

Three-dimensional transesophageal echocardiography in transcatheter aortic valve implantation

Úloha trojrozmernej transezofágovej echokardiografie pri transkatétrovej implantácii aortálnej chlopne

Kurečko M¹, Valočik G¹, Kollárová A²

¹I. kardiologická klinika LF UPJŠ a VÚSCH, a. s., Košice, Slovenská republika

Kurecko M, Valocik G, Kollarova A. **Three-dimensional transesophageal echocardiography in transcatheter aortic valve implantation.** Cardiology Lett. 2022;31(3):184–195

Abstract. *Background:* Transcatheter aortic valve implantation (TAVI) is a minimally invasive and alternative treatment of severe symptomatic aortic stenosis (AoS) indicated in patients with high or intermediate surgical risk. Implantation of incorrect prosthesis size has direct impact on patient's outcome after TAVI. Annular area, perimeter, area derived diameter, perimeter derived diameter (DP) and mean diameter are recommended in order to select the prosthesis size, based on the industry's recommendations for TAVI valves.

Aim: The aim of this study was to demonstrate the influence of three dimensional (3D) transesophageal (TEE) aortic annulus parameters on the selection of the Edwards Sapien 3, balloon-expandable, prosthesis size.

Methods: Forty four consecutive patients with severe symptomatic AoS, who underwent pre-TAVI 3D TEE assessment of the aortic root, were prospectively included in this study. We assigned the appropriate prosthesis size to each parameter of the aortic annulus. Postprocedurally, we compared the agreement between implanted prosthesis size and the prosthesis sizes recommended by the individual parameters.

Results: According to the results of our study, DP appears to be the most robust parameter in TAVI prosthesis size selection. The best agreement with implanted size of TAVI valve was shown for DP (in 68.2% of cases). In addition, the use of DP in prosthesis size selection was not associated with a higher incidence of paravalvular regurgitation ($p = 0.7 - 0.9$) or postprocedural pacemaker implantations ($p = 0.1$).

Conclusion: The study demonstrates that the use of different annular dimensions obtained in the same patient during the same phase of a cardiac cycle can lead to the selection of a different prosthesis size. Fig. 4, Tab. 4, Ref. 25, on-line full text (Free, PDF) www.cardiologyletters.sk

Key words: transcatheter aortic valve implantation – aortic annulus – three-dimensional transesophageal echocardiography – area derived diameter – perimeter derived diameter – aortic stenosis

Kurečko M, Valočik G, Kollárová A. **Úloha trojrozmernej transezofágovej echokardiografie pri transkatétrovej implantácii aortálnej chlopne.** Cardiology Lett. 2022;31(3):184–195

Z ¹I. kardiologickej kliniky LF UPJŠ a VÚSCH, a. s., Košice
a ²Kliniky srdcovej chirurgie LF UPJŠ a VÚSCH, a. s., Košice,
Slovenská republika

Do redakcie došlo dňa 22. apríla 2022; prijaté dňa 30. mája 2022

Adresa pre korešpondenciu: MUDr. Marián Kurečko, PhD.,
I. kardiologická klinika LF UPJŠ VÚSCH, a. s., Ondavská 8, 040 11
Košice, Slovenská republika, e-mail: mudr.kurecko@gmail.com

Abstrakt. Transkatérová implantácia aortálnej chlopne (TAVI) predstavuje miniinvazívnu alternatívu liečby závažnej symptomatickej aortálnej stenózy (AoS), ktorá je indikovaná u pacientov s vysokým alebo stredným rizikom kardiochirurgickej náhrady aortálnej chlopne. Implantácia nesprávnej veľkosti TAVI protézy má priamy vplyv na prognózu pacientov. Výrobcom protéz odporúčajú vyberať veľkosť protézy na podklade plochy, perimetra, diametra odvodeného od plochy, diametra odvodeného od perimetra (DP) a priemerného diametra aortálneho anulu (AoA).

Cieľ: Cieľom našej práce bolo objasniť vplyv jednotlivých parametrov AoA získaných trojrozmernou (3D) transezofágovou echokardiografiou (TEE) na výber veľkosti Edwards Sapien 3, balónom expandovateľnej protézy.

Metódy: Do sledovania sme prospektívne zaradili 44 konšekutívnych pacientov so závažnou symptomatickou AoS indikovaných k TAVI. Pred samotnou realizáciou TAVI všetci podstúpili vyšetrenie prostredníctvom 3D TEE. Ku každému parametru AoA sme priradili prislúchajúcu veľkosť protézy. Po výkone sme porovnali zhodu medzi reálne implantovanou veľkosťou protézy a veľkosťami protéz odporúčanými jednotlivými parametrami.

Výsledky: Podľa výsledkov našej práce je najvhodnejším parametrom na výber protézy DP. Výber veľkosti protézy podľa tohto parametra sa najviac zhodoval s reálne implantovanou veľkosťou protézy a to v 68,2 % prípadov. Navyše použitie DP na výber veľkosti protézy sa nespájalo s vyšším výskytom paravalvulárnej regurgitácie ($p = 0,7 - 0,9$) ani so zvýšenou potrebou implantácie trvalého kardiostimulátora ($p = 0,1$).

Záver: Práca poukazuje na skutočnosť, že jednotlivé 3D TEE parametre získané u toho istého pacienta v tej istej fáze srdcového cyklu môžu viesť k výberu odlišnej veľkosti protézy. Obr. 4, Tab. 4, Lit. 25, on-line full text (Free, PDF) www.cardiologyletters.sk

Kľúčové slová: transkatérová implantácia aortálnej chlopne – aortálny anulus – trojrozmerná transezofágová echokardiografia – diameter odvodený od perimetra – diameter odvodený od plochy – aortálna stenóza

Transkatérová implantácia aortálnej chlopne (TAVI) predstavuje miniinvazívnu alternatívu liečby závažnej symptomatickej aortálnej stenózy (AoS), ktorá bola pôvodne indikovaná len u pacientov s vysokým rizikom kardiochirurgickej náhrady aortálnej chlopne (1, 2, 3). Neskôr sa jej indikácie rozšírili aj na stredne rizikovú populáciu (4). Najaktuálnejšie odporúčania manažmentu chlopňových chýb z roku 2021 uvádzajú komplexný algoritmus preferencie výberu medzi intervenčnou a kardiochirurgickou náhradou aortálnej chlopne (5). Zobrazovacie metodiky majú hlavnú úlohu v pre-procedurálnom plánovaní a vo výbere vhodnej protézy a jej veľkosti (1, 6). Precízna vizualizácia anatomických pomerov je zásadná na dosiahnutie dobrého výsledku výkonu (3, 7).

V úvode rozvoja TAVI procedúr sa na výber vhodnej veľkosti protézy používali merania rozmeru aortálneho anulu (AoA) získané dvojrozmernou (2D) transthorakálnou echokardiografiou (TTE) (6). Neskôršie práce preukázali superioritu multidetektorovej počítačovej tomografie (MDCT), ktorá umožňuje trojrozmerné zobrazenie aortálneho koreňa, ako aj predikovanie úspešnosti výkonu (7, 8). MDCT sa preto stalo preferovanou metodikou v plánovaní TAVI (7, 9).

Rutinné trojrozmerné hodnotenie AoA umožnilo výrobcovi implementovať do odporúčaní na výber veľkosti TAVI protézy tri parametre, a to: diameter, plocha a periméter AoA. Plocha a periméter slúžia buď k priamemu výberu veľkosti protézy, alebo sa z nich odvodzuje tzv. efektívny diameter, podľa ktorého sa určí vhodný rozmer protézy (6, 10). Avšak v odporúčaníach sa vo všeobecnosti neuvádza žiadny ďalší návod objasňujúci vzájomný vzťah týchto parametrov medzi sebou, ako ani definovanie, ktorý parameter by mal byť preferovaný v jednotlivých situáciách. To viedlo k relatívne voľnej interpretácii odporúčaní. Na podklade viacerých MDCT prác, ktoré preukázali, že jednotlivé parametre vedú k výberom rôznych veľkostí protéz (11 – 14), výrobca chlopní Edwards Sapien 3 odporúča použiť na výber veľkosti protézy plochu alebo od plochy odvodený diameter (15).

Cieľom našej práce bolo objasniť prínos trojrozmernej (3D) transezofágovej echokardiografie (TEE) v problematike výberu veľkosti protézy na základe jednotlivých parametrov AoA (plocha, diameter odvodený od plochy, diameter odvodený od perimetra a priemerný diameter) a určiť, ktorý parameter AoA najlepšie koreluje s reálne implantovanou protézou. Ako vedľajší cieľ

sme si určili potvrdenie viacerými prácami uvádzanej nevhodnosti použitia 2D echokardiografického hodnotenia AoA vo výbere TAVI protézy.

Súbor pacientov a metodika

Do sledovania sme prospektívne zaradili 44 pacientov so závažnou symptomatickou AoS, ktorí podstúpili TAVI balónom expandovanou protézou Edwards Sapien 3. Pôvodný počet pacientov bol 45, ale jeden pacient bol z nášho sledovania vyradený pre exitus v úvode procedúry, k úmrtiu došlo ešte pred implantáciou protézy. Pacienti boli pôvodne poukázaní na naše echokardiografické pracovisko I. kardiologickej kliniky Východoslovenského ústavu srdcových a cievnych chorôb v období od marca 2017 do mája 2019 za účelom echokardiografického vyšetrenia pred plánovanou náhradou aortálnej chlopne. Všetci pacienti boli na multidisciplinárnom kardiokirurgickom indikačnom seminári hodnotení ako vysokorizikoví ku kardiokirurgickému výkonu a boli indikovaní ku TAVI. Rozhodnutie o TAVI sa uskutočnilo v súlade s odporúčaniami Európskej kardiologickej spoločnosti (4). Pacienti absolvovali 2D TTE a 3D TEE vyšetrenie použitím echokardiografického prístroja Siemens SC2000 s 2,5 – 3,75MHz 2D transtorakálnou sondou 4V1c a 3D transezofágovou sondou Z6Ms. (Siemens Medical Solutions, Inc, Mountain View v Kalifornii USA). Merania uskutočnil skúsený echokardiografista (G. V.), bez prístupu ku klinickým údajom a diagnostickým výsledkom počas hodnotenia. Okrem základných echokardiografických parametrov používaných na hodnotenie závažnosti aortálnej stenózy sme realizovali aj 3D hodnotenie aortálneho anulu. Údaje o základných demografických charakteristikách, klinických parametroch a pridružených diagnózach sme získali zo zdravotnej dokumentácie, nemocničného informačného systému a z anamnéz pacientov. Procedúru TAVI a s ňou súvisiacu realizáciu transezofágového echokardiografického vyšetrenia schválila etická komisia VÚSCH, a. s. Štúdia je v súlade s Helsinskou deklaráciou a od všetkých pacientov sme získali informovaný súhlas s realizovanými vyšetreniami a výkonmi.

Analýza dvojrozmernou transtorakálnou echokardiografiou

2D TTE vyšetrenie bolo realizované v súlade s aktuálnymi odporúčaniami (16). V rámci kvantifikácie závažnosti AoS sme sa zamerali na transvalvulárny

gradient a mid-systolický diameter AoA v parasternálnej projekcii na dlhú os. Pri výpočte plochy AoA na základe tohto diametra sa vychádza z predpokladu cirkulárneho tvaru AoA. Pre zlú kvalitu transtorakálneho obrazu boli u 12 pacientov parametre AoA hodnotené len z 3D TEE.

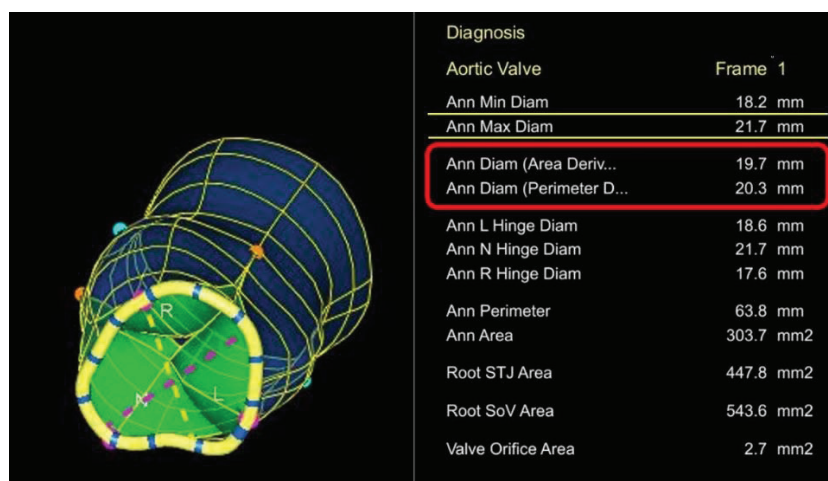
Po TAVI sme realizovali kontrolné echokardiografické vyšetrenie, kde sme sa v rámci komplexného vyšetrenia zameriavali aj na výskyt a závažnosť paravalvulárnej regurgitácie (PVR). Závažnosť PVR sme hodnotili na podklade päťstupňového škálovacieho modelu (ľahká, ľahká až stredne závažná, stredne závažná, stredne závažná až závažná a závažná) (17). Za účelom objasnenia súvislosti medzi závažnosťou PVR a tzv. oversizingom protézy sme na hodnotenie miery PVR použili štvorstupňový škálovací model (ľahká, stredne závažná, stredne závažná až závažná a závažná) (17).

Analýza trojrozmernou transezofágovou echokardiografiou

Pri 3D TEE vyšetrení sme používali sondu Z6Ms. 3D TEE záznamy AoA sme získali z jedného srdcového cyklu. Parametre prístroja boli optimalizované za účelom získania maximálneho priestorového a časového rozlíšenia záznamu. Podľa zaužívaných odporúčaní bolo určené ako minimálne akceptované časové rozlíšenie 10Hz (1).

Na offline analýzu sme použili Siemens WorkStation s eSieValve softvérom. V mid-systole (definovanej ako maximálne otvorená aortálna chlopňa) sme určili dve navzájom pravouhlé roviny, ktorých línie boli paralelné s longitudinálnou osou koreňa aorty. Tretia zvolená rovina bola kolmá na dve predchádzajúce. Orientácia tejto roviny bola modifikovaná tak, aby sme získali čo najreálnejší pohľad na AoA v priečnom reze. V ďalšom kroku sa realizovala automatizovaná funkcia softvéru kvantifikáciu AoA (**obrázok 1**). V prípade potreby sa realizovala ešte dodatočná manuálna korekcia. Všetky parametre sme získali z rovnakej fázy srdcového cyklu, čo nám umožnilo priamo porovnať vplyv jednotlivých parametrov na výber veľkosti protézy a zistiť, či budú viesť k výberu identickej alebo rôznej veľkosti protézy.

Zo získaných 3D TEE echokardiografických parametrov AoA sme sa zamerali na tie, ktoré sú výrobcami protéz určené na správny výber veľkosti protézy: priemerný diameter, plochu, perimeter a od nich odvodené efektívne diametre (DA – diameter odvodený od plochy, DP – diameter odvodený od perimetra) (18). Na výpočet priemerného diametra a efektívnych diametrov sa použili nasledujúce vzorce:



Obrázok 1 Automatizované hodnotenie aortálneho koreňa prostredníctvom 3D TEE

(Ann Diam Area deriv – diameter odvodený od plochy aortálneho anulu, Ann Diam Perimeter D – diameter odvodený od perimetra (VÚSCH, a. s.)

Výpočet priemerného diameteru

$$\text{priemerný diameter} = \frac{\text{maximálny diameter} + \text{minimálny diameter}}{2}$$

Výpočet diameteru odvodeného od plochy (DA)

$$DA = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

A – plocha AoA

Výpočet diameteru odvodeného od perimetra (DP)

$$DP = \frac{P}{\pi}$$

P – perimeter AoA

Výpočet indexu excentricity

Za účelom zistenia odchýlky tvaru AoA od dokonalého kruhu sme vypočítali index excentricity (EI). EI rovný 0 predstavuje dokonalý kruh, stúpajúci EI poukazoval na eliptickú geometriu AoA.

$$EI = 1 - \frac{\text{minimálny diameter}}{\text{maximálny diameter}}$$

TAVI procedúra

Na základe najaktuálnejších odporúčaní firmy Edwards pre výber veľkosti protézy sme ku každému

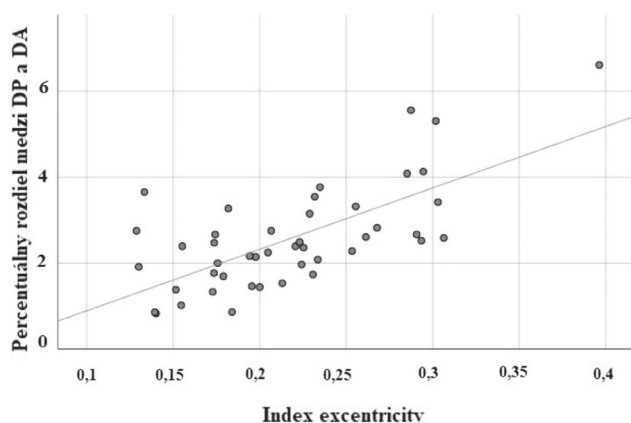
získanému parametru AoA priradili potencionálnu veľkosť balónom expandovateľnej protézy Sapien 3 (15).

V najnovších odporúčaniach spoločnosti Edwards pre výber veľkosti protézy Sapien 3 sa neuvádzajú parametre, ako priemerný diameter, DP ani anteroposteriorný diameter a plocha AoA, získané prostredníctvom 2D TTE (15). Na porovnanie výpovednej hodnoty týchto parametrov sme pre nich použili škálu výberu protézy podľa 3D plochy a DA.

Výber vhodnej veľkosti protézy sme ponechali na rozhodnutie intervenčného kardiológa, ktorý sa rozhodol na základe údajov získaných z MDCT, 3D TEE a aortografie. Počas procedúry pri vysokofrekvenčnej stimulácii komôr intervenčný kardiológ na úrovni AoA expandoval balónik určený pre odhadovanú veľkosť protézy. Následne sa realizovala aortografia. V prípade signifikantnej miery kalcifikácie AoA a subanulárnej oblasti a absencie významnejšej aortálnej regurgitácie sa zvolila daná veľkosť protézy. V prípade prítomnosti významnej aortálnej regurgitácie v okolí balónika a absencie rozsiahlejšej kalcifikácie AoA sa zvolila väčšia protéza.

Oversizing

Oversizing vyjadruje percentuálnu mieru nadhodnotenia parametra protézy vo vzťahu k parametru AoA. Postintervenčne sme u každého pacienta vyhodnotili oversizing jednotlivých parametrov vo vzťahu k parametrom AoA. Následne sme zisťovali jeho vplyv na najčastejšie komplikácie TAVI procedúr, a to PVR a im-



Obrázok 2 Korelácia percentuálneho rozdielu medzi DP a DA a indexom excentricity

plantáciu trvalého kardiostimulátora (TKS) z dôvodu poškodenia prevodového systému srdca.

Štatistická analýza

Kontinuálne premenné sa hodnotili ako priemer $\pm$ smerodajná odchýlka (SD). Kvantitatívne údaje sa hod-

Tabuľka 1 Demografické a klinické údaje

	Hodnoty
Vek – roky $\pm$ SD	77,7 $\pm$ 7,7
Povrch tela – m ² $\pm$ SD	1,89 $\pm$ 0,2
Pohlavie, muži, n (%)	25 (56,8 %)
Kardiálna dekompenzácia, n (%)	21 (47,7 %)
Synkopa, n (%)	15 (34,1 %)
Artériová hypertenzia, n (%)	42 (95,5 %)
Chronický koronárny syndróm, n (%)	26 (59,1 %)
Fibrilácia predsiení, n (%)	26 (59,1 %)
Diabetes mellitus, n (%)	12 (27,3 %)
– Iba diéta, n (%)	4 (33,3 %)
– Perorálne antidiabetiká, n (%)	4 (33,3 %)
– Inzulín, n (%)	4 (33,3 %)
Dyslipidémia, n (%)	36 (81,8 %)
CMP, n (%)	10 (22,7 %)
CHRI, n (%)	12 (27,3 %)
PAO, n (%)	7 (15,9 %)
TKS pred TAVI, n (%)	5 (11,4 %)

ADCHSZ – akútna kardiálna dekompenzácia, CMP – cievna mozgová príhoda, CHRI – chronická renálna insuficiencia, CHKS – chronický koronárny syndróm, n – počet pacientov, PAO – periférne artériové ochorenie, SD – smerodajná odchýlka, TAVI – transkatérová implan-

notili *t* testom, pričom premenné s hladinou $p < 0,05$ sa považovali za signifikantné. Kvantitatívne parametre v rôznych podskupinách sa hodnotili ANOVA testom. Pri korelácii kvantitatívnych parametrov sa určoval Pearsonov koeficient. Všetky štatistické analýzy sa uskutočnili použitím SPSS Statistics 20 (IBM, Chicago, IL, USA).

Výsledky

Demografické a klinické údaje

Priemerný vek nami sledovaných pacientov bol 77,7 $\pm$ 7,7 roka, 56,8 % tvorili muži. Z pridružených diagnóz boli najviac zastúpené artériová hypertenzia, dyslipidémia, chronický koronárny syndróm a fibrilácia predsiení. Predhospitalizačná kardiálna dekompenzácia bola prítomná v 47,7 % prípadov, kým výskyt synkopy bol 34,1 %. Základné demografické údaje uvádza **tabuľka 1**.

Echokardiografická analýza

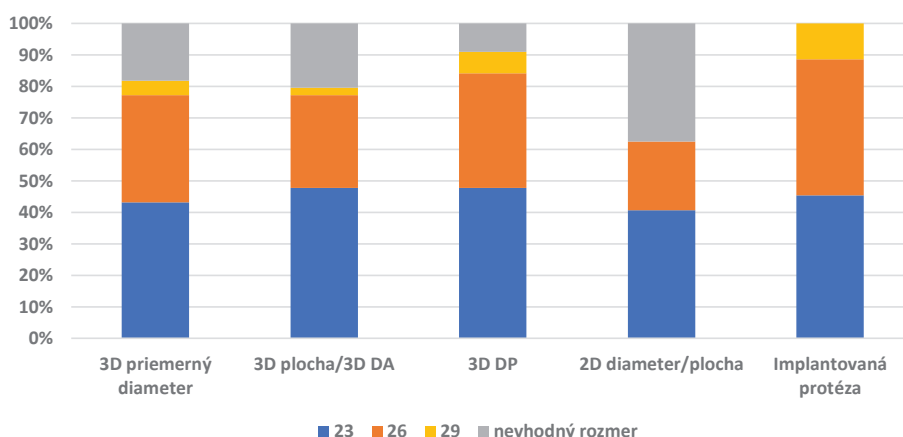
V našom súbore pacientov bola priemerná ejekčná frakcia ľavej komory 48 $\pm$ 12,2 % a priemerná plocha aortálnej chlopne 0,6 $\pm$ 0,2 cm². Priemerné hodnoty 3D TEE parametrov AoA boli nasledovné: priemerný diameter 22,8 $\pm$ 2,1 mm, plocha 403,5 $\pm$ 70,9 mm², perimeter 72,8 $\pm$ 6,2 mm. Nami hodnotené echokardiografické parametre uvádza **tabuľka 2**.

Párovým *t* testom sme preukázali signifikantné podhodnotenie plochy aj diametera AoA na podklade 2D

Tabuľka 2 Echokardiografické parametre

	Priemerné hodnoty $\pm$ SD
EF LK, %	48 $\pm$ 12,2
AVA, cm ²	0,6 $\pm$ 0,2
MPG, mmHg	48,4 $\pm$ 15,2
PPG, mmHg	80,7 $\pm$ 24,9
Minimálny diameter AoA, mm	19,9 $\pm$ 1,8
Maximálny diameter AoA, mm	25,6 $\pm$ 2,6
Index excentricity AoA	0,22 $\pm$ 0,06
3D priemerný diameter AoA, mm	22,8 $\pm$ 2,1
3D plocha AoA, mm ²	403,5 $\pm$ 70,9
3D perimeter AoA, mm	72,8 $\pm$ 6,2
3D DA AoA, mm	22,6 $\pm$ 2
3D DP AoA, mm	23,2 $\pm$ 2
2D diameter AoA, mm	21,5 $\pm$ 1,9
2D plocha AoA, mm ²	366,1 $\pm$ 65

2D – dvojrozmerný, 3D – trojrozmerný, AoA – aortálny anulus, AVA – plocha aortálnej chlopne, DA – diameter odvodený od plochy, DP – diameter odvodený od perimetra, EF – ejekčná frakcia, LK – ľavá komora, MPG – stredný tlakový gradient, PPG – vrcholový tlakový gradient, SD – smerodajná odchýlka



Obrázok 3 Zastúpenie teoretického výberu veľkostí protéz na základe 3D TEE parametrov AoA a reálne implantované protézy

echokardiografie v porovnaní s 3D parametrami plochy, DA a DP ($p = 0,001$ pre porovnanie s 3D plochou a DA, $p < 0,0001$ pre porovnanie s DP).

Pri porovnávaní DP a DA, dvoch najdiskutovanejších parametrov pre výber správnej veľkosti protézy, sme preukázali, že hodnoty DP sú významne väčšie ako DA ($p < 0,0001$). V rámci overenia vplyvu excentricity na výpočet efektívnych diametrov (DP, DA) sme preukázali, že so zvyšovaním indexu excentricity sa priamo úmerne zvyšoval rozdiel medzi DP a DA ($p < 0,0001$) (obrázok 2).

Výber TAVI protézy

Postprocedurálne sme hodnotili zhodu medzi reálne implantovanou veľkosťou protézy a veľkosťami protézy odvodenými na základe jednotlivých parametrov AoA.

Obrázok 3 poukazuje na percentuálne zastúpenie jednotlivých veľkostí protéz, ktoré by boli teoreticky vybrané na základe 3D TEE parametrov AoA, zároveň uvádza aj podiel veľkostí reálne implantovaných protéz. V prípade hodnoty parametra príliš nízkej pre výber najmenej protézy, číslo 23, sme predpokladali, že daný pacient by podľa daného parametra nedostal žiadnu protézu (na obrázku uvádzame ako nevhodný rozmer).

S reálne implantovanou protézou najlepšie koreloval DP, zhoda bola preukázaná v 68,2 % prípadov. Výber veľkosti protézy na základe 3D plochy a DA sa neodlišoval, taktiež sa neodlišoval výber protézy na základe 2D diametera a 2D plochy.

Použitie anteroposteriorného rozmeru AoA získaného z 2D TTE viedlo k podhodnoteniu potrebnej veľkosti protézy v 62,5 % prípadov v porovnaní s protézou zvolenou na podklade DP.

Oversizing

Kvantifikáciu percentuálnej miery nadhodnotenia (oversizingu) parametrov implantovanej protézy k parametrom AoA sme realizovali za účelom objasnenia jej vplyvu na úspešnosť procedúry. Najmenší priemerný oversizing k reálne implantovanej protéze bol zaznamenaný pri DP ($6,7 \pm 6,4$ %) a najväčší pri 2D ploche AoA ($35,8 \pm 21,5$ %). Priemerný oversizing implantovaných protéz k jednotlivým parametrom AoA uvádza **tabuľka 3**.

Pri porovnávaní DP a DA, dvoch najdiskutovanejších parametrov pre výber správnej veľkosti protézy, sme preukázali, že oversizing na podklade DA je signifikantne väčší ako oversizing na podklade DP ($p < 0,0001$).

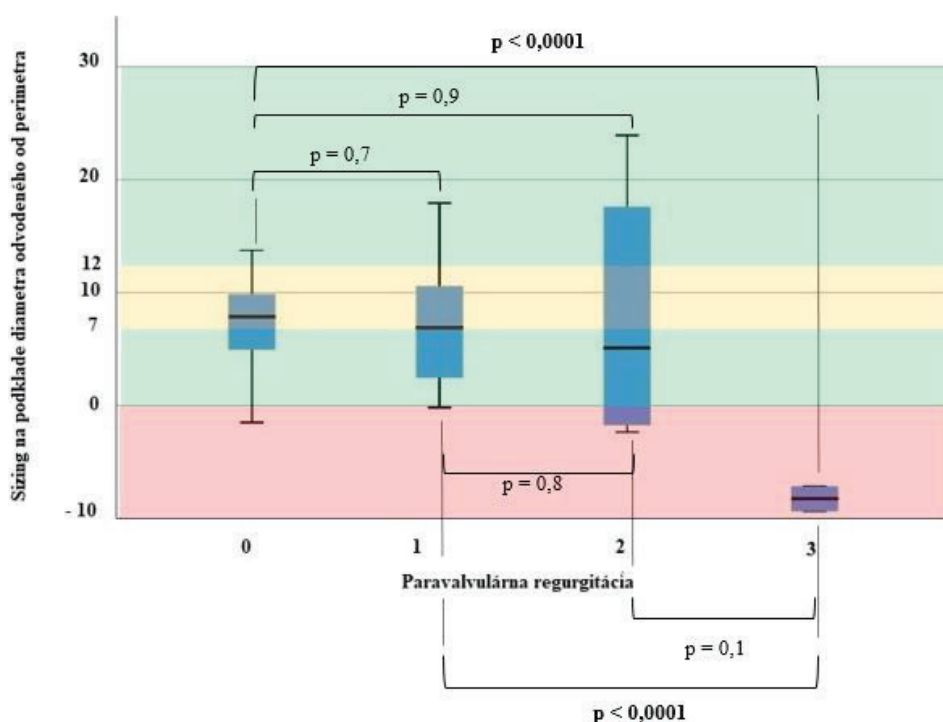
Postintervenčná paravalvulárna regurgitácia

Po výkone sme realizovali kontrolné echokardiografické vyšetrenie. Výskyt PVR bol 68,1 %. Lahký a ľahký až stredne závažný stupeň boli zastúpené v 61,3 % prípadov

Tabuľka 3 Priemerný oversizing implantovaných protéz k jednotlivým parametrom

	Oversizing $\pm$ SD
2D diameter, %	$16,2 \pm 9,2$
2D plocha, %	$35,8 \pm 21,5$
3D priemerný diameter, %	$8,6 \pm 6,5$
3D plocha, %	$20,13 \pm 13,8$
3D DA, %	$9,5 \pm 6,6$
3D DP, %	$6,7 \pm 6,4$

2D – dvojrozmerný, 3D – trojrozmerný, DA – diameter odvodený od plochy, DP – diameter odvodený od perimetra, SD – smerodajná odchýlka



Obrázok 4 Vzťah medzi PVR a oversizingom na podklade DP

0 – žiadna PVR, 1 – ľahká PVR, 2 – stredne závažná PVR, 3 – stredne závažná až závažná PVR, červená oblasť – undersizing, zelená oblasť – oversizing, žltá oblasť – optimálny oversizing podľa Leber et al. (22)

a len vo zvyšných 6,8 % prípadov bola prítomná stredne závažná a stredne závažná až závažná PVR.

Pacienti, ktorí mali zhodu medzi veľkosťou implantovanej protézy a protézou vybranou podľa DP a zároveň nemali zhodu vo veľkosti protézy podľa DA, nemali závažnejšiu PVR ako ľahkého stupňa a nemali implantovaný TKS po výkone. Všetci títo pacienti mali implantovaný o jedno číslo väčšiu protézu ako odporúčal DA.

Z pacientov, u ktorých bol nesúlad medzi nami odporúčanou veľkosťou protézy, na podklade DP, a reálne implantovanou veľkosťou protézy, len dvaja mali implan-

tovanú menšiu protézu, ostatní mali implantovanú o číslo väčšiu protézu. A práve u týchto jedincov s menšou protézou sme zaznamenali najzávažnejší stupeň PVR, a to stredne závažného až závažného stupňa. Dôvodom implantácie menšej protézy boli výrazné asymetrické kalcifikáty AoA, ktoré v jednom z prípadov viedli až k miernej deformácii implantovanej protézy.

ANOVA testom sme potvrdili signifikantne významné rozdiely vo výskyte PVR v závislosti od oversizingu chlopne na podklade DP ($p = 0,006$, **tabuľka 4**, **obrázok 4**).

Postintervenčná implantácia trvalého kardiostimulátora

Postintervenčná implantácia trvalého kardiostimulátora bola potrebná u piatich pacientov z 39 (po vylúčení tých, ktorí TKS mali už pred intervenciou), ich podiel činil 12,8 %. Indikáciou implantácie bola atrioventrikulárna blokáda (AVB) vyššieho stupňa alebo kompletná AVB. V našom súbore pacientov nebol potvrdený významný rozdiel v oversizingu na podklade DP medzi skupinami, ktoré postintervenčne potrebovali alebo nepotrebovali implantáciu TKS ($p = 0,1$).

Tabuľka 4 PVR vo vzťahu k oversizingu na podklade DP (štvorstupňový model)

Závažnosť PVR	Počet pacientov	Priemer $\pm$ SD
0	14	7,6 $\pm$ 4,4 %
1	24	7,2 $\pm$ 5,2 %
2	4	7,9 $\pm$ 12,3 %
3	2	-8,3 $\pm$ 1,6 %
Celý súbor	44	6,7 $\pm$ 6,4 %

0 – žiadna PVR, 1 – ľahká PVR, 2 – stredne závažná PVR, 3 – stredne závažná až závažná PVR, SD – merodajná odchýlka

U jedného pacienta s implantovanou väčšou protézou ako bola odporúčaná podľa DP bola nevyhnutná implantácia TKS pre vznik AVB 3. st. Avšak oversizing nebol významne vyšší v porovnaní s ostatnými pacientmi ($p = 0,1$).

Mortalita

V našom súbore pacientov nebola zachytená per-hospitalizačná ani 30-denná mortalita. K aprílu 2022 z nášho súboru pacientov exitovalo 22 pacientov, priemerná doba ich prežívania po TAVI bola $31,8 \pm 15,6$ mesiaca (rozmedzie od 2,7 do 56,5 mesiacov). Jeden z pacientov exitoval v našom kardiocentre na podklade kardiálneho zlyhania v teréne bilaterálnej bronchopneumónie a chronickej renálnej insuficiencie. Dôvody úmrtí ostatných pacientov nám nie sú známe. Nepreukázali sme signifikantný vzťah medzi prežívaním a klinickými alebo echokardiografickými parametrami ($p > 0,05$). Priemerný časový odstup od TAVI u ostatných pacientov predstavuje $47,6 \pm 7,8$ mesiacov (rozmedzie od 32 do 61 mesiacov).

Diskusia

Naša práca poukázala na skutočnosť, že jednotlivé parametre AoA získané u toho istého pacienta v tej istej fáze srdcového cyklu môžu viesť k výberu odlišnej veľkosti protézy.

Vplyv efektívnych parametrov AoA na výber veľkosti protézy

Naša echokardiografická práca preukázala, že hodnoty DP sú signifikantne väčšie ako hodnoty DA ($p < 0,0001$), čím sme podporili tvrdenia publikovaných MDCT prác (18). Táto skutočnosť vedie v niektorých prípadoch k výberu väčšej veľkosti protézy na základe DP v porovnaní s plochou, DA a priemerným diametrom. Podkladom tohto rozdielu je geometrické pravidlo, že periméter elipsy pri zachovaní jej plochy proporcionálne rastie s mierou excentricity AoA, inými slovami periméter sa predlžuje so zväčšujúcim sa rozdielom medzi krátkym a dlhým diametrom pri zachovaní plochy. Táto charakteristická črta elipsy komplikuje použitie, viacerými prácami odporúčaných, tzv. efektívnych diametrov, ktoré predstavujú diameter ideálneho kruhu s rovnakým obsahom a perimetrom. (3, 13, 18). V rámci overenia vplyvu excentricity na výpočet efektívnych diametrov (DP, DA) v našom súbore pacientov sme preukázali, že so zvyšovaním indexu excentricity sa priamoúmerne zvyšoval rozdiel medzi DP a DA ($p < 0,0001$).

V klinickej aplikácii našej práce eliptický tvar AoA viedol k tendencii výberu väčšej protézy na podklade DP v porovnaní s DA v 27,3 %. Otázkou ostáva, či by priame merania AoA (plocha a periméter) nemali byť preferované pred efektívnymi diametrami, ktoré reprezentujú nepriame výpočty vychádzajúce z predpokladu okrúhleho tvaru AoA, a preto sú náchylné na chyby vo výpočte.

Vzhľadom na skutočnosť, že DP najlepšie koreloval s reálne implantovanou protézou, by bolo prínosné zistiť, či výber protézy na základe perimetra nevedie k lepšej korelácii. Avšak tento parameter na výber protézy bol z odporúčaní pre voľbu veľkosti protézy vynechaný na podklade viacerých MDCT prác, ktoré dokazovali, že periméter a DP nadhodnocujú potrebnú veľkosť protézy, a preto môže ich výber viesť k poškodeniu prevodového systému srdca alebo k ruptúre AoA (18).

Limitácie zlatého štandardu MDCT pri hodnotení AoA

Záveru našej práce, preferujúce DP ako najvhodnejší parameter na výber protézy, sú v rozpore s MDCT prácami, ktoré preferujú plochu AoA a DA. Tvrdenia týchto prác vychádzajú z väčších hodnôt DP v porovnaní s DA, ktoré v niektorých prípadoch viedli k nadhodnoteniu potencionálnej veľkosti protézy, a to aj v porovnaní s priamym chirurgickým meraním (19).

Dôvodom možného významného nadhodnotenia veľkosti AoA na základe DP pri MDCT meraniach je viacero. MDCT merania realizované počas systoly komôr môžu byť zaťažené výskytom pohybových artefaktov. Pre tieto pohybové artefakty sa v minulosti preferovalo realizovať MDCT merania AoA v diastole. Avšak viaceré práce poukázali na nevyhnutnosť realizovania týchto meraní v systole (18).

MDCT softvér so stúpajúcou nepravidelnosťou AoA zvyšuje počet bodov, ktoré potrebuje na určenie okrajov AoA, a tým dochádza k disproporcionálnemu nadhodnoteniu perimetra (12, 20). Navyše, v prípade ak automatizovaný softvér nesprávne umiestni vymedzujúce body, môže dôjsť k falošnému zväčšeniu perimetra. Alternatívnym riešením hodnotenia je zjednodušiť tvar AoA na elipsu alebo ho manuálne obkresliť. Naposledy menovaná metóda nie je zaťažená vyššie uvedenými nepresnosťami meraní, ale môže viesť k iným nepresnostiam a zvyšovaniu intra- a interindividuálneho rozdielu pri vyhodnocovaní údajov viacerými rádiológmi. Za účelom prekonania tejto MDCT limitácie majú nové MDCT softvéry implementovaný algoritmus (tzv. smoothing algorithm), ktorého úlohou je redukovať jemné nerovnosti na obvodě AoA a z nich vyplývajúce neadekvátne nadhodnotenie perimetra (18).

V práci porovnávajúcej zhodu medzi MDCT meraním a priamym chirurgickým meraním, chirurgovia pred meraním realizovali dekalifikáciu AoA, ktorá mohla viesť k skresleniu údajov. Ich práca taktiež nezohľadňovala elastické a dynamické vlastnosti AoA (19).

V našej echokardiografickej práci sme používali automatizovaný softvér, ktorý analyzoval AoA, v prípade potreby sme realizovali dodatočné manuálne korekcie, avšak tieto boli na základe nášho subjektívneho hodnotenia len minimálne. Namiesto preferovania jedného z parametrov AoA určených na výber veľkosti protézy sme presvedčení o potrebe komplexnejšieho pohľadu na problematiku s individuálnym hodnotením každého pacienta s následnou voľbou toho najvhodnejšieho parametra. Naše tvrdenie je v súlade s pravidlami geometrie. Geometrický princíp stúpajúceho rozdielu medzi perimetrom a plochou pri zväčšujúcej sa excentricite môže v prípade extrémne eliptického tvaru viesť k významne vyšším hodnotám pri meraniach odvodených od perimetra (18).

Oversizing

Realizované TAVI procedúry preukázali, že na minimalizovanie PVR a rizika embolizácie protézy je oversizing protézy k AoA nevyhnutný (20, 21). Avšak odhadovaná miera oversizingu významne závisí od zvoleného parametra použitého na meranie AoA, navyše miera oversizingu doposiaľ nebola jednoznačne štandardizovaná (12). Malý oversizing môže viesť k PVR alebo embolizácii protézy, naopak príliš veľký oversizing by mohol viesť k poruche prevodového systému srdca a ruptúre AoA (22).

Hodnoty efektívnych diametrov sa odlišujú jednak na podklade komplexnej eliptickej geometrie AoA a jednak z dôvodu, že na výpočet percentuálneho oversizingu z plochy je potrebné umocniť polomer AoA na druhú. Zo vzorcov výpočtu plochy a perimetra AoA vyplýva, že zatiaľ čo plocha rastie vo vzťahu k rozmeru AoA exponenciálne, periméter stúpa proporcionálne (12).

V našom súbore pacientov DP dosahoval najmenší priemerný oversizing zo všetkých nami sledovaných parametrov, a to $6,7 \pm 6,4$ %. Sme toho názoru, že z praktického hľadiska čím väčší oversizing a čím väčšie jeho rozpätie sú potrebné pre úspešnosť procedúry, tým menej presný je daný parameter pri určovaní rozmeru AoA. Preto aj z pohľadu oversizingu protézy preferujeme DP ako ideálny parameter pre výber veľkosti protézy.

Najväčším problémom klinickej praxe je skutočnosť, že miera oversizingu je limitovaná dostupnými veľkosťami

protéz a pacientovou anatómiou. Práca Leber et al. uvádza optimálny oversizing diametra na úrovni 7 – 12 % (22). V našom súbore pacientov sme tento optimálny oversizing dosiahli len u jednej štvrtiny pacientov. Avšak aj v samotnej práci Leber et al. bol optimálny oversizing dosiahnutý len u jednej tretiny pacientov. Táto skutočnosť poukazuje na potrebu väčšej škály veľkosti protéz alebo vývoja chlopní, ktorých veľkosť môže byť viac regulovaná intervenčným kardiológom. Ďalšou možnosťou je umožnenie redukcie nafúknutia balónika, ktorý rozvíja protézu, o 1 – 3 cm³ v porovnaní s výrobcom odporúčaným nafúknutím. Toto poddimenzovanie veľkosti protézy však môže ovplyvniť jej životnosť (22). Ďalej treba vziať do úvahy aj individuálnu anatómiu jedincov, a to najmä prítomnosť rozsiahlej kalcifikácie, oválny tvar AoA a zúženie výtokového traktu ľavej komory. V rámci komplexnosti problematiky by bolo pre budúcnosť vhodné vyvinúť diagnostické postupy, ktoré by umožnili odhadnúť poddajnosť AoA, podľa ktorej by sme mohli dosiahnuť pre pacienta individualizovaný optimálny oversizing.

Postintervenčná paravalvulárna regurgitácia a implantácia TKS

Bolo preukázané, že výber správnej veľkosti protézy je najsilnejším prediktorom závažnosti PVR. Pri výbere menšej veľkosti protézy hrozí vznik závažnejšej PVR alebo migrácia protézy (23). V našej práci len dvaja pacienti mali implantovanú menšiu protézu ako bolo odporúčané na základe DP a len u týchto dvoch pacientov sa vyskytla stredne závažná až závažná PVR. Dôvodom implantácie menšej protézy bola významná asymetrická kalcifikácia AoA.

Výskyt a závažnosť PVR v našej práci (54,5 % výskyt ľahkej PVR a 6,8 % výskyt stredne závažnej a stredne závažnej až závažnej PVR) koreluje s jej výskytom a závažnosťou v prehľadových prácach zaoberajúcich sa PVR (20 – 80 % výskyt ľahkej PVR a 5 – 22 % výskyt stredne závažnej a závažnej PVR). Najoptimistickejšie práce uvádzajú výskyt stredne závažnej až závažnej PVR na úrovni 1 – 3,5 % (24), percentuálne vyšší výskyt tejto miery závažnosti PVR v našom súbore pacientov (dvaja pacienti 4,8 %) pripisujeme malému súboru pacientov. Navyše príčinou PVR v týchto dvoch prípadoch nie je chyba v hodnotení AoA, ale výrazná asymetrická kalcifikácia AoA. V našej práci sme potvrdili súvislosť medzi závažnosťou PVR a oversizingom na podklade DP ($p = 0,006$).

Metanalýza, ktorej súčasťou boli aj randomizované štúdie preukázala, že stredne závažná a od nej závažnejšia PVR je asociovaná s trojnásobne vyšším rizikom

30-dennej mortality a 2,3-násobne vyšším rizikom jednoročnej mortality (25). Obaja naši pacienti so stredne závažnou až závažnou postimplantačnou PVR boli na poslednej ambulantnej kontrole (po dvoch a štyroch rokoch) asymptomatickí, prípadne oligosymptomatickí a udávali výrazné zlepšenie kvality života po TAVI. Pravdepodobným dôvodom je prítomnosť ľahkej aortálnej insuficiencie už v predimplantačnom období a z toho vyplývajúca lepšia adaptácia ľavej komory na objemové preťaženie. Navyše pretrvávanie stredne závažnej až závažnej PVR bolo dokumentované päť dní po výkone, avšak práce preukázali tendenciu k redukcii PVR s odstupom času (24), takže aj u týchto našich pacientov mohlo dôjsť k zmierneniu PVR.

Jeden z pacientov, ktorý dostal väčšiu chlopňu ako bola odporúčaná na podklade DP, mal postprocedurálne implantovaný TKS. Avšak tak u tohto pacienta, ako aj u ostatných, u ktorých bola postprocedurálne indikovaná implantácia TKS, sa nepreukázal signifikantný oversizing vo veľkosti protézy ($p = 0,1$).

Hodnotenie aortálneho anulu prostredníctvom 2D TTE

Výsledky práce preukázali signifikantné podhodnotenie diametra a plochy AoA prostredníctvom 2D TTE v porovnaní s parametrami získanými prostredníctvom 3D TEE ($p = 0,001$ pre porovnanie s 3D plochou a DA, $p < 0,0001$ pre porovnanie s DP). Je logické, že použitie len jednorozmerného parametra pri určovaní veľkosti protézy môže viesť k nesprávnemu výberu veľkosti protézy, pretože toto jednorozmerné meranie predpokladá cirkulárny tvar AoA, ktorý je však v skutočnosti eliptický. Podobne ako už v minulosti publikované práce sme aj my potvrdili nevyhnutnosť preferovania trojrozmerných zobrazovacích metódik pred dvojrozmernými (6, 7, 8). Naše výsledky sú v súlade s inými prácami, ktoré preukázali, že použitie menšieho, anteroposteriorného, diametra AoA vedie k podhodnoteniu veľkosti protézy asi v 50 % prípadov v porovnaní s priamym chirurgickým meraním (20), v našom prípade bolo podhodnotenie až na úrovni 67 %.

Limitácie

Naša práca má niekoľko limitácií. Hodnotili sme relatívne malú vzorku pacientov. Avšak počet jedincov bol ovplyvnený počtom realizovaných implantácií Edwards Sapien 3 protéz v našom kardiocentre v čase dostupnosti danej verzie 3D TEE softvéru na hodnotenie chlopňových chýb.

Naše výsledky sú aplikovateľné len na nami implantovanú protézu Edwards Sapien 3. Do budúcnosti by

bolo vhodné overiť platnosť našich záverov aj u iných typov protéz.

V našej kohorte nebola zaznamenaná žiadna ruptúra AoA ani významný oversizing, ktorý by viedol k poškodeniu prevodového systému srdca, preto sa nemôžeme vyjadriť k miere oversizingu, ktorá by ohrozovala pacienta týmito komplikáciami.

Naše 3D TEE merania sme neporovnávali s inými 3D zobrazovacími metodikami (MDCT, MRI).

Naše závery vychádzajú z predpokladu, že počas implantácie protézy došlo k jej úplnému rozvinutiu do nominálnej hodnoty uvádzanej výrobcom. Úplnej expanzii však môžu brániť nepoddajné kalcifikáty a nerovnosti AoA. Avšak na rovnakých predpokladoch boli postavené aj našej práci podobné práce a zároveň použitím týchto záverov MDCT prác boli vytvorené odporúčania na výber veľkosti protézy (15).

Záver

Naša práca poukázala na skutočnosť, že jednotlivé 3D TEE parametre získané u toho istého pacienta v tej istej fáze srdcového cyklu môžu viesť k výberu odlišnej veľkosti protézy. Podľa našich zistení je najvhodnejším parametrom na výber protézy diameter odvodený od perimetra AoA. V našom súbore pacientov sa hypotetický výber protézy podľa tohto parametra najviac zhodoval s reálne implantovanou veľkosťou protézy, a to v 68,2 % prípadov. Navyše použitie tohto parametra pre výber veľkosti protézy sa nespájalo s vyšším výskytom PVR ani so zvýšenou potrebou implantácie TKS.

Závery našej práce nekorelujú so závermi MDCT prác, ktoré považujú diameter odvodený od perimetra za nespoľahlivý parameter pre riziko neprimeraného nadhodnotenia potrebnej veľkosti protézy. Aj na základe tejto diskrepancie výsledkov našou prácou poukazujeme na to, že problematika výberu správnej veľkosti protézy je komplexnejšia v porovnaní s tým ako ju uvádzajú aktuálne odporúčania výrobcov protéz.

Výber veľkosti protézy na podklade 2D TTE parametrov AoA by v našom súbore pacientov viedol k podhodnoteniu potrebnej veľkosti protézy v 67 % prípadov. Čím sme potvrdili nevyhnutnosť preferovania 3D zobrazovacích metódik.

Využitie 3D echokardiografie pri TAVI má svoje opodstatnenie. Ide o neinvazívnu metódu, ktorá sa na rozdiel od MDCT môže vykonávať periprocedurálne a tak zobrazuje stav kardiovaskulárneho systému v reálnom čase. Nie je zaťažovaná ionizačným žiarením, rizikom alergickej reakcie na jódomú kontrastnú látku

ani rizikom kontrastom indukovanej nefropatie. Navyše ide o relatívne lacnú, ľahko dostupnú a opakovateľnú metódu, ktorej výsledky meraní veľmi dobre korelujú s meraniami MDCT, ktorá sa považuje za zlatý štandard.

MUDr. Marián Kurečko, PhD.¹ (koncept/dizajn príspevku, zber údajov, analýza/interpretácia údajov, vypracovanie článku)

prof. MUDr. Gabriel Valočik, PhD.¹ (koncept/dizajn príspevku, analýza/interpretácia údajov, štatistika, kritická revízia článku)

MUDr. Alžbeta Kollárová² (zber údajov, analýza/interpretácia údajov, vypracovanie článku)

Literatúra

- Kasel AM, Cassese S, Bleiziffer S, Amaki M, Hahn RT, Kastrati A, et al. Standardized imaging for aortic annular sizing: implications for transcatheter valve selection. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2013;6:249-262.
- Schwarz F, Lange P, Zinsser D, Greif M, Boekstegers P, Schmitz Ch, et al. CT-angiography based evaluation of the aortic annulus for prosthesis sizing in transcatheter aortic valve implantation (TAVI) - predictive value and optimal thresholds for major anatomic parameters. *PLoS ONE*. 2014;9:e103481.
- Schmidkonz C, Marwan M, Klinghammer L, Mitschke M, Schuhbaeck A, Arnold A, et al. Interobserver variability of CT angiography for evaluation of aortic annulus dimensions prior to transcatheter aortic valve implantation (TAVI). *Eur J Radiol*. 2014;83:1672-1678.
- Baumgartner H, Falk V, Bax JJ, De Bonis M, Hamm C, Holm PJ, et al. 2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*. 2017;38:2739-2791.
- Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F, Milojevic M, Baldus S, Bauersachs J, et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*. 2021;43:561-632.
- Achenbach S, Delgado V, Hausleiter J, Schoenhagen P, Min JK, Leipsic JA. SCCT expert consensus document on computed tomography imaging before transcatheter aortic valve implantation (TAVI)/ replacement (TAVR). *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2012;6:366-380.
- Jilaihawi H, Kashif M, Fontana G, Furugen AM, Takahiro S, Friede G, et al. Cross-sectional computed tomographic assessment improves accuracy of aortic annular sizing for transcatheter aortic valve replacement and reduces the incidence of paravalvular aortic regurgitation. *J Am Coll Cardiol*. 2012;59:1275-1286.
- Smid M, Ferda J, Baxa J, Cech J, Hájek T, Kreuzberg, et al. Aortic annulus and ascending aorta: comparison of preoperative and perioperative measurement in patients with aortic stenosis. *Eur J Radiol*. 2010;74:152-155.
- Jurencak T, Turek J, Kietselaer BL, Muhl C, Kok M, Ommen VGA, et al. MDCT evaluation of aortic root and aortic valve prior to TAVI. What is the optimal imaging time point in the cardiac cycle? *Eur Radiol*. 2015;25:1975-1983.
- Mylotte D, Martucci G, Piazza N. Patient selection for transcatheter aortic valve implantation: an interventional cardiology perspective. *Ann Cardiothorac Surg*. 2012;1:206-215.
- Blanke P, Russe M, Leipsic J, Reinohl J, Ebesberger U, Suranyi P, et al. Conformational pulsatile changes of the aortic annulus: impact on prosthesis sizing by computed tomography for transcatheter aortic valve replacement. *JACC Cardiovasc Interv*. 2012;5:984-994.
- Blanke P, Willson AB, Webb JG, Achenbach S, Piazza N, Min JK, et al. Oversizing in transcatheter aortic valve replacement, a commonly used term but a poorly understood one: dependency on definition and geometrical measurements. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2014;8:67-76.
- Kempfert J, Van Linden A, Lehmkuhl L, Rastan AJ, Holzhey D, Blumenstein J, et al. Aortic annulus sizing: echocardiographic versus computed tomography derived measurements in comparison with direct surgical sizing. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2012;42:627-633.
- Schultz CJ, Moelker A, Piazza N, Tzikas A, Otten A, Nuis RJ, et al. Three dimensional evaluation of the aortic annulus using multislice computer tomography: are manufacturer's guidelines for sizing for percutaneous aortic valve replacement helpful? *Eur Heart J*. 2010;31:849-856.
- Husser O, Pellegrini C, Kessler T, Burgdorf Ch, Thaller H, Mayr NP, et al. Predictors of permanent pacemaker implantations and new-onset conduction abnormalities with the SAPIEN 3 balloon-expandable Transcatheter Heart Valve. *J Am Coll Cardiol Interv*. 2016;9:44-254.
- Galderisi M, Cosyns B, Edvardsen T, Cardim N, Delgado V, Salvo GD, et al. Standardization of adult transthoracic echocardiography reporting agreement with recent chamber quantification, diastolic function, and heart valve disease recommendations: an expert consensus document of the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur Heart J*. 2017;38:1301-1310.
- Pibarot P, Hahn RT, Weissman NJ, Monaghan MJ. Assessment of paravalvular regurgitation following TAVR: a proposal of unifying grading scheme. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2015;8:340-360.
- Horehledova B, Muhl C, Hendriks BMF, Eijssvoogel NG, Vainer J, Veenstra LF, et al. Do CTA measurements of annular diameter, perimeter and area result in different TAVI prosthesis sizes? *Int J Cardiovasc Imaging*. 2018;34:1819-1829.
- Kim WK, Meyer A, Mollmann H, Rolf A, Mollmann S, Blumenstein J, et al. Cyclic changes in area- and perimeter- derived effective dimensions of the aortic annulus measured multislice computed tomography and comparison with metric intraoperative sizing. *Clin Res Cardiol*. 2016;105:622-629.
- Willson AB, Webb JG, Labounty TM, Achenbach S, Moss R, Wheeler M, et al. 3-dimensional aortic annular assessment by multidetector computed tomography predicts moderate or severe paravalvular regurgitation after transcatheter aortic valve replacement: a multicenter retrospective analysis. *J Am Coll Cardiol*. 2012;59:1287-1294.
- Willson AB, Webb JG, Freeman M, Wood DA, Gurvitch R, Thompson CHR, et al. Computed tomography-based sizing

- recommendations for transcatheter aortic valve replacement with balloon-expandable valves: Comparison with transesophageal echocardiography and rationale for implementation in a prospective trial. *J Cardiovasc Comput Tomogr.* 2012;6:406-414.
22. Leber AW, Eichinger W, Rieber J, Lieber M, Schleger S, Ebersberger U, et al. MSCT guided sizing of the Edwards Sapien XT TAVI device: impact of different degrees of oversizing on clinical outcome. *Int J Cardiol.* 2013;168:2658-2664.
23. Hahn RT, Khalique O, Williams MR, Koss E, Paradis JM, Deneault B, et al. Predicting paravalvular regurgitation following transcatheter valve replacement: utility of a novel method for three-dimensional echocardiographic measurements of aortic annulus. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26:1043-1052.
24. Ong G, Annabi MS, Clavel MA, Guzzetti E, Salaun E, Toubal O, et al. Paravalvular regurgitation after transcatheter aortic valve replacement: Is the problem solved? *Interv Cardiol Clin.* 2018;7:445-458.
25. Van Belle E, Juthier F, Susen S, Vincentelli A, Iung B, Dallongeville J, et al. Postprocedural aortic regurgitation in balloon-expandable and self-expandable transcatheter aortic valve replacement procedures: analysis of predictors and impact on long-term mortality: insight from FRANCE2 Registry. *Circulation.* 2014;129:1415-1427.