

Otrzymano:
25.07.2019

Zaakceptowano:
16.10.2019

Opublikowano:
31.12.2019

Ocena czynności serca na podstawie trójwymiarowego badania USG w trybie 4D-STIC i VOCAL – aktualizacja

Fetal cardiac function by three-dimensional ultrasound using 4D-STIC and VOCAL – an update

Nathalie Jeanne Bravo-Valenzuela¹, Alberto Borges Peixoto²,
Milene Carvalho Carrilho¹, Ana Letícia Siqueira Pontes¹,
Caroline Cevante Chagas¹, Christiane Simioni¹,
Edward Araujo Júnior¹

¹ Department of Obstetrics, Paulista School of Medicine, Federal University of São Paulo (EPM-UNIFESP), São Paulo, Brazilia

² Department of Obstetrics and Gynecology, Federal University of Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba-MG, Brazilia

Adres do korespondencji: Prof. Edward Araujo Júnior, PhD, Rua Belchior de Azevedo, 156 apto., 111 Torre Vitoria, São Paulo–SP, Brazil, CEP 05089-030; tel./fax: + 55 11 37965944, e-mail: araujojed@terra.com.br

DOI: 10.15557/JoU.2019.0043

Abstract

Three- and four-dimensional (3D/4D) ultrasonography with spatio-temporal image correlation (4D-STIC) allows obtaining fetal cardiac volumes and their static and real-time analysis in multiplanar and rendering modes. Cardiac biometrics and Doppler-echocardiographic parameters for evaluation of fetal heart function, including cardiac output and stroke volume, can be analyzed using M-mode, two-dimensional (2D), and 3D/4D cardiac ultrasound. In recent years, functional echocardiography has been used to study fetuses without a structurally cardiac defect but who are at risk of heart failure due to the presence of extra-cardiac conditions, such as, fetal growth restriction, tumors/masses, twin-to-twin transfusion syndrome, fetal anemia (Rh alloimmunization), congenital infections, or maternal diabetes mellitus. The assessment of cardiac function provides important information on hemodynamic status and can help optimize the best time for delivery and reduce perinatal morbidity and mortality. Since 2003, with the advent of the 4D-STIC software, it is possible to evaluate the fetal heart in multiplanar, and rendering modes. This technology associated with virtual organ computer-aided analysis (VOCAL) enables determining the ventricular volume (end-diastole, end-systole), the stroke-volume, the ejection fraction, and the cardiac output of each ventricle. Since 2004, several studies demonstrated that the 4D-STIC and VOCAL had good reproducibility to measure cardiac volumes. This study reviews published studies that evaluated the fetal cardiac function by 3D ultrasound using 4D-STIC and VOCAL software.

Słowa kluczowe

serce płodu,
czynność serca,
trójwymiarowe
badanie USG,
czasowo-
przestrzenna
korelacja obrazu,
wirtualna
wspomagana
komputerowo analiza
objętości narządów

Keywords

fetal heart,
cardiac function,
three-dimensional
ultrasound,
spatio-temporal
image correlation,
virtual organ
computer-aided
analysis

Wstęp

Wrodzone wady serca dotyczą jednego noworodka na 100 żywych urodzeń i stanowią istotną przyczynę zachorowalności i śmiertelności okołoporodowej⁽¹⁻⁴⁾. Ultrasonografia (USG) i echokardiografia płodu umożliwiają przeprowadzenie badań przesiewowych i diagnostyki w kierunku nieprawidłowości anatomicznych i czynnościowych serca, co z kolei pozwala zaplanować poród oraz, w niektórych przypadkach, wdrożyć leczenie prenatalne, sprzyjając dobremu rokowaniu poporodowemu u pacjentów z wrodzonymi wadami serca⁽⁵⁻⁷⁾.

W przypadku stwierdzenia wad anatomicznych u płodu rutynowo ocenia się czynność serca. W ostatnich latach echokardiografia czynnościowa znajduje zastosowanie w badaniu płodów z prawidłową budową serca, lecz podatnych na zmiany hemodynamiczne wynikające z obecności chorób pozaserowych, w tym zahamowania wzrostu płodu, guzów/masy tkankowej, zespołu przetoczenia krwi między płodami, niedokrwistości płodowej (alloimmunizacji w układzie Rh), zakażeń wrodzonych lub schorzeń u matki, takich jak cukrzyca, układowe nadciśnienie tętnicze i choroba Gravesa-Basedowa⁽⁸⁻¹¹⁾.

Ocena czynności serca dostarcza kluczowych informacji na temat stanu hemodynamicznego i adaptacji układu krążenia płodu i może ograniczyć zachorowalność oraz śmiertelność okołoporodową lub ewentualnie może pomóc oszacować najbardziej odpowiedni czas na terminację ciąży oraz. Różnorodne parametry czynności mięśnia sercowego można analizować łącznie, biorąc pod uwagę określone zastosowania w różnych jednostkach chorobowych.

Funkcję skurczową serca płodu można oceniać na podstawie pomiaru frakcji wyrzutowej serca (*ejection fraction*, EF), frakcji skracania (*shortening fraction*, SF), pojemności minutowej serca (*cardiac output*, CO), objętości serca (*cardiac volume*, CV), maksymalnego przemieszczenia

pierścienia zastawki (trójdzielnej lub mitralnej), wskaźnika globalnej wydolności mięśnia sercowego (*myocardial performance index*, MPI) oraz parametrów odkształcenia mięśnia sercowego⁽⁸⁻¹³⁾. Analizę czynności serca, w tym parametrów SF, CO i CV, można przeprowadzić z zastosowaniem ultrasonografii jednowymiarowej (trybu M-mode), dwuwymiarowej lub ultrasonografii 3D/4D. Pomiar objętości komór podczas rozkurczu i skurczu w badaniu USG 3D/4D z wirtualną wspomaganą komputerowo analizą objętości narządów (*virtual organ computer-aided analysis*, VOCAL) umożliwia obliczenie EF i CO dla każdej komory (lewej i prawej) oraz obu komór (łączna wartość CO)^(14,15).

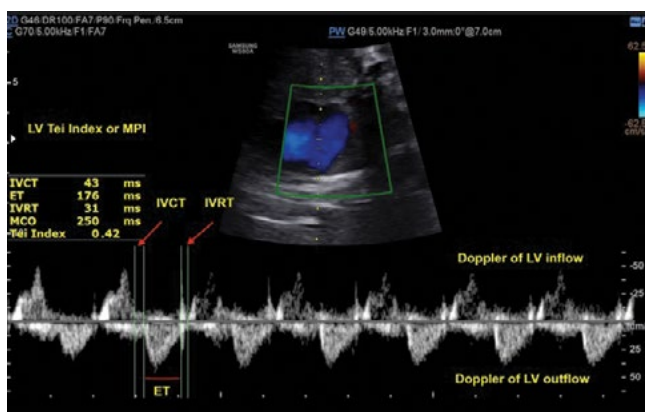
Celem niniejszego badania było dokonanie przeglądu prac oceniających czynność skurczową serca z zastosowaniem badania USG 3D w połączeniu z trybami czasowo-przestrzennej korelacji obrazu (*spatio-temporal image correlation*, 4D-STIC) i VOCAL.

Analiza czynności skurczowej

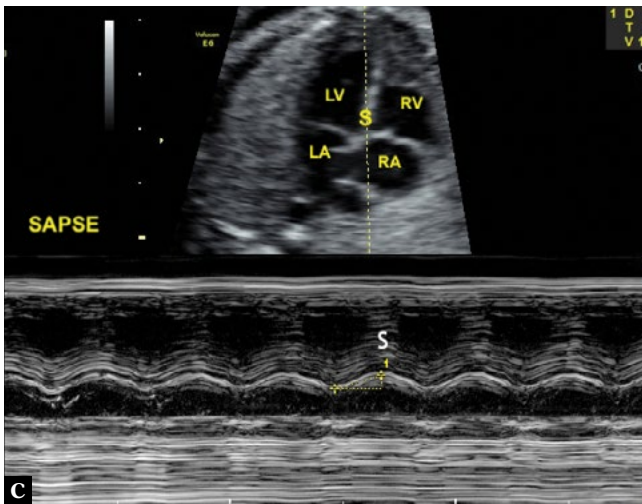
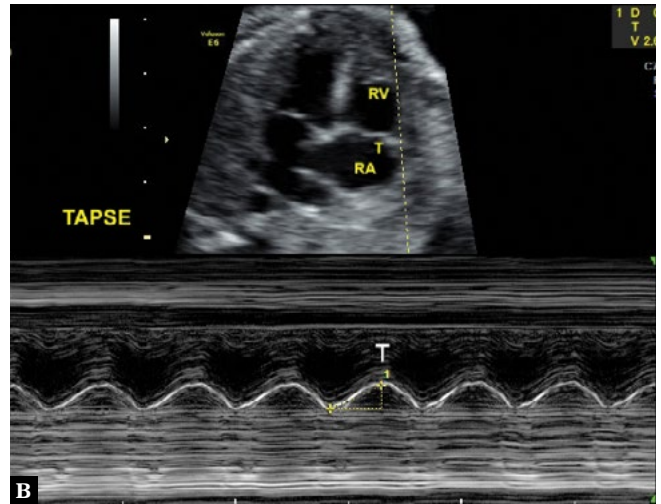
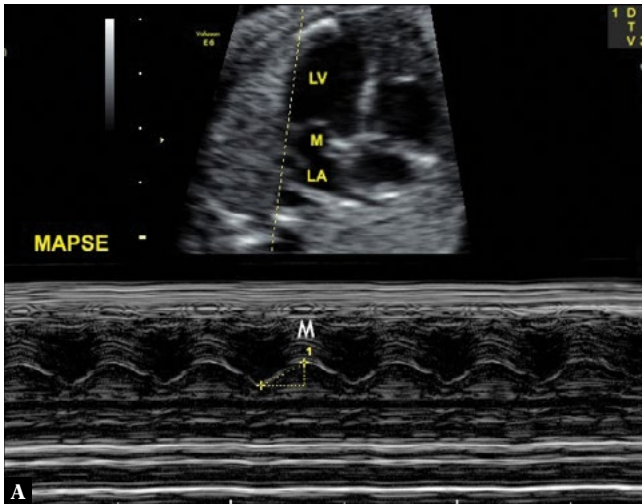
Dostępnych jest wiele technik służących do oceny czynności serca, w tym dopplerowskie badanie przepływowe, pomiar komór serca (biometria serca) oraz każdego odstępu w cyklu sercowym, parametru CV na podstawie badania USG 3D/4D lub kombinacji kilku parametrów. Zatem do oceny czynności skurczowej można stosować MPI, objętość wyrzutową (*stroke volume*, SV), CO, SF i EF.

Ocena wskaźnika globalnej wydolności mięśnia sercowego stanowi ilościową, nieinwazyjną metodę oceny skurczowej i rozkurczowej czynności serca. Wartość MPI oblicza się dla każdej z komór z zastosowaniem techniki Dopplera z analizą spektralną oraz następującego wzoru: czas skurczu izowolumetrycznego (*isovolumetric contraction time*, ICT) + czas rozkurczu izowolumetrycznego (*isovolumetric relaxation time*, IRT) / czas wyrzutu (*ejection time*, ET) (Ryc. 1). Zaburzenia czynności mięśnia sercowego mogą prowadzić do wydłużenia fazy izowolumetrycznej i zmniejszenia ET, powodując wzrost MPI. Wartości MPI powyżej 0,52 wykazują wysoką czułość i specyficzność w wykrywaniu zdarzeń niepożądanych w przebiegu ciąży i w okresie noworodkowym⁽¹⁶⁻¹⁹⁾.

Amplituda ruchu pierścienia zastawki przedsionkowo-komorowej, określona z zastosowaniem badania USG w trybie M-mode lub badania ECHO [ruch skurczowy boczny pierścienia zastawki mitralnej (*mitral annular plane systolic excursion*, MAPSE) i ruch skurczowy boczny pierścienia zastawki trójdzielnej (*tricuspid annular plane systolic excursion*, TAPSE)], jest łatwa do zmierzenia i dobrze skorelowana z pomiarami Dopplera tkankowego do oceny czynności skurczowej mięśnia sercowego płodu w osi długiej⁽²⁰⁾ (Ryc. 2A, B i C). Ponadto parametr TAPSE można określić w badaniu w trybie M-mode 4D-STIC z dobrą odtwarzalnością, dostępne są też zatwierdzone krzywe odniesienia dla tego parametru wg wieku ciążowego⁽²⁰⁻²¹⁾.



Ryc. 1. Wskaźnik globalnej wydolności mięśnia sercowego (MPI) lub wskaźnik Tei lewej komory obliczany na podstawie następującego wzoru: $MPI = \frac{\text{czas skurczu izowolumetrycznego (IVCT)} + \text{czas rozkurczu izowolumetrycznego (IVRT)}}{\text{czas wyrzutu (ET)}}$. W celu dokonania pomiaru MPI należy za pomocą badania metodą Dopplera uzyskać wartości dla dróg odpływu z i dopływu do komór

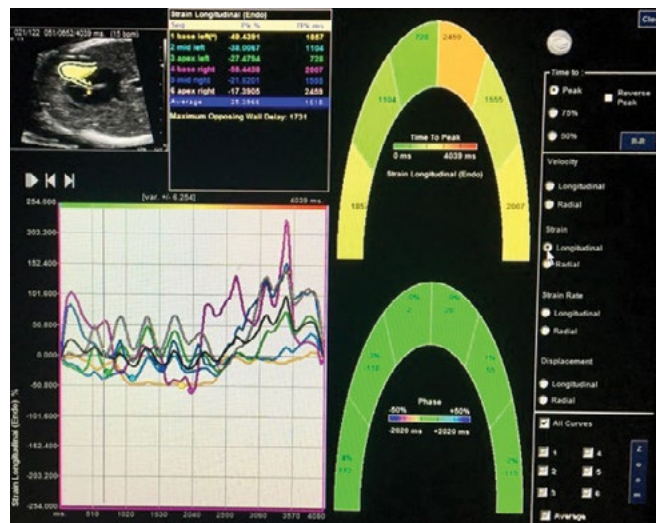


Ryc. 2. Ocena ruchu pierścienia zastawki przedsionkowo-komorowej w badaniu ECHO w trybie M-mode. **A.** MAPSE (mitral annular plane systolic excursion) zakres ruchu skurczowego bocznej części pierścienia mitralnego; **B.** TAPSE (tricuspid annular plane systolic excursion) zakres ruchu skurczowego bocznej części pierścienia trójdzielnego; **C.** SAPSE (septal annular plane systolic excursion) zakres ruchu skurczowego bocznej części pierścienia przegrodowego. LA – lewy przedsionek; LV – lewa komora; M – zastawka mitralna; RA – prawy przedsionek; RV – prawa komora; S – przegroda międzykomorowa; T – zastawka trójdzielna

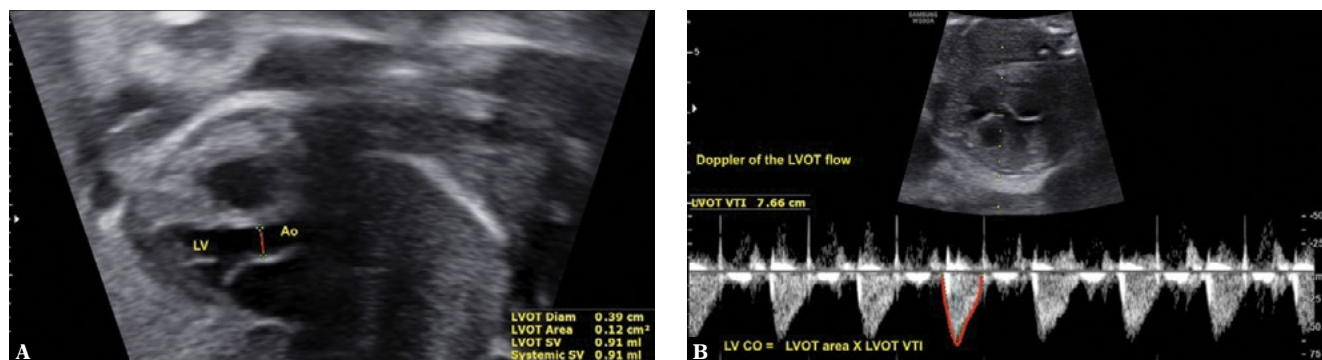
W ostatnich latach postępy w technice Dopplera tkankowego oraz metody śledzeniem markerów akustycznych przyczyniły się do poprawy dokładności pomiarów wskaźników odkształcenia mięśnia sercowego (odkształcenia i jego tempa), które odgrywają istotną rolę w ocenie czynności komory lewej (Ryc. 3). Pomimo dużego potencjału metody śledzenia markerów akustycznych w badaniu 2D przydatność tego badania w ocenie serca płodu wymaga walidacji⁽¹⁰⁻¹³⁾.

Parametr SV można obliczyć dla każdej komory w badaniu 2D, mnożąc wartość pola powierzchni zastawki drogi wypływu przez średnią wartość całki prędkości przepływu w czasie (*velocity-time integral*, VTI) dla komorowej drogi wypływu: $SV = \pi r^2 \times VTI$ (Ryc. 4). Wartość SV można określić za pomocą badania USG 3D/4D, korzystając z następującego wzoru: objętość późnorozkurczowa (*end-diastolic volume*, EDV) – objętość późnoskurczowa (*end-systolic volume*, ESV) (Ryc. 5). Całkowitą pojemność minutową serca można obliczyć, mnożąc sumę wartości SV dwóch komór przez tętno (HR) ($CO = RV\ SV + LV\ SV \times HR$). Podobnie jak w przypadku SV wartość CO można również obliczyć dla każdej komory i wartość tego parametru także wzrasta wraz z wiekiem ciążowym. Objętość wyrzutowa (SV) komory lewej i prawej jest dodatnio

skorelowana z wiekiem ciążowym i po 24. tygodniu ciąży wartość CO komory prawej przewyższa wartość CO komory lewej. Stosując ultrasonografię 2D, opracowano kilka wskaźników z-score i krzywych centylowych dla pojemności minutowej jako funkcji wieku ciążowego⁽²²⁻²⁶⁾. Na krzywych odniesienia wykreślonych dla wieku ciążowego wartości CO poniżej 5. centyla lub wartości poniżej $-2,0$ uznaje się za niskie, natomiast wartości powyżej 25. centyla lub wartości powyżej $+2,0$ uznaje się za wysokie. Ze wzrostem wartości CO płodu można się spotkać



Ryc. 3. Analiza odkształceń mięśnia sercowego za pomocą śledzenia markerów akustycznych – techniki, która zwiększa dokładność pomiarów



Ryc. 4. Objętość wyrzutową serca (stroke volume, SV) można obliczyć w trybie 2D dla każdej komory, mnożąc wartość pola powierzchni zastawki drogi wypływu przez całkę prędkości przepływu w czasie (VTI) dla komorowej drogi wypływu: $SV = \pi r^2 \times VTI$. Ao – aorta, LV – lewa komora, LVOT – droga wypływu lewej komory

w przypadkach malformacji tętniczo-żylnych ośrodkowego układu nerwowego (tętniak Galena), potworków i zespołu przetoczenia krwi między płodami, a ze spadkiem – w przypadkach niskiej kurczliwości serca, w tym zapalenia mięśnia sercowego i kardiomiopatii płodowej^(8,9,26).

Wartość EF odzwierciedla wartość procentową krwi wyrzuczonej z komór i można ją obliczyć dla każdej komory z zastosowaniem badania USG 3D z funkcją 4D-STIC według następującego wzoru: $EDV - ESV / EDV$. Parametry EDV i ESV można mierzyć z użyciem ultrasonografii 3D 4D-STIC w trybie VOCAL (Ryc. 5). Frakcja skracania (*shortening fraction*, SF) jest wskaźnikiem oceniającym zmniejszenie średnicy komory między fazami późnorozkurczową a późnoskurczową. Zastosowanie trybu M-mode i ultrasonografii 2D i 3D (trybu M-mode z funkcją 4D-STIC) umożliwia pomiar maksymalnej i minimalnej średnicy każdej z komór w projekcji czterojamowej. Wartość SF można obliczyć osobno dla każdej komory z zastosowaniem następującego wzoru: $\frac{\text{średnica maksymalna lub późnorozkurczowa (EDD)} - \text{średnica minimalna lub późnoskurczowa (ESD)}}{\text{EDD}}$. Wartość SF poniżej 28% w badaniu M-mode i wartość EF poniżej 63% w badaniu 3D/4D przy braku zmian związanych z wiekiem ciążowym uznaje się za zmienioną⁽²⁷⁻²⁹⁾.

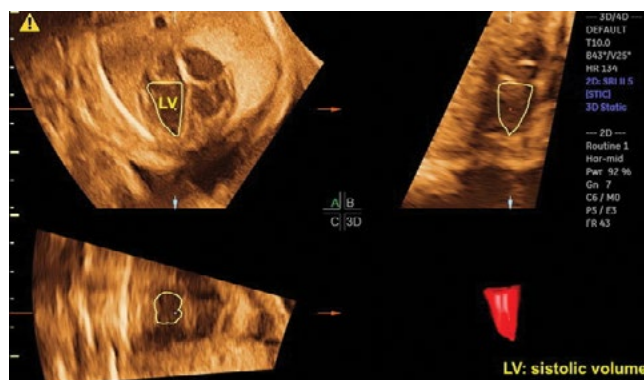
Ocena czynności serca płodu za pomocą ultrasonografii 3D z funkcją 4D-STIC

Od 2003 r., wraz z pojawieniem się oprogramowania 4D-STIC, możliwa jest ocena serca płodu trybach wielopłaszczyznowych i renderowania. Technologia ta, początkowo opisana przez De Vore i wsp., umożliwia pomiar wartości CV u płodu z zastosowaniem sondy objętościowej podczas trwającego 7,5–15,0 sekund skanowania umożliwiającego akwizycję 150 obrazów 2D na sekundę. Rekonstrukcja tych obrazów w czasowo-skorelowanych trybach 3D (4D-STIC) umożliwia symulację ruchów serca (*cinellop*). Ponadto technika ta umożliwia analizę anatomii i czynności serca płodu bez obecności pacjenta (*off-line*) oraz przekazanie danych dotyczących CV do ośrodków referencyjnych III stopnia za pośrednictwem Internetu (tele-STIC)⁽³⁰⁻³⁴⁾.

Ilościowe określenie objętości komór podczas rozkurczu i skurczu za pomocą trybów 4D-STIC i VOCAL umożliwia obliczenie ESV, CO i EF, ewentualnie w skojarzeniu z innymi technikami, takimi jak tryb inwersji, Color Doppler i Power Doppler^(14,15). Obrazowanie w trybie M-mode 4D-STIC umożliwia również pomiar wartości EF i SF komór serca poprzez określenie ich średnic późnorozkurczowych i późnoskurczowych, a także wykazano jego skuteczność w ocenie płodów z obrzękiem płodowym⁽²²⁾.

Metody

W ramach niniejszej pracy dokonano przeglądu bazy danych PubMed pod kątem artykułów anglojęzycznych opublikowanych w latach 2004–2019. Celem przeglądu było wyszukanie prac dotyczących czynnościowej oceny serca ludzkiego płodu z zastosowaniem ultrasonografii 3D oraz trybów 4D-STIC i VOCAL. Zastosowano następujące terminy MESH: „serce płodu”, „objętości serca” oraz „wspomagana komputerowo analiza objętości narządów”. Zidentyfikowano 18 publikacji. Przeglądem objęto tylko te badania, w których przeprowadzono badanie czynnościowe prawidłowego serca płodu z zastosowaniem ultrasonografii 3D w trybie 4D-STIC i VOCAL. Wyszukano tytuły i streszczenia prac. Cztery spośród 18 badań zostały



Ryc. 5. Pomiar pojemności minutowej lewej komory serca (LV) i frakcji wyrzutowej z zastosowaniem oprogramowania 4D-STIC i VOCAL

Tab. 1. Badania oceniające czynność komór serca – pojemności minutowej, objętości wyrzutowej serca i frakcji wyrzutowej z zastosowaniem ultrasonografii trójwymiarowej w trybie 4D-STIC i VOCAL

Autor	Łączna liczba przypadków	Wiek ciążowy (tygodnie)	Wnioski
Bhat i wsp. (2004) ⁽³⁵⁾	90 (<i>in vitro</i>)	15–37	Dodatnia korelacja między masą komór a wiekiem ciążowym
Rizzo i wsp. (2007) ⁽³³⁾	56 (16 z wewnątrzmacicznym zahamowaniem wzrostu i 40 z grupy kontrolnej)	20–34	Dobra zgodność między wynikami pomiarów objętości komór serca z zastosowaniem 4D-STIC i VOCAL a wynikami badania 2D metodą Dopplera
Messing B i wsp. (2007) ⁽³⁶⁾	100	20–40	Wykazano, że obrazowanie w trybie 4D-STIC charakteryzuje się prostotą, wysoką odtwarzalnością oraz może znaleźć zastosowanie w ocenie czynności serca płodu. Opracowano nomogramy dla objętości komór, objętości wyrzutowej i frakcji wyrzutowej wg wieku ciążowego. Stosunek objętości komór prawej do lewej wyniósł od 0,78 do 5,50 cm ³ , natomiast wartość frakcji wyrzutowej wynosiła od 42,5% do 86,0%
Molina i wsp. (2008) ⁽¹⁴⁾	140	12–34	Objętość wyrzutowa i CO obu komór są dodatnio skorelowane wiekiem ciążowym
Hamill i wsp. (2009) ⁽³⁷⁾	44	19–40	Tryb VOCAL charakteryzuje się dobrą odtwarzalnością w odniesieniu do pomiarów objętości serca
Uittenbogaard i wsp. (2010) ⁽³⁸⁾	76 (<i>in vitro</i>)		Technika 4D-STIC jest wykonalną i dokładną metodą obliczania objętości od 0,30 ml. W warunkach <i>in vitro</i> technika 4D-STIC sprzężona z metodą 3D slice była dokładniejsza, mniej czasochłonna i bardziej rzetelna niż metoda VOCAL
Rizzo i wsp. (2010) ⁽³⁴⁾	45 (15 z wrodzoną wadą serca i 30 zdrowych z grupy kontrolnej)	19–32	Autorzy porównali wartości objętości komór uzyskane z zastosowaniem metody 4D-STIC w połączeniu z techniką VOCAL i funkcją automatycznego obliczania objętości (SonoAVC). Czas niezbędny do zmierzenia objętości z zastosowaniem funkcji SonoAVC był znacznie krótszy niż w przypadku dwóch pozostałych metod. Niemniej jednak wyniki uzyskane z zastosowaniem technik SonoAVC i VOCAL były podobne. Ograniczeniem badania była mała wielkość próby
Simioni i wsp. (2011) ⁽³⁹⁾	265	20–34	Skonstruowano krzywe dla objętości wyrzutowej, CO i frakcji wyrzutowej wg wieku ciążowego. Objętość wyrzutowa i CO były dodatnio skorelowane z wiekiem ciążowym
Hamill i wsp. (2011) ⁽²⁸⁾	184	19–42	Wartości objętości rozkurczowej i skurczowej komory prawej były większe niż w przypadku komory lewej. Wartość frakcji wyrzutowej komory lewej była większa niż w przypadku komory prawej. Wartości objętości wyrzutowej i CO rosły z wiekiem ciążowym, bez istotnych różnic między komorami lewą a prawą
Schoonderwald i wsp. (2012) ⁽⁴⁰⁾	30 (84 pomiarów objętości – 54 wykluczonych pomiarów objętości)	20–34	Porównano objętość serca, objętość wyrzutową i frakcję wyrzutową z zastosowaniem metody Simpsona i techniki VOCAL. Obie metody charakteryzowały się wysoką odtwarzalnością. Mała wielkość próby stanowiła ograniczenie zastosowania techniki 4D-STIC w praktyce klinicznej. *W badaniu stosowano surowe kryteria włączenia dopuszczające jedynie wysokiej jakości obraz objętości serca
Simioni i wsp. (2012) ⁽⁴¹⁾	216 (po 108 płodów danej płci)	20–24	Nie stwierdzono istotnych różnic między płciami w odniesieniu do wartości CO i frakcji wyrzutowej
DeKoninck i wsp. (2012) ⁽⁴²⁾	15	16, 24, oraz 24	Ultrasonografia 3D w połączeniu z funkcją 4D-STIC charakteryzowała się dobrą odtwarzalnością w odniesieniu do pomiarów CO w porównaniu z badaniem USG 2D z opcją dopplerowską. Połączenie 4D-STIC z funkcją SonoAVC i trybem inwersji pozwoliło na uzyskanie wyższej odtwarzalności i powtarzalności w porównaniu z połączeniem 4D-STIC/VOCAL
Hamill i wsp. (2013) ⁽⁴³⁾	34	20–36	Stwierdzono odwrotną korelację między wartością CO komór serca a opornością tętnicy pępowinowej z zastosowaniem 4D-STIC i VOCAL
Rolo i wsp. (2015) ⁽⁴⁴⁾	200	18–33	Połączenie technik 4D-STIC i VOCAL pozwoliło uzyskać wysoką odtwarzalność i znalazło zastosowanie w obliczaniu objętości IVS w odniesieniu do wieku ciążowego
Barros i wsp. (2015) ⁽⁴⁵⁾	371	20–33	Techniki 4D-STIC i VOCAL wykazały wysoką odtwarzalność i znalazły zastosowanie w konstruowaniu krzywych odniesienia dla objętości ścian komór u płodu w związku z wiekiem ciążowym
Araujo Júnior i wsp. (2016) ⁽⁴⁶⁾	170	20–33	Techniki 4D-STIC i VOCAL znalazły zastosowanie w konstruowaniu krzywych odniesienia dla objętości ścian przedsionków u płodu

EF – frakcja wyrzutowa; SV – objętość wyrzutowa; CO – pojemność minutowa; IVS – przegroda międzykomorowa

wykluczone z następujących powodów: zastosowanie trybu VOCAL w ocenie zespołu hipoplazji lewego serca (jedno badanie), zastosowanie trybu VOCAL do pomiaru objętości grasicy (jedno badanie) oraz zastosowanie samego trybu 4D-STIC bez funkcji VOCAL (dwa badania). W następstwie analizy wybranych publikacji i ich piśmiennictwa do przeglądu włączono jeszcze trzy inne prace. Ostatecznie analizą objęto 17 artykułów (Tabela 1).

Pomiar wartości CO i EF z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL

Chociaż tryb 4D-STIC był początkowo stosowany do oceny wad wrodzonych serca w warunkach *in vivo*, Bhat i wsp. jako pierwsi przeprowadzili badanie mające na celu ocenę ilościową masy komór z zastosowaniem trybu 4D-STIC w połączeniu z techniką VOCAL. W celu określenia masy komór w środkowej fazie rozkurczu autorzy badania pomnożyli otrzymane wartości objętości komór przez gęstość mięśnia sercowego (1050 g/cm^3). Badanie to przeprowadzono w warunkach *in vivo* z udziałem 90 prawidłowych płodów między 15. a 37. tygodniem ciąży oraz w warunkach *in vitro* z zastosowaniem baloników symulujących pracę czterech jam serca. Stwierdzono dodatnią korelację między masą obu komór a wiekiem ciążowym⁽³⁵⁾.

Rizzo i wsp. wykazali, że zastosowanie trybów 4D-STIC i VOCAL do pomiaru wartości CV komór pozwala uzyskać dobrą zgodność z pomiarami w badaniu USG 2D w trybie Doppler. Messing i wsp. (2007) uzyskali obrazy serca w środkowej fazie rozkurczu z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL w połączeniu z trybem inwersji w celu ilościowego określenia objętości komór oraz wartości EF płodów bez zmian strukturalnych. Badaniem objęto 100 prawidłowych płodów od 20. do 40. tygodnia ciąży. Wykazano, że średnia wartość ESV wynosi od 0,17 do $1,56 \text{ cm}^3$ w przypadku komory lewej i od 0,26 do $2,29 \text{ cm}^3$ w przypadku komory prawej. Średni stosunek SV komory lewej/komory prawej wynosił 1,4, natomiast wartość EF była na poziomie od 42,5% do 86%⁽³⁶⁾.

Hamill i wsp. ocenili 44 płody od 19. do 40. tygodnia ciąży i stwierdzili dobrą odtwarzalność w ocenie ilościowej CV z zastosowaniem trybu VOCAL, co jest zgodne z wynikami poprzednich badań^(33,36,37). Molina i wsp. dokonali analizy wartości SV i CO u 140 prawidłowych płodów od 12. do 34. tygodnia ciąży z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL. Wartości CV były niższe niż te uzyskane w poprzednich badaniach w trybie 2D i stwierdzono dodatnią korelację między SV i CO a wiekiem ciążowym⁽¹⁴⁾.

Uittenbogaard i wsp. przeprowadzili badanie *in vitro*, w którym w celu symulacji komór serca płodu wykorzystano niewielkie baloniki podłączone do systemu pomp. W badaniu tym uzyskano 76 wartości CV u płodów z zastosowaniem trybu 4D-STIC i trzech technik: 3D slice, VOCAL oraz VOCAL z trybem inwersji. Autorzy ci doszli do wniosku, że tryb 4D-STIC jest wykonalną i dokładną metodą do obliczenia objętości przewyższających 0,30 ml. Technika 3D slice była dokładniejsza, mniej czasochłonna

i bardziej rzetelna w warunkach *in vitro* niż dwie pozostałe metody⁽³⁸⁾.

Rizzo i wsp. porównali wartości objętości komór u 15 płodów z wrodzonymi wadami serca i 30 płodów bez tych wad. Wartości CV uzyskano z zastosowaniem trybu 4D-STIC w fazie późnoskurczowej i późnorozkurczowej oraz określono ilościowo przy użyciu trybu VOCAL i funkcji automatycznego pomiaru objętości (*sonography-based automated volume count*, SonoAVC). Chociaż czas potrzebny do pomiaru SV komór był znacznie krótszy przy użyciu funkcji SonoAVC, wyniki uzyskane z zastosowaniem zarówno trybu VOCAL, jak i SonoAVC były podobne. Określenie wartości CV było możliwe z dobrą powtarzalnością i odtwarzalnością nawet w przypadku płodów z wrodzonymi wadami serca, jednak niewielka liczba przypadków stanowiła ograniczenie badania⁽³⁴⁾.

Messing i wsp. wykorzystali 4D-STIC i VOCAL oraz tryb inwersji u 106 płodów od 21. do 38. tygodnia ciąży i dokonali oznaczenia ilościowego masy ścian komór z dobrą odtwarzalnością, przy czym parametr ten ulegał zmianie w przypadku płodów z wrodzoną wadą serca. Autorzy doszli do wniosku, że technika ta może odgrywać istotną rolę w ocenie czynności serca w przypadkach zmian anatomicznych i strukturalnych⁽³⁶⁾. Simioni i wsp. skonstruowali krzywe odniesienia dla parametrów SV, CO i EF dla 265 płodów między 20. a 34. tygodniem ciąży; SV i CO wzrastały z wiekiem ciążowym, podczas gdy wartość EF utrzymywała się na stałym poziomie (około 0,63)⁽³⁹⁾. Hamill i wsp. porównali wartości objętości komór lewej i prawej z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL i doszli do wniosku, że chociaż objętość komory prawej była większa niż komory lewej, to jednak wartość EF komory lewej była wyższa od wartości EF komory prawej, więc nie stwierdzono istotnych różnic w wartościach CO i SV⁽²⁸⁾.

Schoonderwaldt i wsp. zmierzili wartość CV u 84 płodów między 20. a 34. miesiącem ciąży z zastosowaniem trybu 4D-STIC oraz wykorzystaniem metody Simpsona i trybu VOCAL w celu określenia wartości EDV, ESV, EV i EF komory lewej. Autorzy porównali te dwie techniki i stwierdzili, że obie cechują się dobrą odtwarzalnością. Jednak 54 spośród 84 pomiarów CV wykluczono z uwagi na niską jakość obrazu. W rezultacie autorzy podkreślili, że niewielka ilość obrazów o dobrej jakości stanowi ograniczenie stosowania trybu 4D-STIC w praktyce klinicznej. Ponadto autorzy wyjaśnili, że mała liczba próbek wynikała z surowości przyjętych kryteriów, które dopuszczały jedynie pomiary CV, w których granice wsierdzia były wyraźnie zaznaczone i nie stwierdzono obecności artefaktów cieniowania akustycznego w żadnej z wszystkich sześciu płaszczyzn⁽⁴⁰⁾.

Simioni i wsp. przeprowadzili badanie przekrojowe z udziałem 216 płodów (108 płci żeńskiej i 108 płci męskiej) między 20. i 24. tygodniem ciąży z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL. Wartości CO i EF obliczono dla każdej komory z zastosowaniem wzorów dla CO, natomiast EF określano na podstawie pomiarów objętości. Autorzy odnotowali istotne różnice w wartościach CO i EF

w odniesieniu do płci. Średnie wartości całkowitej pojemności minutowej sera (CO), CO komory lewej, CO komory prawej, EF komory prawej, EF komory lewej u płodów płci męskiej wyniosły odpowiednio 240,07 ml/min, 122,67 ml/min, 123,40 ml/min, 72,84%, 67,22%, a u żeńskiej 270,56 ml/min, 139,22 ml/min, 131,34 ml/min, 70,73% i 64,76%⁽⁴¹⁾.

DeKoninck i wsp. wykazali, że badanie USG 3D w trybie 4D-STIC stosowane do obliczenia wartości CO charakteryzowało się odtwarzalnością zbliżoną do występującej w przypadku badania USG 2D z opcją dopplerowską. W celu określenia wartości CO na podstawie badania USG 3D w trybie 4D-STIC zastosowano trzy różne techniki: VOCAL, SonoAVC oraz tryb inwersji. Funkcja SonoAVC i tryb inwersji charakteryzowały się większą powtarzalnością i odtwarzalnością. Wartości całkowitej CO w przeliczeniu na masę (ml/kg/min) uzyskane z zastosowaniem trybu VOCAL, SonoAVC i inwersji wyniosły odpowiednio 177,2, 160,7 oraz 174,0 ml/kg/min (dla wszystkich $p < 0,0001$)⁽⁴²⁾. Jednak wielkość próby w badaniu była mała ($n = 15$, Tab. 1).

Hamill i wsp. określili związek między impedancją naczyń pępowinowych a CO z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL. Badaniem objęto 34 płody między 20. a 36. tygodniem ciąży i stwierdzono, że wartości objętości komór były niższe u płodów ze zwiększoną opornością tętnicy pępowinowej w porównaniu z prawidłowymi płodami ze stosunkowo większym spadkiem objętości komory lewej⁽⁴³⁾.

Rolo i wsp. pomierzyli objętość przegrody międzykomorowej u 200 płodów między 18. a 33. tygodniem ciąży. Średnie wartości przegrody międzykomorowej wyniosły od $0,13 \pm 0,03 \text{ cm}^3$ do $1,33 \pm 0,37 \text{ cm}^3$ ⁽⁴⁴⁾. Barros i wsp. obliczyli wartości objętości ścian serca u 371 płodów między 20. a 33. tygodniem ciąży i wykreślili krzywe odniesienia przy zastosowaniu trybów 4D-STIC i VOCAL⁽⁴⁵⁾. Autorzy

obu badań wykazali, że technika ta charakteryzuje się dobrą powtarzalnością i odtwarzalnością.

Araujo Júnior i wsp. obliczyli wartości objętości ścian przedsionków u 170 płodów między 20. a 33. tygodniem i 6. dniem ciąży z zastosowaniem trybów 4D-STIC i VOCAL. Średnia objętość przedsionka prawego wynosiła od $0,45 \pm 0,16 \text{ cm}^3$ do $2,17 \pm 0,62 \text{ cm}^3$, natomiast wartości od $0,54 \pm 0,21 \text{ cm}^3$ do $2,17 \pm 0,3 \text{ cm}^3$ to średnia objętość przedsionka lewego⁽⁴⁶⁾.

Wnioski

Od roku 2004 przeprowadzono kilka badań z zastosowaniem trybów obrazowania 4D-STIC i VOCAL, w których wykazano dodatnią korelację między wartościami objętości komór i przedsionków a wiekiem ciążowym. Podobnie wartość CO obliczona z zastosowaniem tych metod dodatkowo korelowała z wiekiem ciążowym, przy czym objętość komory prawej była większa niż objętość komory lewej. Z analizowanych badań wynika, że techniki 4D-STIC i VOCAL charakteryzują się dobrą odtwarzalnością w odniesieniu do pomiarów pojemności jam serca oraz proponują krzywe odniesienia dla tych parametrów z uwzględnieniem wieku ciążowego. Zatem obrazowanie w trybie 4D-STIC i VOCAL odgrywa kluczową rolę w ocenie parametrów czynności serca, w tym objętości późno-skurczowej, CO i EF.

Konflikt interesów

Autorzy nie zgłaszają żadnych finansowych ani osobistych powiązań z innymi osobami lub organizacjami, które mogłyby negatywnie wpłynąć na treść publikacji oraz rościć sobie prawo do tej publikacji.

Piśmiennictwo

1. CDC – Centers for Disease and Prevention. Congenital Heart Defects [cited 2019 May 12]. Available from: <http://www.cdc.gov/heartdefects/>.
2. Hoffman JI, Kaplan S: The incidence of congenital heart disease. *J Am Coll Cardiol* 2002; 39: 1890–1900.
3. Nelle M, Raio L, Pavlovic M, Carrel T, Surbek D, Meyer-Wittkopf M: Prenatal diagnosis and treatment planning of congenital heart defects-possibilities and limits. *World J Pediatr* 2009; 5: 18–22.
4. Eurocat – European Surveillance of congenital anomalies [cited 2019 May 12]. Available from: <http://www.eurocat-network.eu/statisticalmonitoring-2009>.
5. Allan L: Impact of prenatal diagnosis on the paediatric management of heart defects. *Fetal Mater Med Rev* 2004; 15: 327–341.
6. Donofrio MT, Skurow-Todd K, Berger JT, McCarter R, Fulgum A, Krishnan A *et al.*: Risk-stratified postnatal care of newborns with congenital heart disease determined by fetal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2015; 28: 1339–1349.
7. Słodki M, Respondek-Liberska M, Pruetz JD, Donofrio MT: Fetal cardiology: changing the definition of critical heart disease in the newborn. *J Perinatol* 2016; 36: 575–580.
8. Van Mieghem T, Hodges R, Jaeggi E, Ryan G: Functional echocardiography in the fetus with non-cardiac disease. *Prenat Diagn* 2014; 34: 23–32.
9. Bravo-Valenzuela NJ, Peixoto AB, Nardoza LM, Souza AS, Araujo Júnior E: Applicability and technical aspects of two-dimensional ultrasonography for assessment of fetal heart function. *Med Ultrason* 2017; 19: 94–101.
10. Crispi F, Gratacós E: Fetal cardiac function: technical considerations and potential research and clinical applications. *Fetal Diagn Ther* 2012; 32: 47–64.
11. Gardiner HM: Foetal cardiac function: assessing new technologies. *Cardiol Young* 2014; 24 Suppl 2: 26–35.
12. Barker PC, Houle H, Li JS, Miller S, Herlong JR, Camitta MG: Global longitudinal cardiac strain and strain rate for assessment of fetal cardiac function: novel experience with velocity vector imaging. *Echocardiography* 2009; 26: 28–36.
13. Miranda JO, Cerqueira RJ, Ramalho C, Areias JC, Henriques-Coelho T: Fetal cardiac function in maternal diabetes: a conventional and speckle-tracking echocardiographic study. *J Am Soc Echocardiogr* 2018; 31: 333–341.
14. Molina FS, Faro C, Sotiriadis A, Dagklis T, Nicolaidis KH: Heart stroke volume and cardiac output by four-dimensional ultrasound in normal fetuses. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2008; 32: 181–187.
15. Simioni C, Nardoza LM, Araujo Júnior E *et al.*: Fetal cardiac function assessed by spatio-temporal image correlation. *Arch Gynecol Obstet* 2011; 284: 253–260.

16. Tei C, Ling LH, Hodge DO, Bailey KR, Oh JK, Rodeheffer RJ *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: 357–366.
17. Figueroa H, Silva MC, Kottmann C, Viguera S, Valenzuela I, Hernandez-Andrade E *et al.*: Fetal evaluation of the modified-myocardial performance index in pregnancies complicated by diabetes. *Prenat Diagn* 2012; 32: 943–948.
18. Bhorat IE, Bagratee JS, Pillay M, Reddy T: Use of the myocardial performance index as a prognostic indicator of adverse fetal outcome in poorly controlled gestational diabetic pregnancies. *Prenat Diagn* 2014; 34: 1301–1306.
19. Peixoto AB, Bravo-Valenzuela NJ, Martins WP, Mattar R, Moron AF, Araujo Júnior E: Reference ranges for the left ventricle modified myocardial performance index, respective time periods, and atrioventricular peak velocities between 20 and 36 + 6 weeks of gestation. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2019; 2: 1–10. Doi: 10.1080/14767058.2019.1609933.
20. Cruz-Lemini M, Crispi F, Valenzuela-Alcaraz B, Figueras F, Sitges M, Gómez O *et al.*: Value of annular M-mode displacement vs tissue Doppler velocities to assess cardiac function in intrauterine growth restriction. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2013; 42: 175–181.
21. Messing B, Gilboa Y, Lipschuetz M, Valsky DV, Cohen SM, Yagel S: Fetal tricuspid annular plane systolic excursion (f-TAPSE): evaluation of fetal right heart systolic function with conventional M-mode ultrasound and spatiotemporal image correlation (STIC) M-mode. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2013; 42: 182–188.
22. Tedesco GD, de Souza Bezerra M, Barros FSB, Martins WP, Nardoza LMM, Mattar R *et al.*: Fetal heart function by tricuspid annular plane systolic excursion and ventricular shortening fraction using STIC M-mode: reference ranges and validation. *Am J Perinatol* 2017; 34: 1354–1361.
23. Mielke G, Benda N: Cardiac output and central distribution of blood flow in the human fetus. *Circulation* 2001; 103: 1662–1668.
24. Gagnon C, Bigras JL, Fouron JC, Dallaire F: Reference values and Z scores for pulsed-wave Doppler and M-mode measurements in fetal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2016; 29: 448–460.e9.
25. Mao YK, Zhao BW, Zhou L, Wang B, Chen R, Wang SS: Z-score reference ranges for pulsed-wave Doppler indices of the cardiac outflow tracts in normal fetuses. *Int J Cardiovasc Imaging* 2019; 35: 811–825.
26. Rocha LA, Rolo LC, Nardoza LM, Tonni G, Araujo Júnior E: Z-score reference ranges for fetal heart functional measurements in a large Brazilian pregnant women sample. *Pediatr Cardiol* 2019; 40: 554–562.
27. Huhta JC: Fetal congestive heart failure. *Sem Fetal Neonatal Med* 2005; 10: 542–552.
28. Hamill N, Yeo L, Romero R, Hassan SS, Myers SA, Mittal P *et al.*: Fetal cardiac ventricular volume, cardiac output, and ejection fraction determined with 4-dimensional ultrasound using spatiotemporal image correlation and virtual organ computer-aided analysis. *Am J Obstet Gynecol* 2011; 205: 76.e1–10.
29. Tongsong T, Wanapirak C, Piyamongkol W, Sirichotiyakul S, Tongprasert F, Srisupundit K *et al.*: Fetal ventricular shortening fraction in hydrops fetalis. *Obstet Gynecol* 2011; 117: 84–91.
30. DeVore GR, Falkensammer P, Sklansky MS, Platt LD: Spatio-temporal image correlation (STIC): new technology for evaluation of the fetal heart. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2003; 22: 380–387.
31. Viñals F, Ascenzo R, Naveas R, Huggon I, Giuliano A: Fetal echocardiography at 11 + 0 to 13 + 6 weeks using four-dimensional spatiotemporal image correlation telemedicine via an Internet link: a pilot study. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2008; 31: 633–638.
32. Gonçalves LF, Lee W, Espinoza J, Romero R: Examination of the fetal heart by four-dimensional (4D) ultrasound with spatio-temporal image correlation (STIC). *Ultrasound Obstet Gynecol* 2006; 27: 336–348.
33. Rizzo G, Capponi A, Cavicchioni O, Vendola M, Arduini D: Fetal cardiac stroke volume determination by four-dimensional ultrasound with spatio-temporal image correlation compared with two-dimensional and Doppler ultrasonography. *Prenat Diagn* 2007; 27: 1147–1150.
34. Rizzo G, Capponi A, Pietrolucci ME, Arduini D: Role of sonographic automatic volume calculation in measuring fetal cardiac ventricular volumes using 4-dimensional sonography: comparison with virtual organ computer-aided analysis. *J Ultrasound Med* 2010; 29: 261–270.
35. Bhat AH, Corbett VN, Liu R, Carpenter ND, Liu NW, Wu AM *et al.*: Fetal ventricular mass determination on three-dimensional echocardiography: studies in normal fetuses and validation experiments. *Circulation* 2004; 110: 1054–1060.
36. Messing B, Cohen SM, Valsky DV, Rosenak D, Hochner-Celnikier D, Savchev S *et al.*: Fetal cardiac ventricle volumetry in the second half of gestation assessed by 4D ultrasound using STIC combined with inversion mode. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2007; 30: 142–151.
37. Hamill N, Romero R, Hassan SS, Lee W, Myers SA, Mittal P *et al.*: Repeatability and reproducibility of fetal cardiac ventricular volume calculations using spatiotemporal image correlation and virtual organ computer-aided analysis. *J Ultrasound Med* 2009; 28: 1301–1311.
38. Uittenbogaard LB, Haak MC, Peters RJ, van Couwelaar GM, Van Vugt JM: Validation of volume measurements for fetal echocardiography using four-dimensional ultrasound imaging and spatiotemporal image correlation. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2010; 35: 324–331.
39. Simioni C, Nardoza LM, Araujo Júnior E, Rolo LC, Zamith M, Caetano AC *et al.*: Heart stroke volume, cardiac output, and ejection fraction in 265 normal fetus in the second half of gestation assessed by 4D ultrasound using spatio-temporal image correlation. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2011; 24: 1159–1167.
40. Schoonderwaldt EM, Groenenberg IA, Hop WC, Wladimiroff JW, Steegers EA: Reproducibility of echocardiographic measurements of human fetal left ventricular volumes and ejection fractions using four-dimensional ultrasound with the spatio-temporal image correlation modality. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol* 2012; 160: 22–29.
41. Simioni C, Araujo Júnior E, Martins WP, Rolo LC, Rocha LA, Nardoza LM *et al.*: Fetal cardiac output and ejection fraction by spatio-temporal image correlation (STIC): comparison between male and female fetuses. *Rev Bras Cir Cardiovasc* 2012; 27: 275–282.
42. DeKoninck P, Steenhaut P, Van Mieghem T, Mhallem M, Richter J, Bernard P *et al.*: Comparison of Doppler-based and three-dimensional methods for fetal cardiac output measurement. *Fetal Diagn Ther* 2012; 32: 72–78.
43. Hamill N, Romero R, Hassan S, Lee W, Myers SA, Mittal P *et al.*: The fetal cardiovascular response to increased placental vascular impedance to flow determined with 4-dimensional ultrasound using spatiotemporal image correlation and virtual organ computer-aided analysis. *Am J Obstet Gynecol* 2013; 208: 153.e1–13.
44. Rolo LC, Santana EF, da Silva PH, Costa Fda S, Nardoza LM, Tonni G *et al.*: Fetal cardiac interventricular septum: volume assessment by 3D/4D ultrasound using spatio-temporal image correlation (STIC) and virtual organ computer-aided analysis (VOCAL). *Matern Fetal Neonatal Med* 2015; 28: 1388–1393.
45. Barros FS, Rolo LC, Rocha LA, Martins WP, Nardoza LM, Moron AF *et al.*: Reference ranges for the volumes of fetal cardiac ventricular walls by three-dimensional ultrasound using spatiotemporal image correlation and virtual organ computer-aided analysis and its validation in fetuses with congenital heart diseases. *Prenat Diagn* 2015; 35: 65–73.
46. Araujo Júnior E, Novoa Y, Novoa VA, Barros FS, Rocha LA, Peixoto AB, Martins WP *et al.*: Reference values for the volumes of foetal heart atrial wall by three-dimensional ultrasound using STIC and VOCAL methods between 20w0d and 33w6d weeks of gestation. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2016; 29: 3076–3083.