

Introduction to FFR-CT HeartFlow

Úvod k FFR-CT HeartFlow

František Nehaj^{1,2,3,4}, Derek Leslie Connolly^{3,4}

¹*Oddelenie arytmológie a kardiostimulácie, Národný ústav srdcových a cievnych chorôb, a. s., Bratislava, Slovenská republika*

Nehaj F, Connolly DL. **Introduction to FFR-CT HeartFlow.** Cardiology Lett. 2025;34(3):153–164
Abstract. The emergence of non-invasive, computationally derived fractional flow reserve from computed tomography (FFR-CT) marks a significant breakthrough in clinical diagnostic and non-invasive medicine. FFR-CT is obtained from standard resting coronary CT scans, eliminating the need for additional pharmacological agents and invasive procedures. This technology represents a major advancement in the field of cardiology. Studies have demonstrated that FFR significantly influences the accuracy of CT coronary angiography (CCTA), leading to improved diagnostic precision. This work aims to review the FFR-CT imaging technique, with a specific focus on validated methodology known as HeartFlow. It will cover the principles and clinical indications of FFR-CT. Furthermore, it will discuss the application of this method in various clinical situations, such as acute coronary syndrome, coronary artery dissection, coronary anomalies, and ischemic heart disease. Fig. 8, Ref. 43, on-line full text (Free, PDF), www.cardiologyletters.sk

Keywords: FFR-CT – HeartFlow – CCTA (Coronary Computed Tomography Angiogram) – acute coronary syndrome – coronary artery disease – dissection – anomaly – ischemia

Nehaj F, Connolly DL. **Úvod k FFR-CT HeartFlow.** Cardiology Lett. 2025;34(3):153–164

Abstrakt. Príchod neinvazívnej, výpočtovo odvodennej frakčnej prietokovej rezervy z počítačovej tomografie (FFR-CT) predstavuje prelom v klinickej diagnosticko-neinvazívnej medicíne. FFR-CT je odvodené zo štandardných pokojových koronárnych CT skenov bez potreby použitia ďalších farmakologických liečiv a invazívnych vyšetrovacích metód. Táto technológia predstavuje významný pokrok v kardiológii. Štúdie preukázali, že FFR-CT prispieva k podstatnému zníženiu miery falošne pozitívnych výsledkov spojených s CT koronarografiou (CCTA), čím sa zvyšuje presnosť diagnóz. Táto práca má za cieľ ponúknuť prehľad zobrazovacej techniky FFR-CT, konkrétne so zameraním sa na validovanú metodiku HeartFlow. Zameriava sa na princípy, klinické indikácie a kontraindikácie FFR-CT a podrobnejšie rozoberá použitie

Z ¹Oddelenia arytmológie a kardiostimulácie, Národný ústav srdcových a cievnych chorôb, a. s., Bratislava, Slovenská republika, ²Kliniky arytmológie, Lekárska Fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovenská republika, ³University of Birmingham, Institute of Cardiovascular Sciences, Birmingham, UK a ⁴Sandwell and West Birmingham Hospitals NHS Service Trust, Birmingham, UK

Do redakcie došlo dňa 31. decembra 2024; prijaté 9. apríla 2025
Adresa pre korešpondenciu: MUDr. František Nehaj, PhD., Oddelenie arytmológie a kardiostimulácie, NÚSCH, a. s., Pod Kráskou hôrkou 1, 833 48 Bratislava, Slovenská republika, email: frantisek.nehaj@nusch.sk

metódy v klinických situáciách, ako akútneho koronárneho syndrómu, disekcia koronárnej artérie, koronárna anomália a ischemická choroba srdca. Obr. 8, Lit. 43, on-line full text (Free, PDF), www.cardiologyletters.sk

Kľúčové slová: FFR-CT – HeartFlow – CCTA (počítačová tomografia) – CT koronarografia – akútneho koronárneho syndrómu – koronárna choroba srdca – disekcia – anomália – ischemia

FFR-CT (Fractional Flow Reserve Computed Tomography) je neinvazívna zobrazovacia technika, ktorá hodnotí ochorenie koronárnych artérií kombináciou CT angiografie s výpočtovou dynamikou tekutín. Presne vyhodnocuje funkčný význam lézií koronárnych artérií a pomáha určiť, či je potrebná intervenčná, alebo chirurgická liečba. Proces realizácie CT skenu koronárnych artérií, ktorý sa analyzuje, aby sa získali hodnoty FFR-CT indikujúce dynamiku prietoku krvi. FFR-CT má významnú úlohu pri hodnotení pacientov so stabilnou bolesťou na hrudníku, čím potenciálne znižuje potrebu zbytočných invazívnych postupov (1 – 3).

Princíp frakčnej prietokovej rezervy odvodené od CT

CT derivovaná frakčná prietoková rezerva (FFR) je technika, ktorá využíva princípy výpočtovej dynamiky tekutín na základe tlakového pomeru medzi koronárnou artériou (distálne od stenózy) a koreňom aorty počas maximálnej mikrovaskulárnej dilatácie. FFR odvodené z CT využíva koronárnu CT angiografiu na neinvazívne počítanie FFR. Prietoková simulácia založená na Navierovej-Stokesovej rovnici odhaduje prietok krvi v srdci pomocou fyziologických princípov, pričom zohľadňuje hmotu myokardu a prietok cez koronárne vetvy podľa Murrova zákona. Využíva aj účinky maximálnej hyperémie na vytvorenie trojrozmerného modelu koronárneho stromu, extrahovaného z individuálnych CT koronárnych angiografií s vysokým rozlíšením.

Táto metóda je užitočná, keď CCTA odhalí stenózu nejasného hemodynamického významu a očakáva sa, že výsledky zmenia klinický manažment pacienta. Koronárna lézia sa považuje za hemodynamicky významnú, keď je hodnota FFR-CT $\leq 0,80$. Adekvátna betablokáda a sublingválne nitráty sú kľúčové na zabezpečenie vysokej kvality obrazu. FFR-CT nie je možné použiť

v stentovaných cievach alebo by-passových štepoch. V súčasnosti je klinicky dostupné jediné FFR-CT (HeartFlow). Rôzni výrobcovia vyvíjajú podobné systémy na výpočty FFR-CT, ktoré nie sú klinicky dostupné a validované.

FFR-CT koreluje s invazívnou FFR ($r = 0,82$) s malým systematickým podhodnotením (priemerný rozdiel 0,03) a miernym nadhodnotením hemodynamickej závažnosti. Senzitivita a špecificita na detekciu FFR-pozitívnych lézií je 91,2 % a 93,5 %. Výsledky FFR-CT medzi približne 0,70 a 0,85 (šedá zóna) by sa mali posudzovať rezervovanejšie a všetky výsledky by sa mali interpretovať v individuálnom klinickom kontexte (4 – 6).

Klinické použitie FFR-CT a kontraindikácie

V klinickej praxi je najčastejšia indikácia pre stabilné bolesti na hrudníku a podozrenie na ochorenie koronárnych artérií (CAD) v prítomnosti potenciálne významných lézií na CCTA, zvyčajne stenózy s priemerom $> 40\%$, keď sa očakáva, že výsledky zmenia klinickú liečbu. Jej použitie je vhodné na vylúčenie hemodynamicky významnej koronárnej stenózy u pacientov s bolesťou na hrudníku na urgentnom prijíme až po vylúčení akútneho koronárneho syndrómu. Kontraindikácie FFR sú odvodené od CT ako nedostatočná kvalita CCTA, akútneho koronárneho syndrómu, recentný infarkt myokardu (< 4 týždne), anamnéza chirurgickej alebo perkutánnej koronárnej revaskularizácie. Po perkutánnej koronárnej intervencii môže byť FFR-CT možné len v cievach bez koronárneho stentu. Ďalšou kontraindikáciou je oklúzia koronárnej artérie a nemožnosť realizácie samotného CT vyšetrenia (tehotenstvo, znížená funkcia obličiek, alergia na jódomé kontrastné látky, hypertyreóza a iné).

Z praktického hľadiska závažné koronárne kalcifikácie komplikujú presné vymedzenie koronárneho lúmenu, čo ovplyvňuje vizuálnu interpretáciu aj simulácie prietoku.

Prítomnosť kalifikácií nevyučuje realizáciu FFR-CT, avšak celková presnosť sa postupne znižuje s vyšším skóre vápnika.

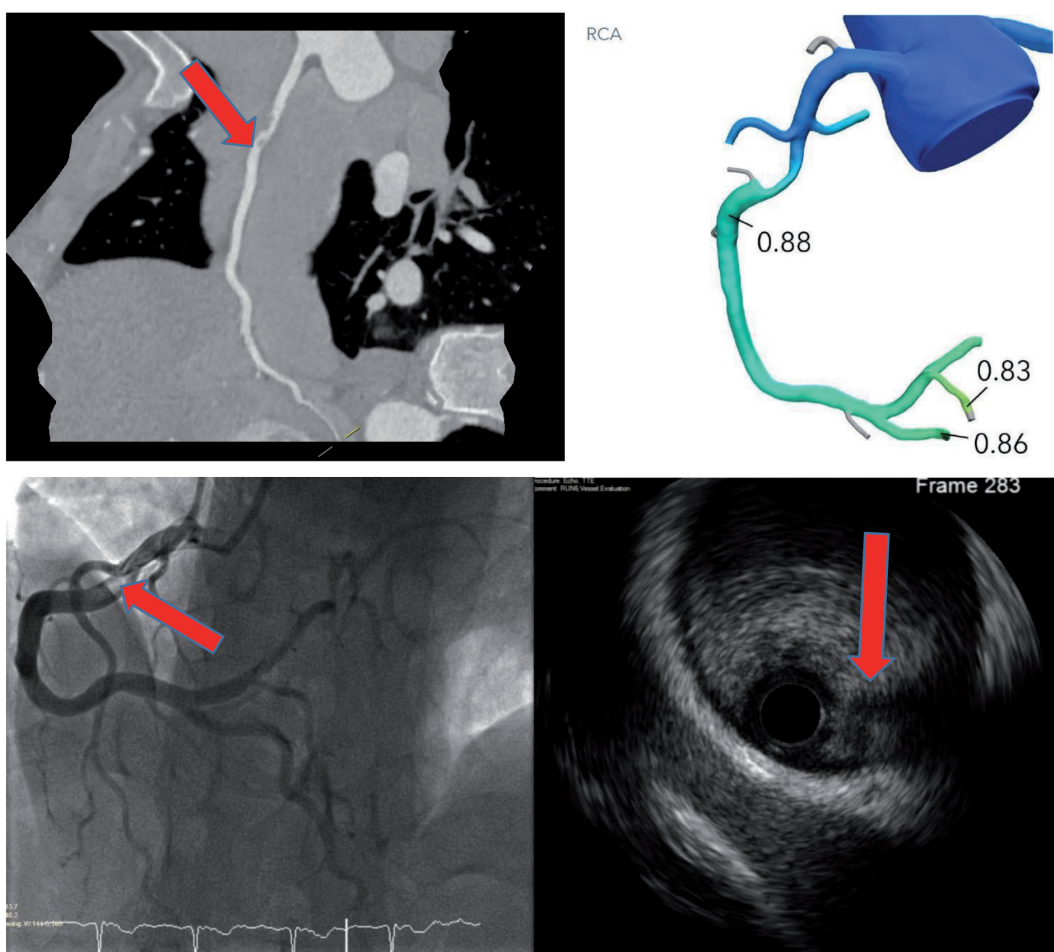
Uskutočniteľnosť FFR-CT analýzy závisí od vysokokvalitných CT snímok, ktoré by sa mali vyhotoviť minimálne na 64-rezovom CT skeneri alebo pokročilejšom systéme. Podávanie betablokátorov a nitroglycerínu sa dôrazne odporúča na dosiahnutie srdcovej frekvencie < 65 úderov za minútu, na zníženie artefaktov pohybu srdca a na optimalizáciu vizualizácie koronárnej artérie (7).

Akútny koronárny syndróm

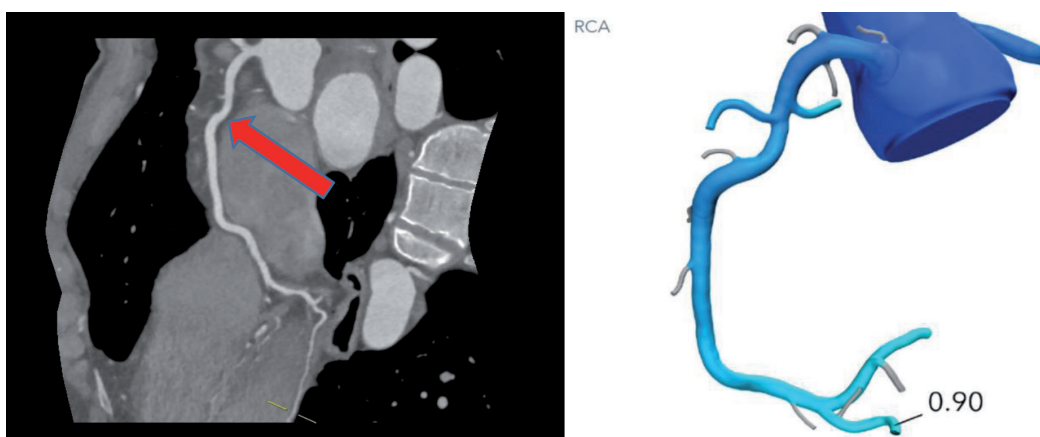
Invazívne FFR meranie sa neodporúča u pacientov s obrazom elevácie ST segmentu (STEMI) v kulprítových léziách (8). V nekulprítových léziách je FFR spoľahlivá

metóda a možno ju použiť na usmernenie rozhodnutia o revaskularizácii (9, 10). Niektoré práce čiastočne podporujú využitie metodiky FFR aj u pacientov bez elevácie ST segmentu (NSTEMI) v kulprítovej aj nekulprítovej lézii (11).

Neinvazívne zobrazovanie v akútnych prípadoch vo všeobecnosti nie je vhodné predovšetkým z časového hľadiska. Najpraktickejšie využitie môže byť z CT protokolu „triple rule out“ (trojité vylúčenie), ktoré sa môže použiť u pacientov s bolesťami na hrudníku bez zmien na EKG na urgentných príjmoch. Tento protokol slúži na vylúčenie troch diagnóz – závažná koronárna choroba srdca, pľúcna embólia a disekcia aorty (12). Použitie CCTA sa preukázala ako vhodná alternatíva v porovnaní s invazívnym koronarografickým vyšetrením u pacientov s nízkym a stredným rizikom koronárnej choroby srdca, keď je elektrokardiogram (EKG) a troponín diagnosticky



Obrázok 1 Disekcia RCA – CCTA, FFR-CT, SKG a IVUS



Obrázok 2 CCTA, FFR-CT – kontrola po 8 týždňoch

nepresvedčivý pre akútny koronárny syndróm (AKS). V štúdiu RAPID-CCTA, kde bolo zaradených 1 748 pacientov, nepreukázala benefit pri znížení úmrtnosti, IM, alebo trombózy stentu pri podozrení na AKS v porovnaní so štandardným postupom (5,8 vs. 6,1 %) (13). FFR-CT dokáže preukázať ischemiu modelovaním koronárnej vaskulatúry a zahrnutím výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) s diagnostickou presnosťou 81 % (14 – 16). Avšak je limitované dostupnosťou, cenou a spracovaním prebieha mimo pracoviska s časovým trvaním do 24 hodín (momentálne už aj do 4 hodín), preto sa indikuje u stabilných pacientov a použitie FFR-CT pri AKS nie je praktické.

Disekcia koronárnej artérie

Spontánna alebo traumatická disekcia koronárnej artérie (SCAD, TCAD) je relatívne častou príčinou AKS (17). Pri podozrení na SCAD alebo TCAD by sa mala čo najskôr vykonať invazívna koronárna angiografia (18), avšak úloha CCTA sa stáva čoraz dôležitejšou v diagnostike a manažmente disekcie koronárnej artérie (obrázok 1). Použitie FFR-CT je limitované na ojedinelé kazuistiky a vzhľadom na akútny priebeh sa štandardne v tejto oblasti neodporúča (obrázok 2) (19, 20). Vo väčšine prípadov dochádza k úplnému spontánnemu vyliečeniu a u vysokorizikových pacientov s pokračujúcou ischemiou alebo hemodynamickou nestabilitou sa odporúča zváženie perkutánnej alebo chirurgickej intervencie

(18, 21). Klinická a praktická skúsenosť preukázala, že neinvazívne vyšetrenia sú v mnohých prípadoch postačujúce a dostatočné na stanovenie správnej diagnózy. Výstupom je možnosť využiť neinvazívne zobrazovacie metódy na diagnostiku a manažment SCAD/TCAD bez potreby doplnenia invazívnych vyšetrení (19, 20).

Koronárne anomálie

Anomálie koronárnych artérií (CAA) sú skupinou vrodených stavov charakterizovaných abnormálnym vznikom, priebehom alebo ukončením ktorejkoľvek z troch hlavných epikardiálnych koronárnych artérií (22). Rastúce používanie invazívneho a neinvazívneho kardio-vaskulárneho zobrazovania odhalilo 7,9 % prevalenciu CAA (23). CAA sú extrémne variabilné, čo si vyžaduje vysoko individuálny terapeutický prístup (24). Klinické koreláty a prognostické implikácie CAA však zostávajú nedostatočne pochopené a podľa súčasných poznatkov by sa izolovaná kongenitálna koronárna atrezia mala považovať za potenciálne fatálnu, čím sa zvyšuje riziko úmrtia, rizikový faktor rozvoja srdcového zlyhávania alebo malígnych arytmií (25). Angína, dyspnoe a dyskomfort na hrudníku môžu predstavovať prvé klinické prejavy. Najdôležitejšie však je, že zástava srdca súvisiaca s CAA sa môže vyskytnúť až u 50 % predtým asymptomatických pacientov (26).

Použitie FFR-CT pri CAA nebolo systematicky hodnotené a nie je v oficiálnych odporúčaniach (20,

27). Avšak v klinickej praxi môže aplikovanie FFR-CT pomôcť v diagnostike a pátraní po etiológii v rámci dôkazu ischemie pri koronárnej anomálii, napríklad na tomto príklade atrézie pravej koronárnej artérie. FFR-CT preukázalo významné zníženie prietoku v stredných až distálnych segmentoch ľavej koronárnej artérie – RIA/ LAD a CX (obrázok 3). V niektorých prípadoch sa ukazuje, že FFR-CT lepšie predpovedá hemodynamický význam ischemie.

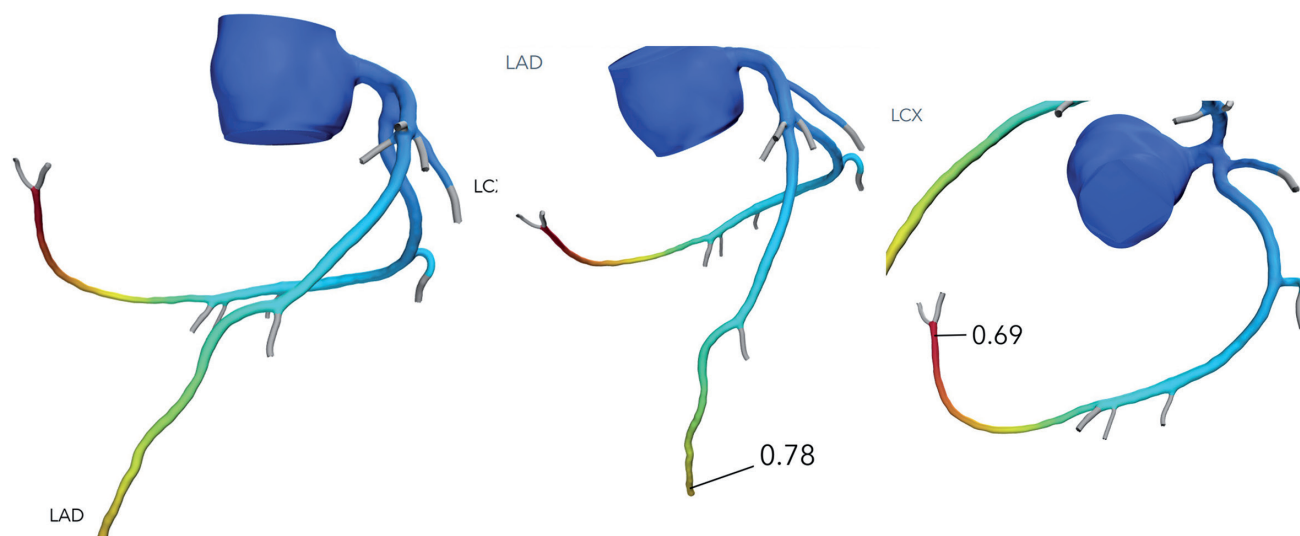
Ischemická a koronárna choroba srdca

CCTA je spoľahlivou metódou na vylúčenie ochorenia koronárnych artérií u symptomatických pacientov. Normálny nález naznačuje dobrú prognózu a eliminuje potrebu ďalších diagnostických testov (28). Keďže však CCTA primárne hodnotí anatómiu, nemôže vyhodnotiť funkčný význam lézií, čo vedie k potenciálnym nezrovnalostiam. FFR-CT výrazne zvyšuje diagnostickú presnosť (29). FFR-CT je základným nástrojom pre pacientov s koronárnou stenózou stredného závažného stupňa (CAD-RADS 3 a 4A), účinne identifikuje tých, ktorí nepotrebujú ďalšie testovanie ($\text{FFR}_{\text{CT}} > 0,80$) a identifikuje pacientov s vyšším rizikom ($\text{FFR}_{\text{CT}} \leq 0,80$), ktorí môžu vyžadovať invazívnu diagnostiku.

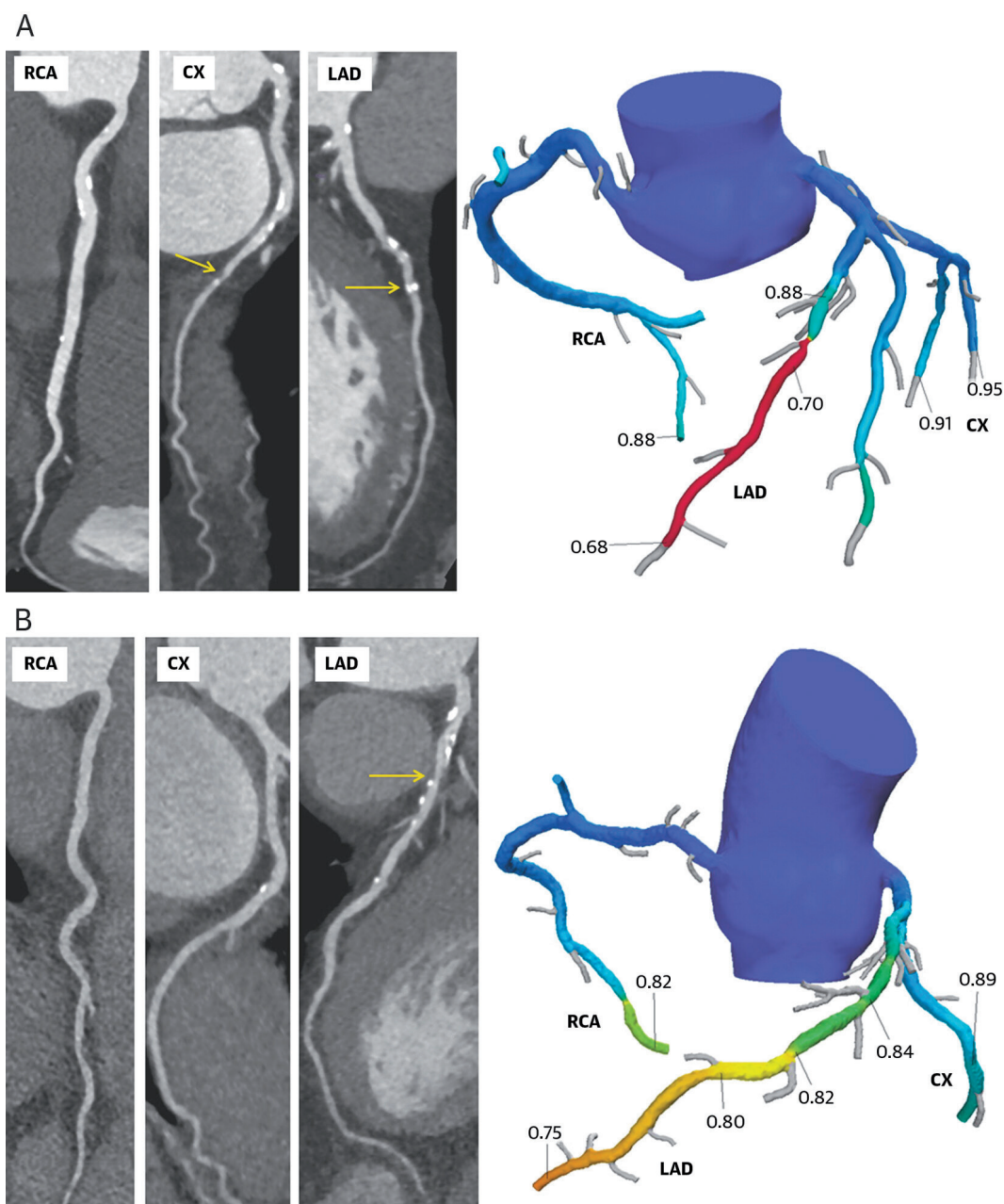
Výšetrenia metodikou HeartFlow analyzovali štandardné súbory údajov CCTA pomocou pokročilého

trojrozmerného modelu FFR-CT, ktorý vypočítava hodnoty FFR pre cievy 1,8 mm alebo väčšie. Výsledok FFR-CT je negatívny, ak všetky hodnoty prekročia 0,80 a pozitívny, ak je aspoň jedna 0,80 alebo nižšia. Pacienti s hodnotami FFR-CT 0,80 alebo nižšími, lokalizovanými 2 až 3 cm distálne od významnej stenózy, majú ischemiu špecifickú pre léziu (obrázok 4). Tí, ktorí nemajú túto ischemiu, ale vykazujú postupný pokles FFR-CT v postihnutých cievach s distálnymi hodnotami 0,80 alebo nižšími, sú klasifikovaní ako pacienti s pozitivitou FFR-CT distálnych ciev (16). U pacientov s hodnotami FFR-CT nad 0,80 sa odporúča optimálna medikamentózna liečba bez ďalšieho testovania. Rozhodnutia o odporúčaní na invazívnu koronárnu angiografiu v pozitívnych prípadoch FFR-CT sú založené na klinickej expertíze, prezentácii symptómov pacienta a špecifikách lézie. Prah pre odporúčanie invazívnej koronarografie pri ischemii špecifickej pre léziu je 0,80 až 0,75, pričom optimálna medikamentózna liečba je prvolíniovou stratégiou pre pozitivitu FFR-CT, ktorá zabezpečuje účinnú liečbu v primárnej prevencii (29 – 31).

Pomocou diagnostickej stratégie, ktorá zahŕňa koronárnu CCTA v prvej línii a selektívne testovanie FFR-CT so stredne závažnou stenózou bezpečne identifikuje vysokorizikóvu skupinu pacientov, ktorí sú vhodní na včasnú hospitalizáciu s realizáciou invazívneho koronarografického vyšetrenia (obrázky 5, 6 a 7).



Obrázok 3 FFR-CT

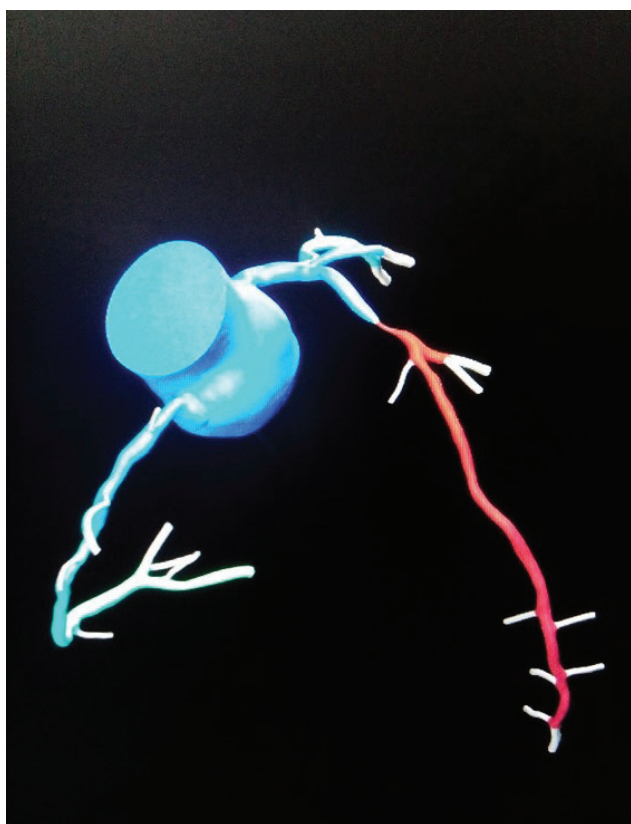


Obrázok 4A, 4B ICHS, CAD

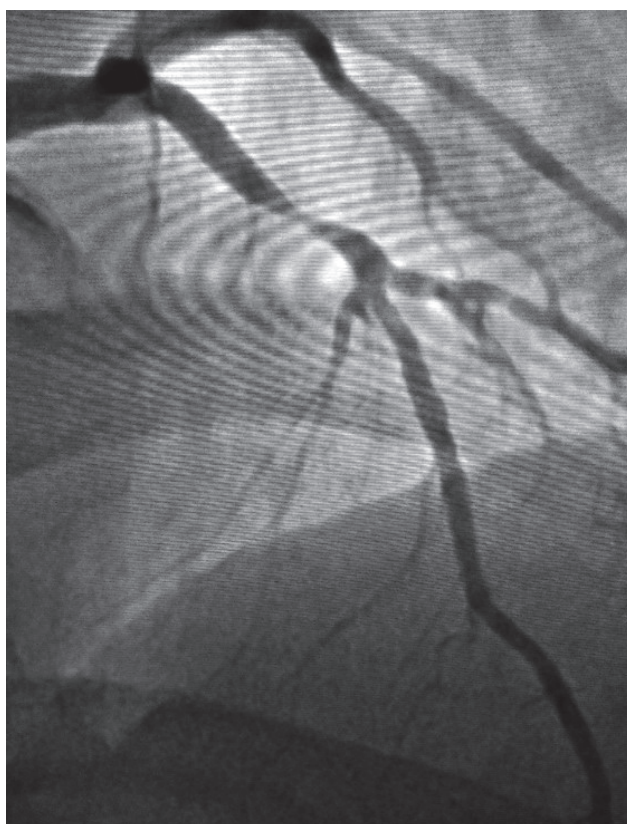
FFR-CT Planner

FFR-CT Planner je pokročilý a inovatívny nástroj určený na presnejšie a individuálne hodnotenie FFR, čo umožňuje detailnejšie analyzovať dynamiku prietoku krvi v koronárnych artériách. Softvér sa v reálnom čase adaptuje jedinečnej geometrii lúmenu každého pacienta a automaticky identifikuje lézie so stenózou väčšou

ako 30 % pomocou jasných vizuálnych značiek. Lekár môže zvoliť konkrétne segmenty cievy a naplánovať možnosti intervenčnej liečby (dilatácia, stenting) na základe závažnosti stenózy za účelom preskúmania rôznych liečebných stratégií napríklad s rôznymi dĺžkami stentu (**obrázok 8**). FFR-CT Planner efektívne prepočíta nové prietoky pozdĺž cievy, čo pomôže pri rozhodovaní o najvhodnejšej liečbe pre pacienta (veľkosť a dĺžka



Obrázok 5 FFR-CT LAD



Obrázok 6 Koronarografia LAD

stentu). Napriek jeho výhodám má FFR-CT Planner obmedzenia pri hodnotení ostiálnych lézií a ciev s lúmenom menším ako 1,8 mm, čo je dôležité zohľadniť pri jeho používaní (32).

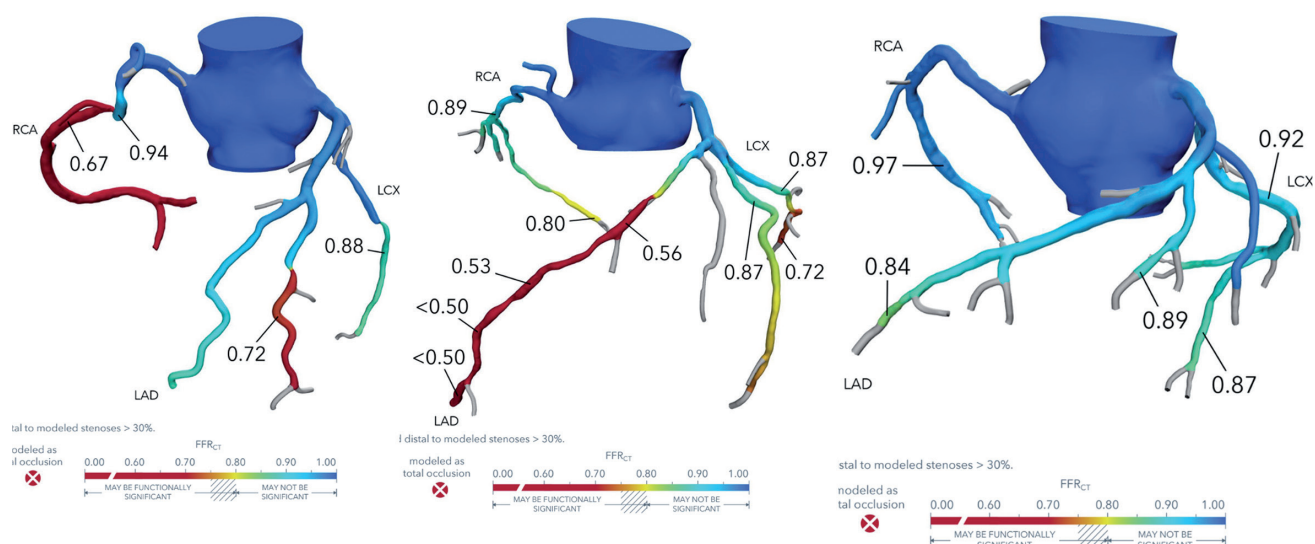
Odporúčania, klinické štúdie a FFR-CT

V súčasnosti je HeartFlow jedinou metodikou FFR-CT schválenou americkým Úradom pre kontrolu potravín a liečiv (FDA). Od roku 2017 National Institute for Health and Care Excellence (NICE) odporúča analýzu HeartFlow vo svojich usmerneniach k bolestiam na hrudníku ako bezpečnú metódu s vysokou diagnostickou presnosťou a redukciou invazívnych vyšetrení s efektívnejším využitím ekonomických nákladov. Podľa smerníc Európskej kardiologickej spoločnosti (ESC) z roku 2019 o chronických koronárnych syndrómoch je CCTA klasifikovaná ako odporúčanie 1. triedy na diagnostikovanie CAD u symptomatických pacientov (33). Okrem toho sa

FFR-CT môže použiť ako doplnok k CCTA na zlepšenie klinického rozhodovania.

American College of Cardiology (ACC) a American Heart Association (AHA) v posledných rokoch významne aktualizovali svoje usmernenia na hodnotenie a diagnostiku bolesti na hrudníku. Usmernenia z roku 2021 zdôrazňujú použitie CCTA v kombinácii s FFR-CT ako preferovanú začiatočnú stratégiu. Toto odporúčanie je silno podporené množstvom klinických štúdií, ktoré dokazujú, že tento prístup nielenže poskytuje lepšiu diagnostickú presnosť v porovnaní s inými neinvazívnymi testami, ale vedie aj k lepším dlhodobým výsledkom (34 – 36).

Štúdia, ktorá zdôrazňuje klinické a ekonomické výhody používania FFR-CT v Národnej zdravotnej službe (National Health System, NHS) ukazuje, že FFR-CT viedla k zmene manažmentu u 65 % pacientov, pričom 17 % funkčných zobrazovacích testov a 47 % diagnostických angiogramov bolo zrušených. Manažment riadený FFR-CT skrátil priemerný čas po definitívne vyšetrení na 28 ± 4 dni v porovnaní so 44 ± 4 dňami pre samotnú CCTA

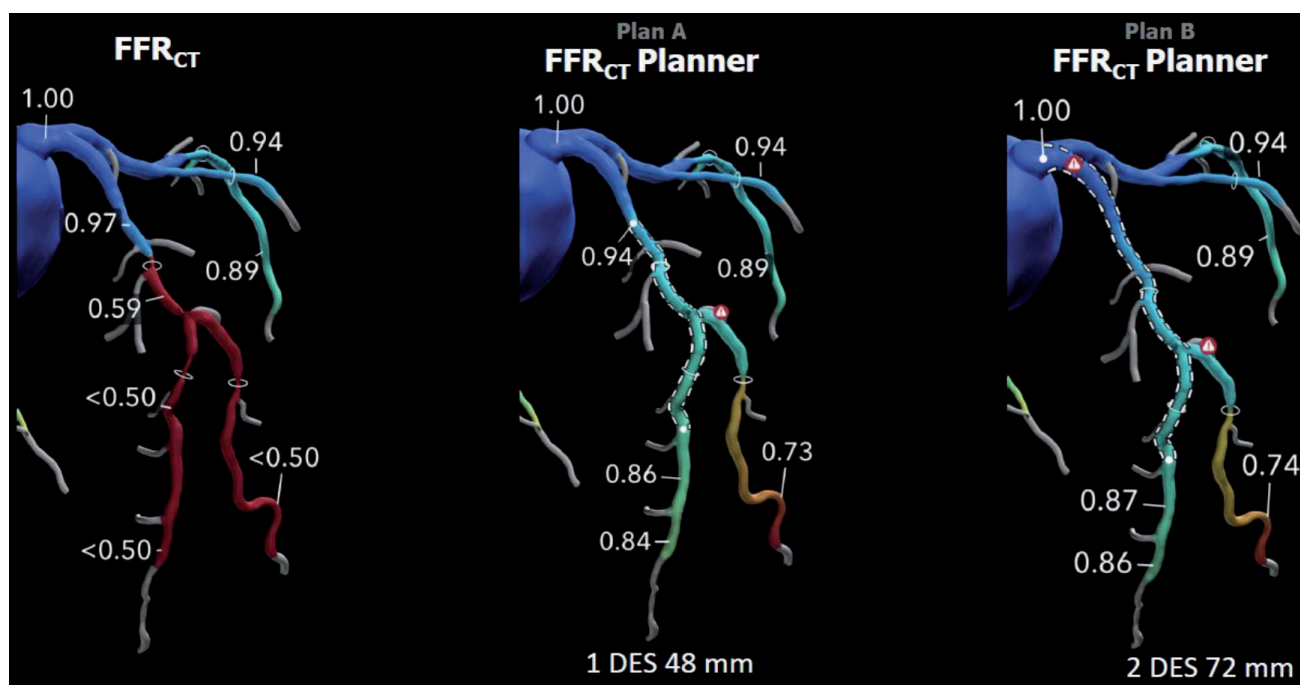


Obrázok 7 CAD

a redukoval dodatočné ekonomické náklady na pacienta pri použití CCTA s FFR-CT na stenózu 50 % alebo viac. Výhody v starostlivosti o pacienta a diagnostickej účinnosti majú potenciál znížiť celkové náklady. Prijatie FFR-CT môže viesť k rýchlejšim a relevantnejším rozhodnutiam

o liečbe, čo v konečnom dôsledku zlepši výsledky prežívania pacientov s kardiovaskulárnymi ochoreniami (37).

Randomizovaná kontrolovaná štúdia PRECISE bola zameraná na zníženie zbytočného testovania a odporúčaní na katetrizáciu u stabilných, symptomatických



Obrázok 8 FFR-CT Planner

pacientov s podozrením na ochorenie koronárnych artérií. Použitím minimálneho rizikového skóre PROMISE spolu s CT angiografiou a selektívnym CT meraním frakčnej prietokovej rezervy PRECISE preukázala efektívny prístup k hodnoteniu ischemickej choroby srdca, minimalizujúc zbytočné katetrizačné intervencie (38).

Jednoročné výsledky z registra ADVANCE FFR-CT preukazujú nízku mieru príhod u všetkých pacientov. Pacienti s negatívnymi výsledkami FFR-CT mali významne menšiu potrebu revaskularizácie a vykazovali zníženú mieru závažných nežiaducich kardiovaskulárnych príhod (MACE) a nižší výskyt úmrtia z kardiovaskulárnej príčiny alebo IM v porovnaní s pacientmi s abnormálnymi hodnotami FFR-CT (39). Utilizácia FFR-CT zlepšila odporúčania na liečbu pre dve tretiny účastníkov v porovnaní so samotnou CCTA. Táto metóda viedla k menšiemu počtu zbytočných invazívnych katetrizácií, presnejším predpovediam revaskularizácie (40).

Ďalšia štúdia zdôrazňuje dôležitosť používania CCTA v prvej línii v kombinácii so selektívnym testovaním FFR-CT. U pacientov so stredne závažnou koronárnou chorobou srdca FFR-CT účinne rozlišuje tých pacientov, ktorí nevyžadujú žiadne ďalšie testovanie ($\text{FFR-CT} > 0,80$) od pacientov s vyšším rizikom ($\text{FFR-CT} \leq 0,80$), ktorí môžu potrebovať invazívne koronarografické vyšetrenie a potenciálne intervencie. Táto stratégia zlepšuje starostlivosť o pacienta a zlepšuje využívanie zdrojov v kardiovaskulárnej diagnostike (41). Identifikácia všetkých lézií s hodnotou FFR-CT 0,8 alebo menej je účinnejšia ako identifikácia klinicky významnej stenózy na invazívnej koronarografii, čo sa preukázalo ako silný prediktor dlhodobých klinických výsledkov a slúži ako nezávislý prediktor. Normálna hodnota FFR-CT je spojená s priaznivou prognózou (42).

Štúdia, ktorá hodnotila diagnostickú presnosť FFR-CT a porovnávala ju s CCTA, SPECT a PET na diagnostiku ischemie preukázala, že metodika FFR-CT je superiorna v porovnaní s ostatnými metódami pri identifikácii ischemie. FFR-CT má významnú klinickú hodnotu vzhľadom na anatomický a hemodynamický význam koronárnych lézií (35). Práca (NXT Trial), ktorá porovnávala účinnosť neinvazívnej FFR-CT a invazívnej FFR na diagnostiku ischemie myokardu preukázala vysokú špecifickosť a senzitivitu. FFR-CT poskytuje vynikajúcu diagnostickú presnosť s ischemiou definovanou ako FFR-CT alebo $\text{FFR} \leq 0,80$ (43).

Záver

Rastúce akceptovanie a uplatňovanie FFR-CT v klinickej praxi zdôrazňuje jeho užitočnosť pri informovaní o liečebných stratégiách v celom spektre koronárnych ochorení. Táto integrácia nielenže zabezpečuje identifikáciu obštrukčných lézií s väčšou presnosťou – čo v konečnom dôsledku vedie k vyššej miere výskytu obštrukčnej CAD v katetrizačnom laboratóriu, ale aj z ekonomického hľadiska poskytuje veľmi efektívnu metódu. Okrem toho pokračujúci vývoj zobrazovacích techník prostredníctvom CT, ako je napríklad zavedenie novej technológie s ultravysokým rozlíšením (Photon Counting CT), poskytuje príležitosť na zlepšenie kvality obrazu a presnejšiu diagnostiku ochorenia koronárnych artérií u vysokorizikových pacientov. Tento pokrok je osobitne sľubný pre pacientov, ktorí boli predtým nespôsobilí na neinvazívny skrining. Začlenením týchto inovatívnych technológií do každodennej praxe môžu poskytovatelia zdravotnej starostlivosti výrazne zlepšiť výsledky pacientov a optimalizovať kardiovaskulárnu starostlivosť.

Klinické využitie FFR-CT predstavuje významný pokrok v neinvazívnej diagnostike, schopné poskytnúť detailné informácie o prietoku krvi v koronárnych cievach a ich funkčnej významnosti. Pre úspešné použitie FFR-CT je zásadné mať vysokokvalitné obrazové dáta z počítačovej tomografie. Kvalitný obraz zabezpečuje presnosť analýzy a následných terapeutických rozhodnutí. Použitím FFR-CT je možné identifikovať pacientov, ktorí sa nemusia podrobiť invazívnym procedúram, čím sa znižujú náklady na liečbu a hospitalizáciu. Tento prístup nielenže šetrí zdravotné náklady, ale aj minimalizuje riziko a nepohodlie pre pacientov, čo prispieva k efektívnejšiemu riadeniu zdravotnej starostlivosti. FFR-CT umožňuje lepšiu stratifikáciu pacientov podľa kardiovaskulárneho rizika a poskytuje ciele liečbu, čo môže viesť k lepším klinickým výsledkom. S rastúcim dôrazom na personalizovanú medicínu sa FFR-CT stáva dôležitým nástrojom v rozhodovacom procese pre pacienta, čím zlepšuje celkovú kvalitu zdravotnej starostlivosti o pacientov so srdcovými ochoreniami.

Skratky

AI – Artificial Intelligence/Umelá Inteligencia
AKS – akútny koronárny syndróm

CAA – anomálie koronárnych artérií

CAD – coronary artery disease/koronárna choroba srdca

CCTA – Coronary Computed Tomography Angiogram/
CT koronarografia

CFD – výpočtová dynamika tekutín/computational fluid
dynamics

CT – Computed Tomography/Počítačová tomografia

EKG – elektrokardiogram

FDA – Úrad pre kontrolu potravín a liečiv

FFR – Fractional Flow Reserve/frakčná prietoková
rezerva

FFR-CT HeartFlow – Fractional Flow Reserve Computed
Tomography /frakčná prietoková rezerva počítačová
tomografia

ICHS – ischemická choroba srdca

IM – infarkt myokardu

LAD/RIA, CX – left anterior descending/ramus interven-
tricularis anterior, circumflex

MACE – Major Adverse Cardiac Event/závažná nežiaduca
kardiovaskulárna príhoda

NHS – National Health System

NICE – National Institute for Health and Care Excellence

NSTEMI – non-ST segment elevation myocardial in-
farction

PET – Positron Emission Tomography/Pozitronová emisná
tomografia

RCA/PKA – right coronary artery/pravá koronárna
artéria

SCAD – spontánna disekcia koronárnej artérie

SKG – selektívna koronarografia

SPECT – jednofotónová emisná počítačová tomografia/
Single-Photon Emission Computed Tomography

STEMI-ST – segment elevation myocardial infarction

TCAD – traumatická disekcia koronárnej artérie

VF – fibrilácia komôr

Konflikt záujmov: Autori prehlasujú, že nemajú žiadny
konflikt záujmov.

Literatúra

- Curzen NP, Nolan J, Zaman AG, Nørgaard BL, Rajani R. Does the routine availability of CT-derived FFR influence management of patients with stable chest pain compared to CT angiography alone? The FFRCT RIPCORDER study. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2016;9:1188-1194.
- Douglas PS, De Bruyne B, Pontone G, Patel MR, Nørgaard BL, Byrne RA, et al. 1-Year Outcomes of FFRCT-Guided Care in Patients With Suspected Coronary Disease: The PLATFORM Study. *J Am Coll Cardiol*. 2016;68:435-445.
- Douglas PS, Pontone G, Hlatky MA, Patel MR, Nørgaard BL, Byrne RA, et al. Clinical outcomes of fractional flow reserve by computed tomographic angiography-guided diagnostic strategies vs. usual care in patients with suspected coronary artery disease: the prospective longitudinal trial of FFRCT: outcome and resource impacts study. *Eur Heart J*. 2015;36:3359-3367.
- Min JK, Taylor CA, Achenbach S, Koo BK, Leipsic J, Nørgaard BL, et al. Noninvasive Fractional Flow Reserve Derived From Coronary CT Angiography: Clinical Data and Scientific Principles. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2015;8:1209-1222.
- Taylor CA, Fonte TA, Min JK. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *J Am Coll Cardiol*. 2013;61:2233-2241.
- Tesche C, De Cecco CN, Albrecht MH, Duguay TM, Bayer RR, Litwin SE, et al. Coronary CT Angiography-derived Fractional Flow Reserve. *Radiology*. 2017;285:17-33.
- Gaemperli O, Maurovich-Horvat P, Nieman K, Pontone G, Pugliese F. *EACVI Handbook of Cardiovascular CT*: Oxford University Press; 2022.
- Fearon WF. Percutaneous coronary intervention should be guided by fractional flow reserve measurement. *Circulation*. 2014;129:1860-1860.
- Ntalianis A, Sels J-W, Davidavicius G, Tanaka N, Muller O, Trana C, et al. Fractional flow reserve for the assessment of nonculprit coronary artery stenoses in patients with acute myocardial infarction. *JACC: Cardiovascular Interventions*. 2010;3:1274-1281.
- Engstrøm T, Kelbæk H, Helqvist S, Høfsten DE, Kløvgård L, Holmvang L, et al. Complete revascularisation versus treatment of the culprit lesion only in patients with ST-segment elevation myocardial infarction and multivessel disease (DANAMI-3—PRIMULTI): an open-label, randomised controlled trial. *The Lancet*. 2015;386(9994):665-71.
- Layland J, Carrick D, McEntegart M, Ahmed N, Payne A, McClure J, et al. Vasodilatory capacity of the coronary microcirculation is preserved in selected patients with non-ST-segment-elevation myocardial infarction. *Circulation: Cardiovascular Interventions*. 2013;6:231-236.
- Beigel R, Oieru D, Goitein O, Chouraqui P, Konen E, Shamiss A, et al. Usefulness of routine use of multidetector coronary computed tomography in the “fast track” evaluation of patients with acute chest pain. *Am. J. Cardiol*. 2009;103:1481-1486.
- Gray AJ, Roobottom C, Smith JE, Goodacre S, Oatey K, O'Brien R, et al. The RAPID-CTCA trial (Rapid Assessment of Potential Ischaemic Heart Disease with CTCA)—a multicentre parallel-group randomised trial to compare early computerised tomography coronary angiography versus standard care in patients presenting with suspected or confirmed acute coronary syndrome: study protocol for a randomised controlled trial. *Trials*. 2016;17:1-13.
- Taylor CA, Fonte TA, Min JK. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive

- quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *JACC*. 2013;61:2233-2241.
15. Koo BK, Erglis A, Doh JH, Daniels DV, Jegere S, Kim HS, et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (Diagnosis of Ischemia-Causing Stenoses Obtained Via Noninvasive Fractional Flow Reserve) study. *J Am Coll Cardiol*. 2011;58:1989-1997.
 16. Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, Seneviratne S, Ko BS, Ito H, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next Steps). *J Am Coll Cardiol*. 2014;63:1145-1155.
 17. Hayes SN, Kim ESH, Saw J, Adlam D, Arslanian-Engoren C, Economy KE, et al. Spontaneous Coronary Artery Dissection: Current State of the Science: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 2018;137:e523-e557.
 18. Macaya F, Salinas P, Gonzalo N, Fernández-Ortiz A, Macaya C, Escaned J. Spontaneous coronary artery dissection: contemporary aspects of diagnosis and patient management. *Open Heart*. 2018;5:e000884.
 19. Upadhyaya SG, Nensey R, Elhosiény A, Connolly DL. Traumatic coronary artery dissection diagnosed immediately with cardiac CT. Making the difference with Live Image Guidance. *EMJ Int Cardiol*. 2020:39.
 20. Nehaj F, Connolly DL. Traumatická disekcia koronárnej artérie v športe: Využitie FFRCT a prehľad literatúry. *Cardiology Lett*. 2023;32:54-61.
 21. Prakash R, Starovoytov A, Heydari M, Mancini GB, Saw J. Catheter-Induced Iatrogenic Coronary Artery Dissection in Patients With Spontaneous Coronary Artery Dissection. *JACC Cardiovasc Interv*. 2016;9:1851-1853.
 22. Gentile F, Castiglione V, De Caterina R. Coronary Artery Anomalies. *Circulation*. 2021;144:983-996.
 23. Ghadri JR, Kazakauskaitė E, Braunschweig S, Burger IA, Frank M, Fiechter M, et al. Congenital coronary anomalies detected by coronary computed tomography compared to invasive coronary angiography. *BMC Cardiovascular Disorders*. 2014;14:1-10.
 24. Baumgartner H, De Backer J, Babu-Narayan SV, Budts W, Chessa M, Diller G-P, et al. 2020 ESC Guidelines for the management of adult congenital heart disease: The Task Force for the management of adult congenital heart disease of the European Society of Cardiology (ESC). Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC), International Society for Adult Congenital Heart Disease (ISACHD). *Eur Heart J*. 2021;42:563-645.
 25. Stout KK, Daniels CJ, Aboulhosn JA, Bozkurt B, Broberg CS, Colman JM, et al. 2018 AHA/ACC Guideline for the Management of Adults With Congenital Heart Disease: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *J Am Coll Cardiol*. 2019;73:1494-1563.
 26. Frommelt PC. Congenital coronary artery abnormalities predisposing to sudden cardiac death. *Pacing and Clinical Electrophysiology*. 2009;32:S63-S6.
 27. Tang CX, Lu MJ, Schoepf JU, Tesche C, Bauer M, Nance J, et al. Coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve in patients with anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary sinus. *Korean Journal of radiology*. 2020;21:192-202.
 28. Nielsen LH, Bøtker HE, Sørensen HT, Schmidt M, Pedersen L, Sand NP, et al. Prognostic assessment of stable coronary artery disease as determined by coronary computed tomography angiography: a Danish multicentre cohort study. *Eur Heart J*. 2017;38:413-421.
 29. Nørgaard BL, Hjort J, Gaur S, Hansson N, Bøtker HE, Leipsic J, et al. Clinical use of coronary CTA-derived FFR for decision-making in stable CAD. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2017;10:541-550.
 30. Nørgaard BL, Jensen JM, Blanke P, Sand NP, Rabbat M, Leipsic J. Coronary CT angiography derived fractional flow reserve: the game changer in noninvasive testing. *Current Cardiology Reports*. 2017;19:1-10.
 31. Nørgaard BL, Gormsen LC, Bøtker HE, Parner E, Nielsen LH, Mathiassen ON, et al. Myocardial perfusion imaging versus computed tomography angiography-derived fractional flow reserve testing in stable patients with intermediate-range coronary lesions: influence on downstream diagnostic workflows and invasive angiography findings. *JAHA*. 2017;6:e005587.
 32. Sonck J, Nagumo S, Nørgaard BL, Otake H, Ko B, Zhang J, et al. Clinical validation of a virtual planner for coronary interventions based on coronary CT angiography. *Cardiovascular Imaging*. 2022;15:1242-1255.
 33. Knuuti J, Wijns W, Saraste A, Capodanno D, Barbato E, Funck-Brentano C, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes: The Task Force for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J*. 2020;41:407-477.
 34. Members WC, Gulati M, Levy PD, Mukherjee D, Amsterdam E, Bhatt DL, et al. 2021 AHA/ACC/AASE/CHEST/SAEM/SCCT/SCMR guideline for the evaluation and diagnosis of chest pain: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *JACC* 2021;78:e187-e285.
 35. Driessen RS, Danad I, Stuijzfand WJ, Raijmakers PG, Schumacher SP, Van Diemen PA, et al. Comparison of coronary computed tomography angiography, fractional flow reserve, and perfusion imaging for ischemia diagnosis. *JACC*. 2019;73:161-173.
 36. Karády J, Mayrhofer T, Ivanov A, Foldyna B, Lu MT, Ferencik M, et al. Cost-effectiveness analysis of anatomic vs functional index testing in patients with low-risk stable chest pain. *JAMA network open*. 2020;3:e2028312-e.
 37. Graby J, Metters R, Kandan S, McKenzie D, Lowe R, Carson K, et al. Real-world clinical and cost analysis of CT coronary angiography and CT coronary angiography-derived fractional flow reserve (FFRCT)-guided care in the National Health Service. *Clinical Radiology*. 2021;76:862.e19-862.e28.
 38. Douglas PS, Nanna MG, Kelsey MD, Yow E, Mark DB, Patel MR, et al. Comparison of an initial risk-based testing strategy vs usual testing in stable symptomatic patients with suspected

- coronary artery disease: the PRECISE randomized clinical trial. *JAMA cardiology*. 2023;8(10):904-14.
39. Patel MR, Nørgaard BL, Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, Berman DS, et al. 1-Year impact on medical practice and clinical outcomes of FFRCT: the ADVANCE registry. *Cardiovascular Imaging*. 2020;13(1_Part_1):97-105.
40. Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, Nørgaard BL, Berman DS, Raff G, et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve: lessons from the ADVANCE Registry. *Eur Heart J*. 2018;39:3701-3711.
41. Nørgaard BL, Terkelsen CJ, Mathiassen ON, Grove EL, Bøtker HE, Parner E, et al. Coronary CT angiographic and flow reserve-guided management of patients with stable ischemic heart disease. *J Am Coll Cardiol*. 2018;72:2123-2134.
42. Ihdayhid AR, Norgaard BL, Gaur S, Leipsic J, Nerlekar N, Osawa K, et al. Prognostic Value and Risk Continuum of Noninvasive Fractional Flow Reserve Derived from Coronary CT Angiography. *Radiology*. 2019;292:343-351.
43. Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, Seneviratne S, Ko BS, Ito H, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next Steps). *JACC*. 2014;63:1145-1155.