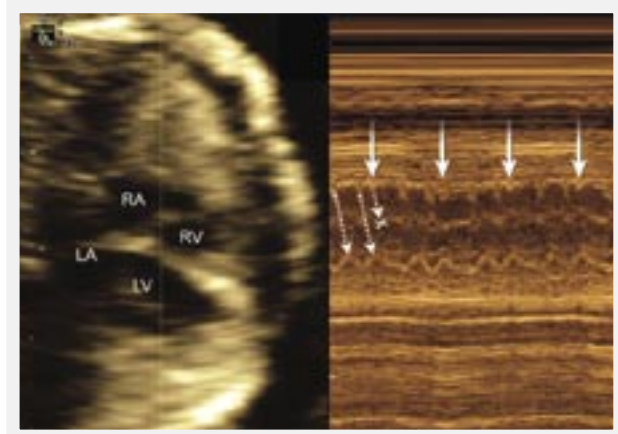
### M-mód a hodnotenie kardiálnej funkcie

M-mód vďaka svojej vysokej časovej rozlíšiteľnosti umožňuje zachytiť aj drobné zmeny kardiálneho rytmu a odmerať trvanie jednotlivých fáz srdcového cyklu. Je kombinovaný s 2D módom, čo umožňuje umiestniť ultrazvukový zväzok M-módu do požadovanej oblasti myokardu.

Najčastejšie sa M-mód využíva pri hodnotení fetálnych dysrytmií. Ultrazvukový zväzok M-módu je smerovaný simultánne cez pravú predsieň a ľavú komoru pri zobrazení 4-dutinovej projekcie srdca (**obrázok 1**). To umožní posúdiť frekvenciu a vzťah predsieňových a komorových kontrakcií. Ak sa ultrazvukový zväzok M-módu nasmeruje v štvordutinovej projekcii srdca kolmo na interventrikulárne septum cez pravú a ľavú komoru, umožní posúdiť end-systolický a end-diastolický priemer komôr a vypočítať tak frakčné skrátenie SF. Pre ľavú komoru potom platí:  $SF = (LVED - LVES)/LVED$ , kde LVED predstavuje end-diastolický priemer ľavej komory (Left Ventricle End-diastolic Diameter) a LVES predstavuje end-systolický priemer ľavej komory (Left Ventricle End-systolic Diameter). Analogicky sa dá vypočítať frakčné skrátenie aj pre pravú komoru. Normálna hodnota frakčného skrátenia je  $> 28\%$ <sup>(4)</sup>.

M-mód sa dá využiť aj v dlhej osi srdca na hodnotenie pohybu prstenca atrioventrikulárnych chlopní, predovšetkým trikuspidálnej chlopne pre prevažne longitudinál-

**Obrázok 1.** Hodnotenie srdcových dysrytmií pomocou M-módu – predčasné predsieňové neprevedené kontrakcie. Ultrazvukový lúč M-módu (bodkovaná línia) je smerovaná cez pravú predsieň a ľavú komoru v 2D obraze štvordutinovej projekcie srdca (ľavá časť obrázku; RA – pravá predsieň, LA – ľavá predsieň, RV – pravá komora, LV – ľavá komora). Pravá časť obrázka zobrazuje pohyb jednotlivých štruktúr ležiacich v línii ultrazvukového lúča M-módu. Záznam ukazuje neprevedené predčasné predsieňové kontrakcie, extrasystoly (plné, dole smerujúce šípky). Normálne, prevedené kontrakcie z predsiení na komory sú vyznačené bodkovanými šípkami (predčasná predsieňová extrasystola je zobrazená krátkou, bodkovanou šípkou s krížikom – táto extrasystola sa na komory neprevedie a v komorovom rytme je výpadok jednej kontrakcie)



nu orientáciu svalových vlákien pravej komory, oproti ľavej, ktorá má viac cirkulárne orientovaných vlákien<sup>(1)</sup>.

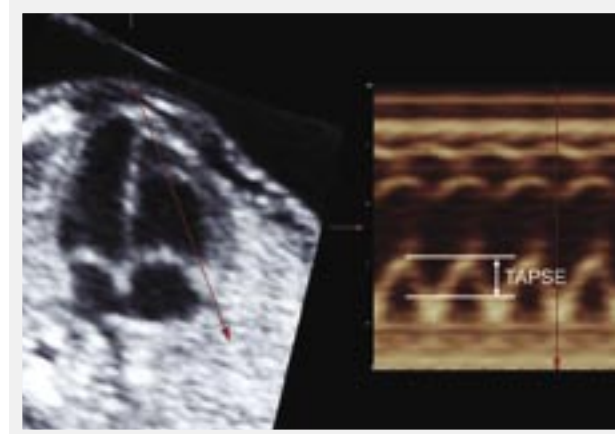
### 3D/4D ultrazvuk a hodnotenie kardiálnej funkcie

Systolické exkurzie trikuspidálneho prstenca „TAPSE – Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion“ sa dajú hodnotiť nielen klasickou kombináciou M-módu a 2D zobrazenia, ale aj s využitím 4D funkcií, tzv. STIC M-módom (Spatio Temporal Image Correlation M-mode). STIC predstavuje 4D metodiku akvizície dát, pri ktorej sonda vykonáva pomalý pohyb, zaznamenávajúc sériu 2D obrazov srdca počas viacerých srdcových cyklov. Tieto 2D obrazy sú potom počítačovo zoradené podľa určitého matematického algoritmu tak, že sa získa jeden reprezentatívny kompletný trojdimenzionálny srdcový cyklus zobrazujúci sa ako dookola sa opakujúca slučka. V takto vygenerovanom trojdimenzionálnom obraze možno v priebehu srdcového cyklu pozorovať pohyb srdca v ľubovoľne stanovenej rovine zobrazenia. To umožní vybrať optimálnu 2D rovinu pre umiestnenie línie M-módu. Na hodnotenie TAPSE sa využíva apikálna 4-dutinová projekcia, pri ktorej línia M-módu prechádza apexom srdca a miestom ukotvenia trikuspidálnej chlopne k bočnej stene pravej komory (**obrázok 2**)<sup>(5)</sup>.

Analogicky sa dá merať aj pohyb mitrálneho prstenca. Doterajšie malé štúdie opisujú normálne hodnoty od 3,2 mm ( $\pm 0,5$ ) v 20. týždni až po 8,3 mm ( $\pm 1,0$ ) v 37. týždni<sup>(5,6)</sup>.

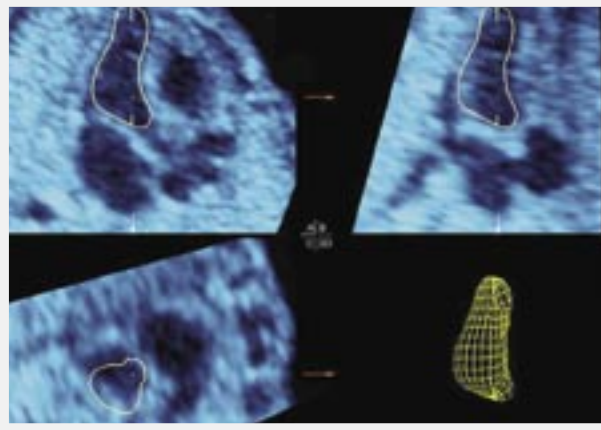
Meranie srdcového výdaja (CO – Cardiac Output) pravej a ľavej komory je predmetom záujmu hodnotenia pri viacerých patologických stavoch plodu spojených najmä s objemovým preťažením srdca (agenéza ductus venosus, vaskulárne tumory, acardiac twin a pod.). M-mód či 2D ultrazvuk umožňuje len hrubší odhad objemových parametrov srdca, využívajúc rôzne matematické prepočty (napr. Teichholzov vzorec pri M-móde, alebo Simpsonov prepočet pri 2D ultrazvuku)<sup>(7,8)</sup>. 3D/4D ultrazvuk poskytuje

**Obrázok 2.** Hodnotenie systolickej exkurzie trikuspidálneho prstenca (TAPSE – Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion) využitím zobrazenia M-mode STIC (M-mode Spatio Temporal Image Correlation). Ľavá časť obrázka predstavuje optimálne zvolenú 2D rovinu 4-dutinovej apikálnej projekcie srdca zo 4D akvizície. Línia M-módu je potom vedená cez apex a úpon trikuspidálnej chlopne na bočnú stenu pravej komory (tenká línia ukončená šípkou). Pravá časť obrázka zobrazuje M-mód zobrazenie a meranie exkurzie prstenca trikuspidálnej chlopne (TAPSE).

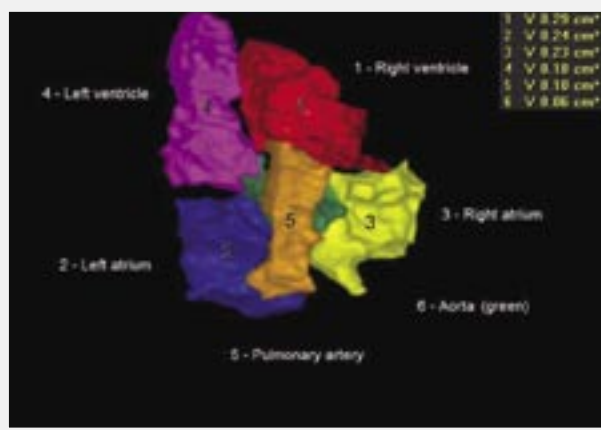


presnejšie meranie (nielen odhad) objemových parametrov, najmä ak berieme do úvahy nepravidelný tvar srdcových komôr. Novšie 4D volumetrické merania ako napríklad VOCAL (Virtual Organ Computer Aided Analysis) (obrázok 3) či SonoAVC (Sonographic Automatic Volume Calculation) (obrázok 4) sa ukázali ako presnejšie a reprodukovateľnejšie napríklad v porovnaní s dopplerovskými meraniami<sup>(9)</sup>. Ich klinické využitie v prenatalnom hodnotení rôznych patologických stavov spojených s kardiálnou dysfunkciou (intrauterinná rastová retardácia, hydrops plodu, komplikácie viacpočetných gravidít, fetálne infekcie, fetálne arytmie atď.) nie je nateraz súčasťou bežnej prenatalnej sonografickej diagnostiky (vzhľadom na nie všade dostupné špeciálne 4D ultrazukové vybavenie, dostatočne vyškolený personál, časovú náročnosť, atď.).

**Obrázok 3.** Meranie objemu ľavej komory srdca využitím 4D ultrazvuku a VOCAL (Virtual Organ Computer Aided Analysis). V multiplanárnom zobrazení sa manuálne alebo semiautomatcky zadefinuje oblasť (hranice) ľavej komory (žltá línia). 2D obraz je potom v niekoľkých krokoch (v tomto prípade po 30°) otáčaný o 180° a zakaždým užívateľ označí hranicu ľavej komory. Následne je počítačovo stanovený objem a vyhotovená 3D rekonštrukcia ľavej komory (právy dolný obrázok).



**Obrázok 4.** Meranie objemu jednotlivých častí srdca využitím 4D ultrazvuku a SonoAVC (Sonographic Automatic Volume Calculation). Táto metóda sa využíva v gynekológii na hodnotenie objemu a počtu ovariálnych folikulov. Ak sa však aplikuje pri 4D vyšetrení srdca, umožňuje farebne odlišiť a zadefinovať objemy jednotlivých častí srdca, ako to ukazuje obrázok. Takáto analýza je však pomerne práca a časovo náročná a tak sa v bežnej praxi nevyužíva. 1 – pravá komora, 2 – ľavá predsieň, 3 – pravá predsieň, 4 – ľavá komora, 5 – pulmonálna artéria, 6 – aorta (znázornená zelenou farbou).



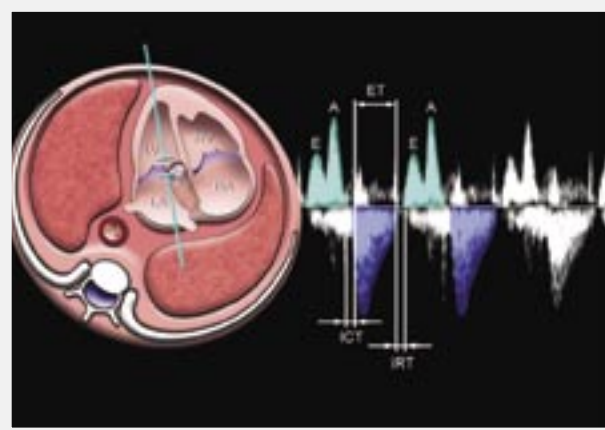
## Doppler ultrazvuk v hodnotení kardiálnej funkcie

Dopplerovské merania sa stali súčasťou bežného ultrasonografického vyšetrenia plodu. Jednoduchá aplikácia tohto merania umožňuje stanoviť kardiálny výdaj pravej či ľavej komory na základe získania paralelného pulzného dopplerovského signálu z pulmonálnej artérie alebo aorty, pri umiestnení okna vzorkovacieho objemu tesne nad semilunárne chlopne. Ak v tomto mieste odmeriame priemer pulmonálnej artérie (rPA) či aorty (rAo), bude napríklad pre kardiálny výdaj ľavej komory platiť:  $CO = 2 \times \pi \times rAo \times VTI \times HR$  (kde VTI je plocha ejekčnej dopplerovskej krivky na úrovni aorty a HR je frekvencia srdca). Normálny kombinovaný fetálny kardiálny výdaj pravej a ľavej komory je 450 ml/min/kg<sup>(10)</sup>.

Abnormálna funkcia srdca sa v konečnom dôsledku prejaví na viacerých úrovniach a dopplerovské merania arteriálnych či venózných tokov sa dajú urobiť na rôznych miestach kardiovaskulárneho systému (umbilikálna vena, ductus venosus, vena cava inferior, hepatálne veny a pod.). Ak však hodnotíme srdce ako také, je možné dopplerovské merania urobiť na jeho úrovni či na úrovni jeho výtokových traktov.

Srdcový cyklus tvorí päť základných fáz – fáza včasného diastolického plnenia komôr, fáza atriálnej kontrakcie, fáza izovolumickej kontrakcie komôr, ventrikulárna kontrakcia,

**Obrázok 5.** Kresba zobrazuje spôsob získavania krivky spektrálneho Dopplera na úrovni tzv. 5-dutinovej apikálnej projekcie srdca. Kalipery vzorkovacieho objemu sú umiestnené do oblasti odstupe aorty (Ao) tak, aby zaberali aj časť mitrálnej chlopne. Krivka spektrálneho Dopplera potom zaznamená tak vtokové, ako aj výtokové udalosti počas srdcového cyklu. Srdcový cyklus sa začína iniciálnou vlnou E reprezentujúcou včasnú pasívnu fázu plnenia komôr. Po nej nasleduje fáza kontrakcie predsieni (vlna A) – aktívna fáza plnenia komôr. Tlak v komorách stúpa až dovtedy, kým jeho hodnota nepresiahne intraatriálny tlak. Počas nasledujúcej fázy izovolumickej kontrakcie (ICT) tlak v komorách stúpa až dovtedy, kým jeho hodnota prevyší tlak v aorte a pulmonálnej artérii. V tomto momente sa otvoria semilunárne chlopne a krv je ejektovaná do arteriálnej cirkulácie (ET). Tlak v komorách následne klesá až dovtedy, kým tlak v arteriálnom riečiisku prevyší tlak v komorách a dôjde k uzavretiu semilunárných chlopní. Komory sa relaxujú, ale ich objem sa začne zväčšovať influxom krvi z predsieni až po otvorení atrioventrikulárnych chlopní. Táto fáza od zatvorenia semilunárných chlopní až po otvorenie atrioventrikulárnych chlopní sa nazýva fáza izovolumickej relaxácie (IRT). Predsiene sa kontinuálne plnia venóznou krvou počas komorovej kontrakcie a tlak v predsieniach stúpa až dovtedy, kým sa neotvorí atrioventrikulárne chlopne, čím sa celý cyklus začne opakovať. LV – ľavá komora, RV – pravá komora, RA – pravá predsieň, LA – ľavá predsieň, DA – descendentná aorta.



fáza izovolumickej relaxácie komôr (**obrázok 5**). Existuje viacero spôsobov, ako posúdiť ich vzájomnú časovú súslednosť. Za všetky uvádzam techniku hodnotenia spektrálnej dopplerovskej krivky získanej z jej záznamu na úrovni tzv. 5-dutinovej projekcie srdca (**obrázok 5**).

Z dopplerovskej krivky môžeme posúdiť amplitúdy a časové trvanie jednotlivých fáz kardiálneho cyklu. Porovnaním pomeru vlny E a vlny A počas plnenia komôr získame obraz o diastolickej funkcii srdca (tzv. E/A ratio – jeho hodnota stúpa približne z 0,6 v 20. týždni až na 0,75-0,9 v termíne, čo súvisí so zlepšovaním ventrikulárnej relaxácie)<sup>(11)</sup>.

V roku 1995 predstavil Tei a kol. nový index hodnotenia kombinovanej systolickej a diastolickej funkcie, tzv. index myokardiálnej výkonnosti (Myocardial Performance Index, alebo Teiov index)<sup>(12,13)</sup>. Vypočíta sa ako suma izovolumickej kontrakcie (ICT) a izovolumickej relaxácie (IRT) delená ejekčným časom (ET). To sa dá odčítať napríklad zo spektrálnej dopplerovskej krivky získanej jej záznamom na úrovni 5-dutinovej projekcie srdca (**obrázok 5**). Teiov index sa podľa rôznych štúdií pohybuje okolo  $0,35 + 0,05$  až po  $0,53 + 0,13$ <sup>(10)</sup>.

Nové možnosti hodnotenia kardiálnej funkcie dáva v súčasnosti aj využitie tkanivového Dopplera. Špeciálny softvér najnovších prístrojov umožňuje kvantifikovať myokardiálnu deformáciu (napätie, strain) počas srdcového cyklu a poskytuje informáciu o regionálnej myokardiálnej kon-

traktilite. Tieto metódy hodnotia tkanivové napätie (strain) ako analóg regionálnej ejekčnej frakcie a časový priebeh deformácie, tzv. strain rate, odrážajúci kontraktilitu<sup>(14)</sup>.

### Záver

Súčasná možnosti ultrazvukového zobrazenia srdca dávajú možnosť neinvazívneho posúdenia jeho funkcie. V článku uvádzané metódy hodnotenia kardiálnej funkcie predstavujú len ich časť. Nové ultrazvukové 3D/4D modalita, či dopplerovské hodnotenie tkanivového napätia myokardu sa ukazujú ako sľubné metódy budúcnosti pri hodnotení kardiálnej funkcie plodov s intrauterinnou rastovou retardáciou, materským diabetom, kongenitálnymi anomáliami srdca a pod. Ich širšie uplatnenie v bežnej praxi je však limitované dostupnosťou prístrojového vybavenia, náročnou akvizíciou dát s nutnosťou adekvátne zaškoleného personálu, ako aj časovou náročnosťou takýchto meraní.

### Adresa pre korešpondenciu:

MUDr. František Grochal  
Femicare, Centrum prenatálnej ultrazvukovej diagnostiky, Martin  
ÚVN SNP Ružomberok, Gynekologicko-pôrodnica klinika, Ružomberok  
e-mail: frantigrochal@gmail.com

doc. MUDr. Róbert Dankovčík, PhD., MPH.  
II. gynekologicko-pôrodnica klinika LF UPJŠ Košice  
Centrum prenatálnej diagnostiky, s. r. o., Košice

### Literatúra

- Jouk PS, Usson Y, Michalowicz G, et al. Three-dimensional cartography of the pattern of the myofibres in the second trimester fetal human heart. *Anat Embryol (Berl)* 2000; 202(2): 103-118.
- Sonnenblick EH, Ross J Jr, Covell JW, et al. The ultrastructure of the heart in systole and diastole. Changes in sarcomere length. *Circ Res* 1967; 21(4): 423-431.
- Godfrey ME, Messing B, Cohen SM, et al. Functional assessment of the fetal heart: a review. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2012; 39(2): 131-144.
- Huhta JC. Fetal congestive heart failure. *Semin Fetal Neonatal Med* 2005; 10(6): 542-552.
- Carvalho JS, O'Sullivan C, Shinebourne EA, et al. Right and left ventricular long-axis function in the fetus using angular M-mode. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2001; 18(6): 619-622.
- Messing B, Lipschuetz M, Valsky DV, et al. Evaluation of right heart performance in healthy fetuses with TAPSE. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2010; 36(Suppl 1): 1-51.
- Kronik G, Slany J, Mösslacher H. Comparative value of eight M-mode echocardiographic formulas for determining left ventricular stroke volume. A correlative study with thermodilution and left ventricular single-plane cineangiography. *Circulation* 1979; 60(6):1308-1316.
- Bellenger NG, Burgess MI, Ray SG, et al. Comparison of left ventricular ejection fraction and volumes in heart failure by echocardiography, radionuclide ventriculography and cardiovascular magnetic resonance; are they interchangeable? *Eur Heart J* 2000; 21(16): 1387-1396.
- Dekoninck P, Steenhaut P, Van Mieghem T, et al. Comparison of Doppler-based and three-dimensional methods for fetal cardiac output measurement. *Fetal Diagn Ther* 2012; 32(1-2): 72-78.
- Callen PW. *Ultrasonography in obstetrics and gynecology*, 5th ed. Philadelphia: Saunders

Elsevier 2008; 1239s.

- Rizzo G, Arduini D. Fetal cardiac function in intrauterine growth retardation. *Am J Obstet Gynecol* 1991;165(4 Pt 1): 876-882.
- Tei C, Ling LH, Hodge DO, et al. New index of combined systolic and diastolic myocardial performance: a simple and reproducible measure of cardiac function--a study in normals and dilated cardiomyopathy. *J Cardiol* 1995; 26(6): 357-366.
- Tei C. New non-invasive index for combined systolic and diastolic ventricular function. *J Cardiol* 1995; 26(2): 135-136.
- Marwick TH. Measurement of strain and strain rate by echocardiography: ready for prime time? *J Am Coll Cardiol* 2006; 47(7): 1313-1327.