



# Háromdimenziós echokardiográfia alkalmazhatósága, értéke a veleszületett szívhibák diagnosztikájában

Kádár Krisztina, Apor Asztrid, Merkely Béla

Semmelweis Egyetem, Városmajori Szív- és Érgyógyászati Klinika, Budapest

Levelezési cím: Prof. dr. Kádár Krisztina, e-krisztinakadar@hotmail.com

A háromdimenziós echokardiográfia a veleszületett szívhibák egy új diagnosztikus vizsgálómódszere, amelynek szerepe egyre növekszik a szívűtétek tervezésében, a katéter-intervenciók vezérlésében és a szív funkcionális vizsgálatában. Célunk áttekintést adni a veleszületett szívhibák diagnosztikájában alkalmazható háromdimenziós echokardiográfias módszerekről és azok diagnosztikus jelentőségéről. A legújabb csúcstechnikát a valós idejű (real time) transthoracalis háromdimenziós módszerek jelentik, amellyel szerzett első tapasztalatainkról is beszámolunk.

**Betegek, módszer:** 1 év alatt 32 vizsgálat történt, 26 esetben gyermek- és fiatalokban, 6 esetben magzatban. Életkor: 0,6–28 év átl.: 9,8 év. A vizsgálatokat Philips Epiq G7 gépen, matrix X5-1 transzducerrel végeztük, 6 esetben off line analízis is történt (Q-Lab 10,3).

**Eredmény:** A kétdimenziós echokardiográfia után végzett real-time echokardiográfia 6 betegnél (20%) szolgált fontos, kiegészítő információval. Az aortagyök betegségeiben és az atrioventricularis billentyűk malformációiban kiemelkedő szerepe volt a preoperatív döntéshozatalban, mind a morfológia mind a multiplex regurgitációs jetek megítélésében.

**Következtetések:** A veleszületett szívbetegségek kivizsgálása során a konvencionális kétdimenziós echokardiográfia mellett mindennapi gyakorlatunkban helye van a real time háromdimenziós echokardiográfiának, elsődlegesen a kongenitális aortagyök és atrioventricularis billentyűk betegségeiben.

**Kulcsszavak:** Háromdimenziós echokardiográfia, veleszületett szívhibák, magzati echokardiográfia

## Feasibility and Effectiveness of 3-dimensional Echocardiography in congenital heart diseases

Three-dimensional echocardiography (3DE) is a new diagnostic tool and has increasing role in the management of patients with congenital heart disease (CHD), particularly with pre-surgical planning, guidance of catheter intervention, and functional assessment of the heart. 3DE is increasingly used in children because of good acoustic windows and the non-invasive nature of the technique. Our aim is to provide a review of the optimal application of 3DE in CHD and to assess the benefit of utilizing real time transthoracic echocardiography (RRT-3DE) performed within one year in our Clinic for diagnosing and as a guide for appropriate treatment of different types of congenital heart disease.

**Methods:** 32 patients aged 0.6-28, mean 9.8 years, including 6 fetus were evaluated by both 2D-TTE and RTT-3DE. The 3D real time reconstruction was done with Epiq G7 Equipment (Matrix Probe5-1) using Q Lab 10.3 software. In six pts offline analyses were also performed.

**Results:** RTT-3DE added additional data compared with 2DE in 6 (20%) of pts. RTT- 3DE had a particular value in demonstrating the morphology of aortic root and atrioventricular valves anatomy and the demonstration of the origin and the direction of multiple regurgitation jets, which had clinical value in preoperative decision making.

**Conclusion:** On the basis of our experience RRT-3DE is superior to the traditional 2DE in congenital heart diseases providing incremental value in the assessment of aortic root diseases and atrioventricular congenital valves anomaly. We recommend to integrate RTT-3DE in routine clinical practice in these selected cases.

**Keywords:** three-dimensional echocardiography, congenital heart disease, fetal echocardiography

## Bevezetés

A háromdimenziós echokardiográfia (3DE) jelentős fejlődésen ment keresztül az utóbbi két évtizedben. A technikai fejlődés leginkább azzal jellemezhető, hogy egy nagyméretű, nehézkes módozattól, pl. a lassú rotációjú transzducertől eljutottunk a rekonstrukciós virtuális képalkotásig, azaz valós időben tudjuk a szív anatómiáját/áramlásokat/funkciót vizsgálni. Ezen nagy előrehaladás mellett további innovációs, kutatási fejlesztések vannak folyamatban. A fejlesztések különös szereppel bírnak a veleszületett szívhibák (VSZH) diagnosztikájában elindult alkalmazások terén. Ezek már nemcsak technikai természetűek, de szükségessé váltak olyan gyakorlati standardok kidolgozása – amelyek a 2 dimenziós echokardiográfia (2DE) és felnőtt vonatkozásban már a 3DE-re – is kidolgozásra kerültek (1).

Miért is nagy az elvárás a VSZH-k diagnosztikájában a 3DE alkalmazásával szemben? A 3DE-nek egyik nagy attraktivitása az a képesség, hogy – utólagos szerkesztéssel a valódi anatómiát megtervezve – teljes képet nyerünk („full picture”). Ez teszi lehetővé a 2DE szonográfias módszer keresztmetszeti síkjai által nyert képpel szemben azt, hogy rendkívüli módon tudjuk láttatni a szív anatómiáját a sebész/intervenciós kollégáknak való bemutatás során. Még nagy a kihívás az irányban, hogy a képi orientációt úgy fejlesszék, hogy az atrioventricularis billentyűk és szeptumok „en face” képei úgy legyenek megjeleníthetők, hogy az echos/sebész/intervenciós szakember „közös nyelven” érthesse, lássa az anatómiát („anatómiai” vs. „sebészi” nézet).

## 3DE képalkotási technikai vonatkozásai: a vizsgálati lépések, munkamenet – különös tekintettel a gyermekkori – alkalmazásra

A 3DE transzducer technológiákról és 3DE technikákról jó összefoglalókat találunk az irodalomban, így csak a legfontosabbakat említem (1, 2, 3).

A legújabb transzducer generációk már kisebb méretűek, hasonlóak a 2DE-s transzducerekhez. A kicsiny 3DE TTE gyerek transzducerevel (2-7Mhz) növelni lehetett a tér és időbeli felbontást, amelynek különös jelentősége van kicsiny gyermeknél a magas pulzusszám mellett (4). Hasonlóan törekedtek a TEE-transzducer miniaturizálására, a jelenlegi ajánlás szerint 25-30 kg-os testsúlytól használhatóak (5).

A vizsgálat elkezdésekor alapvető, hogy olyan képminőséget kell nyernünk a 3 DE transzducerevel, mintha azt 2DE-s fejjel végeznénk. Néhány transzducerevel ez a követelmény már megközelíthető, de nem általános, így következésképpen egy kombinált 2DE/3DE transzducer nem rutinszerűen alkalmazott kisgyerekekben. A gyári ajánlásnak megfelelő kisebb testsúly esetén, ha

pl. intraoperatív vizsgálat kell, ehhez az epikardiális 3D TEE egy jó alternatívát jelent (6). Az adatgyűjtési, fel dolgozási, értékelési technológiákat egy friss expert konszenzus tartalmazza (2).

A 3DE adatgyűjtés alapjai, típusai azonosak a felnőttkoriéval, azzal a megfontolással, hogy a figyelem a jó 2DE képi megjelenítésre kell irányuljon. Ezért csak alapvető technikai sajátosságokat érintünk. Így a gyermekben a magas frekvenciájú transzducer használata javasolt, ugyanis ott nem gond, hogy a penetráció és a szektor jól szűkíthető a vizsgálandó területre.

## Adatgyűjtési módozatok

### 2DE szimultán multiplan módozat

A jelenlegi mátrix transzducerevel 360 fokos rotáció érhető el, a képsíkokat elektronikusan irányított, elevációs és oldali síkokban nyerjük (a „crop plane” itt használható). Ezen alkalmazás jó az ASD-k, VSD-k méretének, alakjának, peremeinek vizsgálatára, az AVB-k morfológiájának, regurgitációjának, kiáramlási pályák billentyűinek vizsgálatára.

### Real-time, valós idejű 3DE módozat (RT-3DE)

A megjelenítés piramis volumen alakzatban van, amelyvel egy mozgó nem kooperáló gyermeknél is minimalizálni lehet a stitch artefaktokat. A vizsgált terület („region of interest”) növelése csökkenti a frame rate-t (FR), míg a fókuszált terület csökkentése előnytelen komplex szívhibában, ahol is a struktúrák egymáshoz való viszonyának megjelenítése a fontos.

### EKG kapuzott multi-beat adatgyűjtés

Gyerek 3DE-ben az újabb technológiákban gyakran alkalmazott módszer, mivel itt nagyobb területet is megfelelő felbontással vizsgálhatunk, bár az elektronikusan beszűkített volumen (2-6 szívütésre) miatt légzési, mozgási artefaktok gyakoribbak gyermeknél. Van „single beat” volumengyűjtési módozat is, de az időbeli felbontás nem megfelelő magas pulzusú csecsemőben, kivéve, ha a vizsgálandó terület kicsiny, relatíve statikus, így megengedi a szektorszűkítést.

### 3D Color

Bármelyik fenti modalitás mellett alkalmazható.

A relatíve statikus struktúrák (ASD, VSD) értékelhetőek „live 3DE” echóval, vagy 3D Zoom móddal, mivel itt megfelelő a temporális felbontás.

A 3DE megjelenítési módozatok azonosak a felnőttkével.

1. volumenszerű (rendering-bemutatás),
2. surface (felszíneket mutatja),
3. Multiplanar Reformatted Image (MPR) (a 3DE adatbázisból 3 síkkal történik a „vágás”).

### Összefoglaló ajánlás gyermekkorban

A 3DE módszert a beteghez egyénileg választjuk, kicsiny méretű, magas frekvenciájú transzducert hasz-

náljunk. 3DE TEE-t csak akkor vegyünk igénybe, ha a gyerek mérete megengedi, és ha 3DTTE-vel a képkalkítás nem megfelelő a terápia megtervezéséhez.

### Képi megjelenítés és orientáció

A VSZH-kban a standard 2DE TTE és TEE síkok ismeretek és a felnőtt 3DE-re is kidolgozottak (1), de specifikusan VSZH-ra vonatkozó adat nincs. Ez fontos, hiszen VSZH-ban a szívpozíció/situs/anatómiai kapcsolatok nagyon eltérőek a szerzett szívbetegségekkel szemben. 3DE-vel „en face” nézet képezhető az AVB-re és szeptumokra vonatkozóan, amelyet Z-síkban majd rotálni lehet bármilyen irányban. Fontos, hogy anatómiai irányból vizsgáljuk a VSZH-s gyermekeket, amelynek az is jelentősége ad, hogy így összevethető az MRI- és CT-vizsgálatokkal.

### Egyes anatómiai struktúrák megjelenítésére ajánlott nézetek, orientációk

#### Pitvari sövény

1. jobb és bal oldal felől is vizsgálható,
2. jobb oldalról látható fontos struktúrák/határok-VCS, VCI, TB, Ao asc., Fossa ovale, sinus coronarius.

#### Kamrai sövény

1. jobb és bal oldal felől vizsgálható,
2. konvencionálisan a szeptumdefektusok elnevezését a JK-i szabad fal „eltávolítása” után ajánljuk beosztani, ezért ezen anatómiai orientációval a diaphragma alul, a JK-i apex jobb oldalon, a kiáramlási pálya pedig felül van.

#### AV-billentyűk

„En face” nézetben vizsgálandók. Mivel VSZH-k-ban lehet, hogy a bal AV-billentyű nem kétvitorlás és a jobb oldali nem háromvitorlás. Így függetlenül a billentyű morfológiától, a pitvari/kamrai sövény nézetében a superior bridging vitorla a kép felső részén, az alsó alul lesz.

#### Aorta és arteria pulmonalis billentyűk

A standard konvencióknak megfelelően történik az elnevezésük, így az alkalmazott orientáció is megegyezik a nem strukturális szívhibákban ajánlottakkal.

### A szív kóros komplex anatómiai kapcsolatai

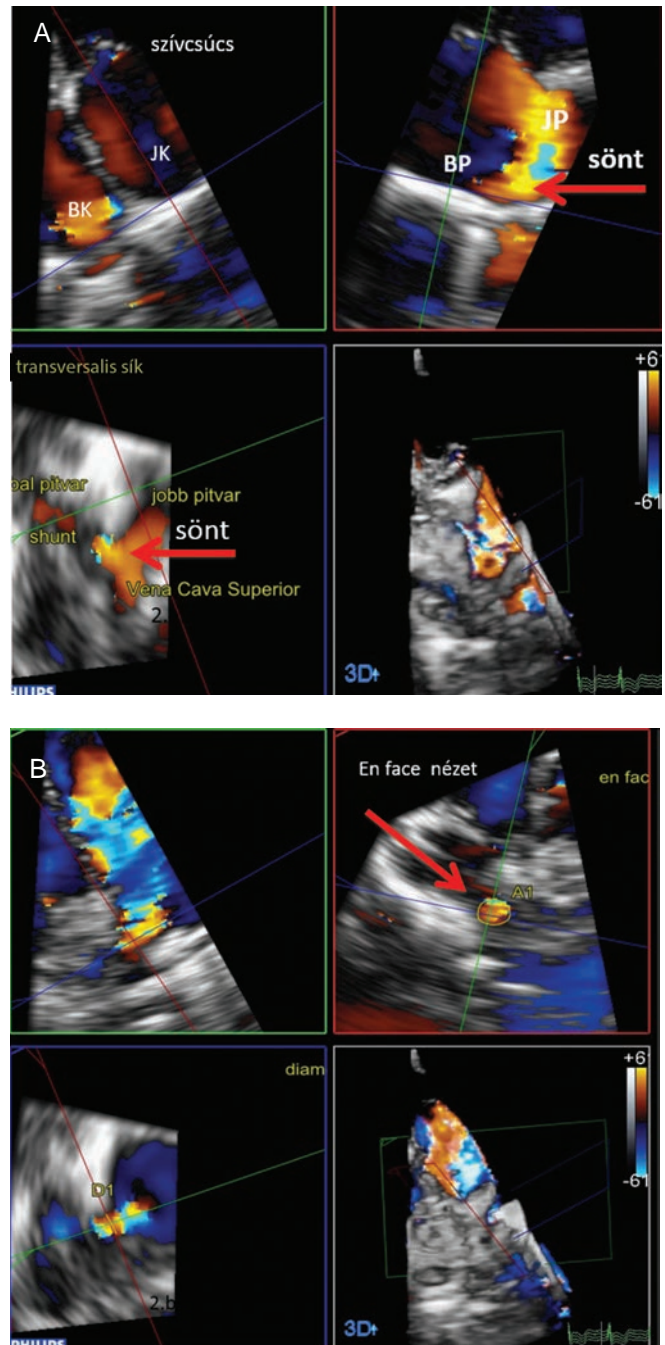
Az anatómiai nézet alkalmazása különösen fontos, hiszen az aktuális térbeli elhelyezkedést kell láttatnunk a sebészi megoldás tervezéséhez.

#### „Sebészeti” nézetek

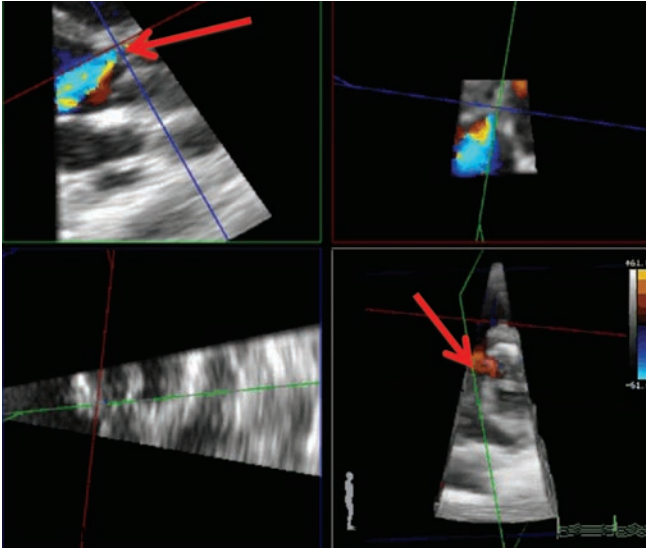
A 3DE olyan nézeteit jelenti, ahogy az operáló sebész a műtétnél látja a szívet a beteg fekvő helyzetében. Ezzel

szemben az anatómiai nézetben a beteg álló helyzetben van. Innen nyerve a szeptumok „en face” képét 90 fokkal rotálni kell, hogy a sebészeti nézetet nyerjük. Az ajánlások szerint előnyben kell részesíteni az anatómiai nézetet.

Saját vizsgálataink során az egy év alatt végzett RTT-3DE alapján felmértük e technika diagnosztikus értékét gyakorlatunkban. A vizsgálatokat Philips Epiq G7 gépen, matrix X5-1 transzducerrel végeztük, 6 esetben off line

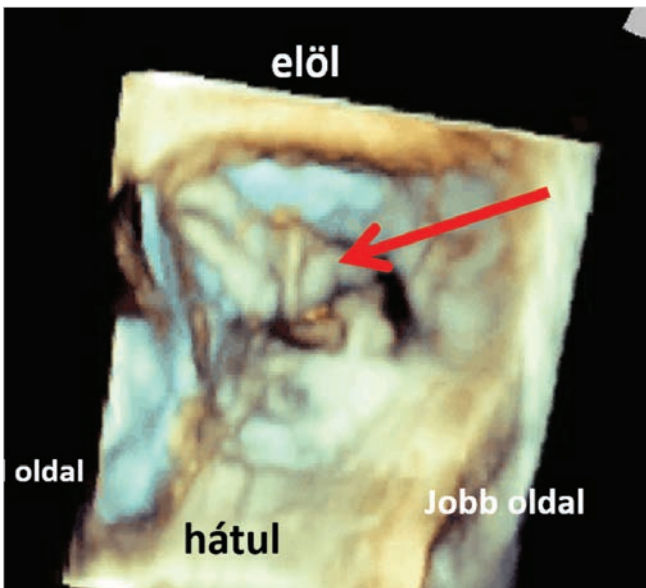


1. ÁBRA. 3D-RTT Sinus venosus felső pitvari szeptumdefektusban. A: Az off line rekonstrukció lépései. A sönt a felső képeken, míg az alsókon „enface nézetben” a defektus látható a cava superiorhoz való viszonylatában. B: A sinus venosus defektus alakja mérete, areája mérhető



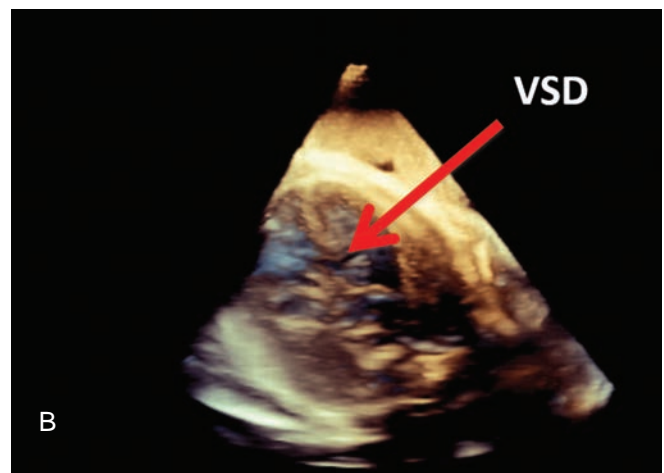
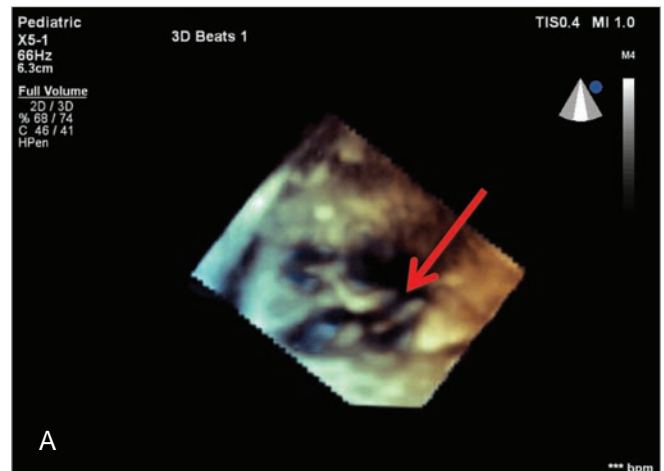
**2. ÁBRA.** 3DE-RTT Color Doppler off line analízise speciális aortagyök-betegségben. Aorta bal kamrai tunelben pontosan látható az excentrikus jet

analízis is történt (Q-Lab 10,3). 32 vizsgálat történt, 26 esetben gyermek- és fiatalokban, 6 esetben magzatban. Életkor: 0,6–28 év, átlag 9,8 év. Diagnózisok: pitvari±kamrai szeptumdefektus (n=4), atrioventricularis szeptumdefektus (n=1), jobb kamrai kiáramlás és pulmonalis artériaszűkületek (n=3), univentricularis szív (n=2), atrioventricularis billentyű-malformáció (n=2). Aortagyök betegségei: szubaortikus szűkületek, aorta bal kamrai tunel, aortabillentyű-malformáció (n=4), egyéb (n=10). A 2DE után végzett RTT-3DE 6 betegnél (20%) szolgált fontos, kiegészítő információval. A ritka sinus venosus defektus, annak is felső típusú formájában 2DE-vel nem lehetett pontosan vizualizálni a defektust. A 3D- RTT-vel



**3. ÁBRA.** 3D-TTE Zoom módozat. Kongenitális tricuspidalis billentyűanomália – dysplastikus anterior vitorla szerkezet. Jobb pitvari „en face” sebészi nézet

a sönt helye, a defektus mérete jól lokalizálható volt, így további invazív megerősítés nem volt szükséges a műtéti indikáció felállításához (1. A–B ábra). Az aortagyök VSZH-i közül a subaortikus régió anatómiájának és egy speciális vitiumnak az aorta bal kamrai tunelben a jet megítélésben volt kiemelkedő a 3D RTT. Itt is a műtéti terv felállításában volt segítségre a vizsgálat (2. ábra). Az AVB-k morfológiájának megítélésében egy ritka tricuspidalis billentyű (TB) dysplasiás esetünkben a TB vitorlái közül a vitorlák érintettségének a vizsgálatában (szeptális vs. anterior vitorla) volt segítségünk (3. ábra). Magzati vizsgálataink közül jól volt vizsgálható a fossa ovale anatómiája, illetve egy subaortikus VSD-s esetben a bal kamrai (BK) kiáramlást szűkítő infundibularis sövény („malalignent VSD”) (4. A és B ábra). Összefoglalva: vizsgálatainkban az aortagyök betegségeiben, az AVB-k malformációjával járó esetekben, és ritka típusú ASD-ben volt kiemelkedő szerepe a 3DRTT-nek a preoperatív döntéshozatalban, mind a morfológia, mind a regurgitációs jetek megítélésében. Az offline analízisek megerősítették, de nem változtatták meg a real-time vizsgálati eredményt.



**4. ÁBRA.** Magzati négyüregi szív. Narrow angle módozat. A: foramen ovale anatómia látható B: szubaortikus malalignent. VSD – szubaortikus szűkület enyhe formájával

## Megbeszélés

A VSZH-k széles skálájában történtek a 3DE alkalmazásáról irodalmi beszámolók, főleg AV-billentyűk, pitvari-, kamrai sövények és kiáramlási pályákról. Bár a technika használata egyre bővül, különböző centrumokban az alkalmazás gyakorisága igen nagy variabilitást mutat. Az ok talán az, hogy nem ismert evidencia arra nézve, hogy kapunk-e hozzáadott információt, ha összehasonlítjuk a 3DE eredményt a 2DE-vel, vagy más képalkotással. Nincsenek randomizált vizsgálatok arra nézve, hogy egyes beavatkozások (sebészi, katéter-intervenció) sikerét hogyan befolyásolja, illetve milyen a morbiditásra, mortalitásra való kihatása, ha használjuk a 3DE-t. Az azonban jogos igény, amennyiben van hozzáférhetőségünk a technikához, hogy használjuk, tapasztalatot szerezzünk és próbáljunk kiegészítő információkat nyerni VSZH-s esetekben. Ezért is kezdtük el klinikánkon a 3DE vizsgálatokat speciális VSZH-kban, és számoltunk be előadásban első eredményeinkről. Magzati kardiológiában az első vizsgálatunkról – amely még csak narrow szegment technikára volt képes – 2009-ben számoltunk be (8, 9). Az új amerikai ajánlásban összegyűjtöttek olyan irodalmi adatokat, amelyekben közöltek olyan adatokat arra nézve, hogy melyek azok a morfológiai eltérések, amelyekben magas/közepes/alacsony arányban várható diagnosztikus információ a 3DE-től. Két csoportra osztva a diagnózisokat – ahol is normálisak, vagy kórosak az egyes szívstruktúrák kapcsolatai (connexiok) – a következő megállapításokat tették (2).

Normális pitvar – kamrai – nagyér-kapcsolatú VSZH-k közül magas arányban segít a 3DE (így ajánlott az elvégzésük):

1. Komplex vagy műtét utáni reziduális pitvari defektsók.
2. Tricuspidalis billentyű-anomáliák.
3. Kóros mitralis anatómia.
4. Komplex VSD-k.
5. BK-i kiáramlási obstrukciók (Ao-billentyű és SubAorta-stenosis).

Kóros kapcsolatú VSZH-ban az alábbiakban érdemes a vizsgálatot elvégezni, mivel magas arányban várható többletinformáció:

1. Atrioventricularis szeptumdefektus (AVSD).
2. Discordans atrioventricularis connexio (C-TGA).
3. Komplex nagyér-transzpozíció (TGA).
4. Truncus arteriosus communis.
5. Kettős kiáramlású jobb kamra.
6. Fallot-tetralógia (specifikus eseteiben a VSD, kiáramlási pálya anatómiára, posztoperatív eseteiben JK-i volumen, funkció megítélésére).

Fontos még megemlíteni a 3DE szerepét a struktúra vizsgálata mellett a kamrai volumenek, funkciók vizsgálatában.

A VSZH-k vizsgálatában nagy a kihívás a BK és JK-i funkciók értékelésében, főleg ott, ahol kóros a kamrák

pozíciója, kórosak a pitvar-kamrai és nagyér-kapcsolatok, szeptális defektusokban a nonkontraktilis folt beültetés utáni esetekben és kóros telődési viszonyokban. Ezen túl is a VSZH-kban sokszor a kamrai geometria nagyon eltérő a normális anatómiájú esetektől – amelyekre a szoftvereket tervezik –, úgyhogy azokat az algoritmusokat nem lehet közvetlenül adaptálni. Több validációs tanulmány ismeretes már felnőttekben, de már gyerek populációban is a BK-i volumenek 3DE és MRI összehasonlításában, amellyel jó összefüggést találtak (10, 11). JK vonatkozásban a komplex geometria miatt, és ez különösen igaz VSZH-k egyes eseteire (pl. egykamrás keringésre vonatkozóan), ahol is az ígéretes kezdeti eredmények óta is problematikusak a mérések (12). A 2D strain (speckle tracking) limitált VSZH-ban – mivel a miokardiális rostok orientációja igen sajátos VSZH-ban – így annak limitációját 3D strain alkalmazása megoldotta. Megjelentek a rotációs és torzióra vonatkozó vizsgálatok gyerek és adolescens populációban is, bár a klinikai gyakorlatba való átültetés még folyamatban van. Erre vonatkozóan hazai munkában előljárunk (13, 14, 15, 16). Annyi tehát már megállapítható, hogy:

1. a 3DE-vel mért kamrai volumenek és EF-ek megbízhatóan ismételtelhetők,
2. a 3DE-vel mért volumenek alacsonyabbak az MRI-vel mértekkel, így a két vizsgálat adatai nem helyettesíthetők,
3. a klinikai gyakorlatba a csecsemő és gyermekkori validált adatok hiányában még nem bevonhatóak.

A kongenitálisan kóros kamrai struktúrákra a normál anatómiájú kamrákra vonatkoztatott szoftverek nem használhatóak (2). Nagy jövő van a még kutatás alatt álló intracavitalis flow mérések fejlődésében VSZH-ban (17).

### Az AVB-k és artériás billentyűk értékelése VSZH-ban 3DE-vel

Amennyire a 3DE információt szolgáltat az AVB méretéről, mozgásáról, morfológiájáról, úgy a colort tudjuk használni a regurgitációs terület mértékének, alakjának és a regurgitációs orificiumok számának megítélésére. Ennek ellenére a regurgitáció még mindig csak kvalitatíve ítéltető meg 3DE-vel (18).

Adatunk még nincs a 3DE hatásának a klinikai lefolyásra való megítélésére, de a sebészeti technikára való alkalmasság lemérésére igen (19). Az AVB-k regurgitációjának gyermekpopulációban való értékelése még várat magára, mivel a pontosság és reprodukálhatóság nem megbízható. Ennek okai VSZH-ban a kóros morfológiájú billentyűk okozta komplex regurgitációs jet morfológia, elliptikus, vagy lineáris regurgitációs orificium, többszörös jet-ek miatt az effektív regurgitációs orificium area nem bizonyult értékesnek a kvalitatív értékelésben (20). A VSZH-ban a 3DE-vel való kvantifikálás a vena contracta areával nagyon biztatónak tűnik, mert relatíve egyszerű mérni és már benne van a leg-

több 3DE navigációs szoftverben, de validált gyermek adat még nincs. Az ajánlás szerint az AV-billentyűk vizsgálata során 3DE alkalmazandó:

1. az AVB-k vizualizálására,
2. a regurgitációs jetek lokalizálására, számának méretének meghatározására.

Az effektív regurgitációs area orificiumot (EROA) gyermek- és fiatalokban még validálni kell, mielőtt a műtéti indikációban használnánk.

### Artériás billentyű vonatkozásában a 3DE ajánlott

Az aorta és arteria pulmonalis billentyű morfológiai megítélésére, az annulus, aortagyök, és az effektív orificium area mérésére. A 3D color mérést még validálni kell az artériás billentyűk regurgitációjának kvantifikálására.

### Milyen új irányzatok várhatók a jövőben a 3DE-ben a VSZH-k vonatkozásában?

Várható a transzducerek tervezésében, miniatürizálásában további fejlesztés, a 3DE print technikában, a holográfiás megjelenítésben, és a képalkotás minél „felhasználóbarát” fejlesztésében. Nagy az elvárás főleg JK-i vonatkozásban kamrai volumenek 3DE deformációs analízisében, az adatgyűjtésben és a betegségek kimenetelére való hatás leírásában. Fontos még a technika tanítása, a tréning, az indikációk ismeretének oktatása és az arról való ismeretek bővítése, hogy milyen additív értéke van ezen új technikának a VSZH-k sebészeti, intervenciós technikáinak tervezésében, irányításában. Ehhez saját kezdeti tapasztalataink is hozzájárulhatnak.

### Irodalom

1. Lang RM, Badano LP, Tsang W, et al. EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2012; 13: 1–46. doi: 10.1093/ehjci/je316
2. Hung J, Lang R, Flachskampf F, et al. 3D echocardiography: a review of the current status and future directions. *J Am Soc Echocardiogr* 2007; 20: 213–33. doi: 10.1016/j.echo.2007.01.010
3. Dekker DL, Piziali RL, Dong E. A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* 1974; 7: 544–53. doi: 10.1016/0010-4809(74)90031-7
4. Acar P, Abadir S, Paranon S, et al. Live 3D echocardiography with the pediatric matrix probe. *Echocardiography* 2007; 24: 750–5. doi: 10.1111/j.1540-8175.2007.00485.x
5. Kutty S, Smallhorn JF. Evaluation of atrioventricular septal defects by three-dimensional echocardiography: benefits of navigating the third dimension. *J Am Soc Echocardiogr* 2012; 25: 932–44. doi: 10.1016/j.echo.2012.06.002
6. Rawlins DB, Austin C, Simpson JM. Live three-dimensional pediatric intraoperative epicardial echocardiography as a guide to surgical repair of atrioventricular valves. *Cardiol Young* 2006; 16: 34–9.

doi: 10.1017/S1047951105002064

7. Simpson J, Lopez L, Acar P, et al. Three-dimensional Echocardiography in Congenital Heart Disease: An Expert Consensus Document from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2017; 30: 1–27. doi: 10.1093/ehjci/jew172
8. Kádár K, Hajdú J, Török O, et al. Új vizsgálómódszer a 4-dimenziós echokardiográfia szerepe a magzati kardiológiában. *Cardiol Hung* 2009; Suppl A: 12.
9. Kádár K, Apor A, Kovács A, et al. 3 dimenziós transthoracalis echokardiográfia alkalmazhatósága, értéke a kongenitalis vitiumok diagnosztikájában. *Cardiol Hung* 2016; 46: F54
10. Bu L, Munns S, Zhang H, et al. Rapid full volume data acquisition by real-time 3-dimensional echocardiography for assessment of left ventricular indexes in children: a validation study compared with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; 18: 299–305. doi: 10.1016/j.echo.2004.11.002
11. Lu X, Xie M, Tomberlin D, et al. How accurately, reproducibly, and efficiently can we measure left ventricular indices using M-mode, 2-dimensional, and 3-dimensional echocardiography in children? *Am Heart J* 2008; 155: 946–53. doi: 10.1016/j.ahj.2007.11.034
12. Lu X, Nadvoretzkiy V, Bu L, et al. Accuracy and reproducibility of real-time three-dimensional echocardiography for assessment of right ventricular volumes and ejection fraction in children. *J Am Soc Echocardiogr* 2008; 21: 84–9.
13. Kaku K, Takeuchi M, Tsang W, et al. Age-related normal range of left ventricular strain and torsion using three-dimensional speckle-tracking echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2014; 27: 55–64. doi: 10.1016/j.echo.2013.10.002
14. Nemes A, Havasi K, Forster TR. “Rigid body rotation” of the left ventricle in hypoplastic right heart syndrome: a case from the three-dimensional speckle-tracking echocardiographic MAGYAR PATH Study. *Cardiol Young* 2015; 25(4): 768–72. doi: 10.1017/S1047951114000973
15. Havasi K, Domsik P, Kalapos A, et al. Left atrial deformation analysis in patients with corrected tetralogy of Fallot by 3D Speckle-Tracking Echocardiography (from the MAGYAR PATH study). *Arq Bras Cardiol* 2017; 108(2): 129–134. doi: 10.5935/abc.20170004
16. Domsik P, Kalapos A, Katona M, et al. Demonstration of right ventricular volume assessment by three-dimensional speckle-tracking echocardiography in an infant with surgically palliated hypoplastic left heart syndrome (a case from the MAGYAR PATH Study) *Echocardiography* 2013; 30(2): E59–60. doi: 10.1111/echo.12046
17. Gomez A, De Vecchi A, Jantsch M, et al. 4D blood flow reconstruction over the entire ventricle from wall motion and blood velocity derived from ultrasound data. *IEEE Trans Med Imaging* 2015; 34: 2298–308. doi: 10.1109/TMI.2015.2428932
18. Takahashi K, Mackie AS, Rebeyka IM, et al. Two-dimensional versus transthoracic real-time three-dimensional echocardiography in the evaluation of the mechanisms and sites of atrioventricular valve regurgitation in a congenital heart disease population. *J Am Soc Echocardiogr* 2010; 23: 726–34. doi: 10.1016/j.echo.2010.04.017
19. Smallhorn JF. Partial zone of apposition closure in atrioventricular septal defect: are papillary muscles the clue. *Ann Thorac Surg* 2013; 96: 637–43. doi: 10.1016/j.athoracsur.2013.03.071
20. Lopez L, Colan SD, Frommelt P, et al. Recommendations for quantification methods during the performance of a pediatric echocardiogram: a report from the Pediatric Measurements Writing Group of the American Society of Echocardiography Pediatric and Congenital Heart Disease Council. *J Am Soc Echocardiogr* 2010; 23: 465–95. doi: 10.1016/j.echo.2010.03.019