

A foton számláló CT-technológia szerepe a pulmonalis kórképek kimutatásában

Rédei Mátyás dr. ■ Gurza Kriszta Beáta dr.
 Maurovich-Horvat Pál dr. ■ Marton Nikolett dr. 

Semmelweis Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Képző Klinika, Radiológia Tanszék, Budapest

A mellkasi komputertomográfia a pulmonalis betegségek diagnosztikájának alapvető képalkotó módszere. A hagyományos, energiaintegráló detektorral működő rendszerek azonban fizikai korlátokkal rendelkeznek: a térbeli felbontás limitált, az elektronikus zaj jelenléte, valamint a kis dózisu vizsgálatok során romló képminőség egyes klinikai helyzetekben csökkentheti a diagnosztikus pontosságot. A foton számláló detektoros komputertomográfia új technológiai megközelítést képvisel, amely az egyes röntgenfotonok egyedi detektálásán és energiaszint szerinti osztályozásán alapul. Ennek köszönhetően javul a dózishatékonyság, csökken a képzaj, nő a térbeli felbontás, és egyetlen adatgyűjtésből spektrális információ is nyerhető. A jelen összefoglaló célja a foton számláló detektoros komputertomográfia szerepének áttekintése a pulmonalis képalkotásban. A rendelkezésre álló irodalmi adatok alapján a technológia különösen előnyös a kis méretű pulmonalis nodulusok, a subsolid és tejüveghomályos elváltozások, valamint az interstitialis tüdőbetegségek finom morfológiai jeleinek megjelenítésében. Emellett részletesebb ábrázolást tesz lehetővé infektív, vascularis és traumás eredetű eltérések esetén is. A spektrális képalkotás – beleértve a virtuális monoenergetikus rekonstrukciókat és a jódtérképeket – kiegészítő funkcionális információt nyújthat a perfúziós viszonyokról, a szöveti karakterizálásról és a terápiás válasz megítéléséről. A módszer intervenciók alkalmazásakor szintén ígéretes, mivel javíthatja a célzott eltérések és a beavatkozó eszközök környezetének megítélését. Összességében a foton számláló detektoros komputertomográfia jelentős technológiai előrelépést képvisel a tüdőképzőben. Széles körű elterjedését jelenleg még korlátozza a hozzáférhetőség, a költségek, valamint az eltérő rendszerek közötti összehasonlíthatóság kérdése. A jelenlegi adatok alapján azonban várható, hogy a módszer a jövőben egyre meghatározóbb szerepet tölt be a pulmonalis diagnosztikában.

Orv Hetil. 2026; 167(30): 1186–1198.

Kulcsszavak: foton számláló CT, CT-technológia, spektrális képalkotás, tüdőtumor, pneumonia, trauma

The role of photon-counting CT technology in the detection of pulmonary diseases

Computed tomography of the chest is a cornerstone imaging modality in the diagnosis of pulmonary diseases; however, conventional systems based on energy-integrating detectors have inherent physical limitations, including restricted spatial resolution, electronic noise, and reduced image quality at low radiation doses, which may compromise diagnostic accuracy in certain clinical scenarios. Photon-counting detector computed tomography represents a novel technological approach based on the individual detection and energy discrimination of incoming X-ray photons. This enables improved dose efficiency, reduced image noise, higher spatial resolution, and intrinsic spectral imaging from a single acquisition. The aim of this review is to provide an overview of the role of photon-counting detector computed tomography in pulmonary imaging. Based on the available literature, this technology offers particular advantages in the detection and characterization of small pulmonary nodules, subsolid and ground-glass lesions, as well as in the assessment of fine morphological features of interstitial lung diseases. In addition, it improves the visualization of infectious, vascular, and traumatic pulmonary abnormalities. Spectral imaging capabilities, including virtual monoenergetic reconstructions and iodine maps, provide additional functional information on tissue perfusion, lesion characterization, and treatment response. The technique also shows promise in interventional applications by improving the visualization of target lesions and interventional devices. Photon-counting detector computed tomography represents a significant technological advancement in lung imaging. However, its widespread clinical implementation is currently limited by restricted availability, high costs, and challenges related to inter-system comparability. Nevertheless, current evidence suggests that this technology will play an increasingly important role in pulmonary diagnostics in the future.

Keywords: photon-counting detector CT, CT technology, spectral imaging, lung tumor, pneumonia, trauma

Rédei M, Gurza KB, Maurovich-Horvat P, Marton N. [The role of photon-counting CT technology in the detection of pulmonary diseases]. *Orv Hetil.* 2026; 167(30): 1186–1198.

(Beérkezett: 2026. március 30.; elfogadva: 2026. április 29.)

Rövidítések

COVID-19 = (coronavirus disease 2019) koronavírus-betegség 2019; CT = (computed tomography) komputertomográfia; CTD-ILD = (connective tissue disease-related ILD) kötőszöveti betegséghez társuló ILD; CTEPH = (chronic thromboembolic pulmonary hypertension) krónikus thromboemboliás pulmonalis hipertensio; DE-CT = (dual-energy CT) kettős energiájú CT; EID-CT = (energy-integrating detector CT) energiaintegráló detektoros CT; ILD = (interstitial lung disease) interstitialis tüdőbetegség; NSIP = nem specifikus interstitialis pneumonia; PCD-CT = (photon-counting detector computed tomography) fotonszámláló detektoros CT; ROI = (region of interest) vizsgálati régió; UIP = (usual interstitial pneumonia) szokásos interstitialis pneumonia

A mellkasi komputertomográfia (CT) napjainkban a pulmonalis kórképek diagnosztikájának legfontosabb képalakító módszere, amely gyors elérhetősége, kiváló térbeli felbontása és széles körű klinikai alkalmazhatósága miatt alapvető szerepet tölt be mind a sürgősségi, mind az elektív ellátásban. A CT-technológia az elmúlt évtizedekben folyamatos fejlődésen ment keresztül, amelynek eredményeként javult az időbeli és térbeli felbontás, csökkent a sugárterhelés, valamint új rekonstrukciók és anyagmeghatározási lehetőségek váltak elérhetővé, mint például a jódterképek, a virtuális natív képek és egyéb anyagspecifikus rekonstrukciók, amelyek a különböző szövetek és kontrasztanyagok elkülönítését is lehetővé teszik [1, 2]. Ennek ellenére a hagyományos, energiaintegráló detektorral működő CT-rendszerek (energiaintegráló detektoros CT, EID-CT) bizonyos alapvető fizikai és technológiai korlátai továbbra is fennállnak.

A hazai adatok is alátámasztják, hogy a képalakító vizsgálatok száma és komplexitása jelentősen növekedett az elmúlt években, különösen a CT-diagnosztika területén [3]. Ugyanakkor a vizsgálatok indikációjának megfelelő megválasztása és racionalizálása kulcsfontosságú a diagnosztikus hatékonyság és a betegbiztonság fenntartása szempontjából [4].

Az EID-CT-készülékekben a detektorok az érkező röntgenfotonok energiáját összegezve alakítják elektromos jellé, ami elektronikus zaj jelenlétével, a kis energiájú fotonok nem optimális súlyozásával, valamint korlátozott dózishatékonysággal jár [1, 5]. Ezek a tényezők különösen kis dózisu vizsgálatok esetén, illetve finom pulmonalis struktúrák ábrázolásakor befolyásolhatják kedvezőtlenül a képminőséget. A sugárkeményedési és fémes műtermékek további limitációt jelentenek, amelyek bizonyos klinikai helyzetekben csökkenthetik a diagnosztikus megbízhatóságot.

A spektrális CT-technológiák – különösen a kettős energiájú CT (DE-CT) – részben áthidalják ezeket a korlátokat azáltal, hogy eltérő energiájú röntgenspektrumok alkalmazásával anyagspecifikus információt tettek elérhetővé, például virtuális monoenergetikus képek és jódterképek formájában [5, 6]. Ugyanakkor a DE-CT spektrális teljesítménye továbbra is korlátozott, mivel az energiaintegráló detektorok nem képesek az egyes röntgenfotonok energiaszint szerinti elkülönítésére, így csak közvetett módon szolgáltatnak spektrális információt [6].

A fotonszámláló detektoros CT (fotonszámláló CT, PCD-CT) megjelenése alapvető technológiai paradigmaváltást jelent a CT-képalakításban. A fotonszámláló detektorok direkt konverzió alapuló félvezető kristályokat alkalmaznak, amelyek lehetővé teszik az egyes röntgenfotonok egyedi regisztrálását és energiaszintjük meghatározását előre definiált küszöbértékek alapján [7, 8]. A hagyományos energiaintegráló detektorokkal összehasonlítva a PCD-k működési elve alapvetően eltér. Míg az energiaintegráló detektorok a beérkező fotonok összenergiáját mérik, addig a fotonszámláló detektorok az egyes röntgenfotonokat külön-külön detektálják, és azok energiáját is meghatározzák. Az energiaküszöbök alkalmazása lehetővé teszi a beérkező fotonok energiatartomány szerinti osztályozását (energy binning), amely révén több energiasávban történő adatgyűjtés valósítható meg egyetlen akvizíció során. Ez intrinszik spektrális információt biztosít, amely lehetővé teszi anyagspecifikus rekonstrukciók – például jódterképek és virtuális monoenergetikus képek – előállítását, amelyekkel elősegítik a perfúziós viszonyok vizualizálását. A direkt konverzió következtében a szcintillátoralapú rendszerekre jellemző fényterjedési szóródás hiányzik, így kisebb detektorelem-méret alkalmazható, ami javítja a térbeli felbontást, és csökkenti a parciális volumenhatást. Mindezek együttesen hozzájárulnak a kontraszt-zaj arány javulásához és a kvantitatív képalakítási lehetőségek bővüléséhez. Ennek eredményeként az elektronikus zaj jelentős része kiszűrhető, ami javítja a dózishatékonyságot, és különösen előnyös kis dózisu vizsgálatok során [6, 7, 9].

A PCD-CT-technológia egyik meghatározó előnye a nagyobb térbeli felbontás lehetősége. A kisebb detektorelem-méret – klinikai rendszerekben akár 0,15–0,27 mm effektív pixelméret – ultranagy felbontású képalakítást tesz lehetővé anélkül, hogy ez a geometriai dózishatékonyság romlásával járna [7, 10]. Klinikai mérések igazolták, hogy a PCD-CT-rendszerek jelenleg a legjobb 'in-plane' (síkbeli) és longitudinális térbeli felbontást biztosítják, ami a kisebb detektorelem-méretnek és a di-

rekt konverziós detektálásból adódó, csökkent jelterjedési szóródásnak köszönhető, ezáltal mérsékelve a parciális volumenhatást is [10].

A PCD-CT további lényeges sajátossága az intrinszc spektrális képalkotás. Mivel az egyes fotonok energiaszint szerint osztályozhatók, a spektrális információ a vizsgálat során folyamatosan rendelkezésre áll, külön dedikált kettős energiájú akvizíció nélkül. Ez lehetővé teszi virtuális monoenergetikus képek, virtuális natív rekonstrukciók és anyagspecifikus térképek – elsősorban jódtérképek – előállítását egyetlen adatgyűjtésből [11, 12]. A spektrális felbontás javulása kedvezően befolyásolja a kontraszt-zaj arányt, csökkenti a sugárkeményedési műtermékeket, és pontosabb anyagkvantifikációt tesz lehetővé [6].

A modern PCD-CT-rendszerekben a fotonszámláló detektorokat kifejezetten e technológiához fejlesztett iteratív rekonstrukciós algoritmusok egészítik ki, amelyek a megnövekedett adatkomplexitás és spektrális információ hatékony feldolgozását teszik lehetővé, miközben megőrzi a térbeli felbontást, és tovább csökkentik a zajszintet [6, 10].

A tüdőképalkotás különösen alkalmas terület a PCD-CT-technológia előnyeinek kihasználására. A pulmonalis parenchyma alacsony denzitása, a finom anatómiai struktúrák, valamint a másodlagos tüdőlebeny szintjén megjelenő eltérések nagy térbeli és kontrasztfelbontást igényelnek a pontos morfológiai értékeléshez [11, 13]. A klinikai gyakorlatban elérhető első PCD-CT-rendszerek vizsgálatai igazolták, hogy a PCD-CT javítja a légutak, az interstitialis eltérések és a pulmonalis érstruktúrák ábrázolását, miközben a sugárterhelés azonos vagy kisebb mértékű marad a hagyományos EID-CT-vizsgálatokhoz képest [10, 12].

A PCD-CT klinikai bevezetése 2021 óta fokozatosan zajlik, és az elmúlt években egyre növekvő számú preklinikai és klinikai tanulmány számolt be a technológia potenciális előnyeiről a mellkasi képalkotás területén [6]. A jelen összefoglaló közlemény célja a PCD-CT-technológia szerepének áttekintése a pulmonalis kórképek képalkotásában, különös tekintettel azokra a klinikai indikációkra, amelyeknél a módszer a hagyományos CT-technikákhoz képest potenciális diagnosztikai hozzáadott értéket képvisel.

Tumorer

A pulmonalis daganatok és nodularis elváltozások képalkotásában a PCD-CT-technológia megjelenése új lehetőségeket nyitott a detektálás, a morfológiai karakterizálás és a terápiás utánpótlás területén. A PCD-CT alapvető technikai sajátosságai – az ultranagy térbeli felbontás, az alacsony zajszint és a spektrális képalkotás – különösen jól illeszkednek a pulmonalis tumorok diagnosztikus igényeihez, amelyeknél gyakran kis méretű, finom szerkezetű elváltozások megítélésére van szükség [11].

Pulmonalis nodulusok kimutatása

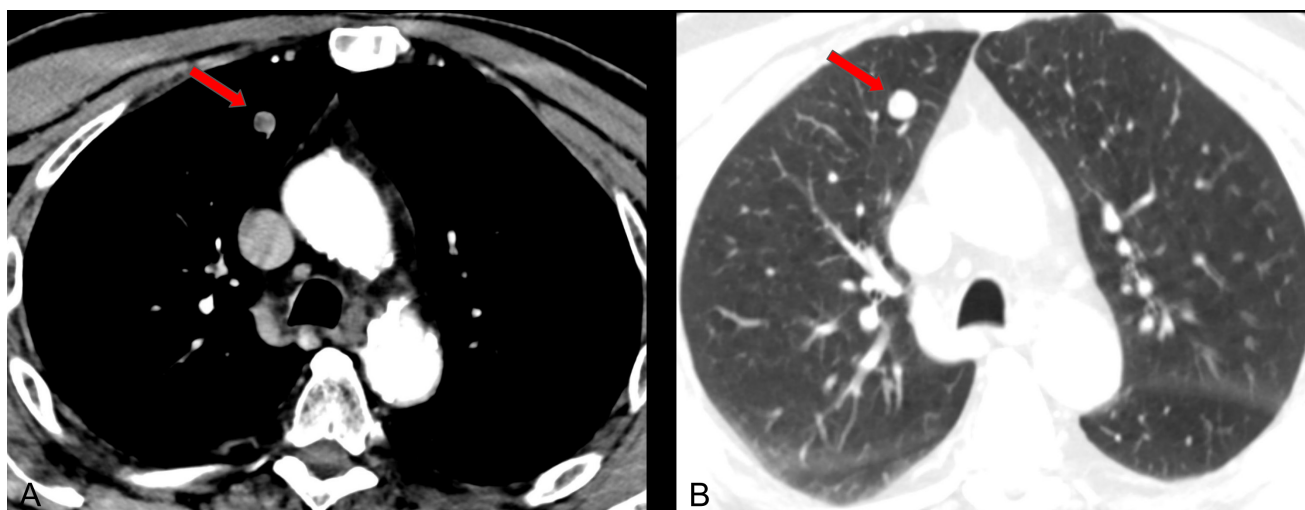
A pulmonalis nodulusok kimutatása és pontos jellemzése a PCD-CT egyik legfontosabb klinikai alkalmazási területe. A fotonszámláló detektorok kisebb pixelmérete és a zaj hatékony kiszűrése lehetővé teszi a nodulus-parenchyma határ élesebb megjelenítését, ami különösen 5 mm alatti solid nodulusok esetén bír klinikai jelentőséggel [10]. Intraindividuális összehasonlító vizsgálatok alapján PCD-CT alkalmazásával javul a kis nodulusok detektálhatósága, és csökken a parciális volumenhatás, miközben az effektív sugárdózis azonos vagy kisebb marad a hagyományos CT-vizsgálatokhoz képest [14].

A 'low-dose' (kis dózisu) CT-alapú tüdőrákszűrés hatékonyságát hazai adatok is alátámasztják, amelyek szerint a korai stádiumú daganatok kimutatása és a mortalitáscsökkenés szempontjából kulcsfontosságú a dózis-optimalizált vizsgálati protokollok alkalmazása [15]. A fotonszámláló CT-technológia tovább bővíti ennek lehetőségeit, mivel a zajcsökkentés és a nagyobb dózis-hatékonyság révén még kisebb dózisu vizsgálati protokollok megvalósítását teszi lehetővé, a diagnosztikus képminőség megtartása mellett.

A PCD-CT-technológia előnye nemcsak a kimutatásban, hanem a nodulusok reprodukálható mérésében is megjelenik. A pontosabb kontúrmegjelenítés hozzájárulhat a növekedés megbízhatóbb követéséhez, ami a jelenlegi irányelvek szerint a malignitási kockázat megítélésének egyik kulcseleme. A jelenlegi irányelvek szerint <6 mm-es pulmonalis nodulusok esetén általában nem szükséges rutinszerű rövid távú kontroll, azonban nagyobb méret, gyanús morfológia vagy emelkedett klinikai kockázat esetén rövid távú, akár 3 hónapos CT-kontroll mérlegelendő [14]. A követési stratégia alapvetően a nodulus méretén, morfológiai jellemzőin és a beteg egyéni kockázati tényezőin alapul, amelyet a PCD-CT nagyobb térbeli felbontása révén pontosabb kezdeti karakterizálás támogathat [16].

Benignus pulmonalis laesiók

A pulmonalis nodulusok jelentős része benignus eredetű, ezért a pontos morfológiai karakterizálás kulcsfontosságú a felesleges invazív beavatkozások elkerülésében. A PCD-CT nagy térbeli felbontása és csökkent parciális volumenhatása révén javítja a sima kontúrú, homogén szerkezetű elváltozások felismerését, valamint a finom denzitáskülönbségek megítélését [10, 14]. Különösen fontos a pulmonalis hamartómák azonosítása, amelyeknél a laesión belüli zsír jelenléte erősen specifikus benignitásra utal, és megfelelő esetben elkerülhetővé teheti a további invazív diagnosztikát. A PCD-CT pontosabb denzitásmegjelenítése elősegítheti a kis mennyiségű zsír kimutatását is, ami atípusos megjelenésű nodulusok esetén különösen hasznos. Emellett a spektrális információ – különösen a jódtérképezés – kiegészítő szerepet játszik



1. ábra

(A) Axialis síkú PCD-CT natív lágyrésztáblakos kép. Jobb oldalon paramediastinalisan zsírdenzitász, kerekded képlet – hamartoma (nyíl). (B) Axialis síkú PCD-CT natív tüdőablakos kép, jobb oldalon hamartoma (nyíl)

PCD-CT = fotonaszámoló detektoros komputertomográfia

hat, mivel a benignus laesiók általában kisebb vagy inhomogénebb halmozást mutatnak a malignus tumorokhoz képest [6, 14] (1. ábra).

Subsolid és tejüvegkomályos nodulusok

A subsolid és tejüvegkomályos nodulusok értékelése különösen nagy kihívást jelent, mivel ezek gyakran lassan növekvő adenocarcinomáknak vagy azok előalakjainak felelnek meg. A PCD-CT által biztosított ultranagy térbeli felbontás lehetővé teszi a finom morfológiai jegyek – így a solid komponens megjelenésének vagy növekedésének – korábbi észlelését, ez az invazivitás egyik legfontosabb prediktora [17].



2. ábra

(A) Axialis síkú PCD-CT tüdőablakos kép. A jobb felső lebenyben 5 mm-es subpleuralis solid nodulus (nyíl). (B) Axialis síkú PCD-CT tüdőablakos kép. A bal alsó lebenyben halvány tejüvegkomályos 5 mm-es kerekded nodulus (nyíl)

PCD-CT = fotonaszámoló detektoros komputertomográfia

A subsolid és tejüvegkomályos nodulusok értékelésében a PCD-CT különösen előnyös, mivel a finom denzitáskülönbségek és a laesiók pontos határai nagyobb biztonsággal ítéltethetők meg, ami a korai invazív komponens felismerését is segítheti (2. ábra).

Wang és Huang vizsgálata szerint PCD-CT alkalmazásával a subsolid nodulusok karakterizálása szignifikánsan pontosabb volt, mint az azonos napon végzett EID-CT esetében, miközben a sugárterhelés csökkenése is kimutatható volt [17]. Ezek az eredmények alátámasztják a PCD-CT potenciális szerepét a sebészi döntéshozatal és a szoros utánkövetést igénylő nodulusok ellátásában.

A PCD-CT klinikai előnye jól demonstrálható kis méretű pulmonalis nodulusoknál, amelyek esetében a jobb térbeli felbontás révén a halvány tejüvegkomályok és a subpleuralis solid nodulusok is megbízhatóan ábrázolhatók (2. ábra).

Morfológiai karakterizálás és bronchovascularis kapcsolatok

A PCD-CT kisebb detektorelem-mérete csökkenti a parciális volumenhatást, ami javítja a pulmonalis tumorok felszíni morfológiájának, spiculációjának és a környező bronchovascularis struktúrákkal való kapcsolatának megítélését [8, 10]. A distalis bronchusok és kiserek részletgazdagabb ábrázolása hozzájárulhat a lokális terjedés pontosabb értékeléséhez, valamint segítheti a differenciáldiagnosztikát bizonyos benignus elváltozásokkal szemben.

Jódtérkép és spektrális információ

A PCD-CT egyik legjelentősebb hozzáadott értéke a pulmonalis tumorok képalkotásában a spektrális képalkotás, különösen a jódtérképezés lehetősége. A kont-

rasztanyagok vizsgálatok során nyert adatokból anyag-dekompozíciós algoritmusok segítségével a jódt elkülöníthető a környező lágyrészekről, lehetővé téve a jódeeloszlás kvantitatív megjelenítését. Az így létrehozott jódtérképek a tüdő perfúziós viszonyait tükrözik, és egyetlen akvizíció során biztosítanak morfológiai és funkcionális információt. A jódtérkép a daganatos elváltozások kontrasztanyag-halmozását vizuálisan és kvantitatívan is ábrázolja, így kiegészítő információt nyújt a pusztán morfológiai értékeléshez képest [6, 12].

PCD-CT-vel végzett vizsgálatok alapján a malignus pulmonalis tumorok általában nagyobb és homogénebb jódkoncentrációt mutatnak, míg a benignus nodulusok vagy fibroticus elváltozások halmozása kisebb mértékű vagy inhomogén lehet [14]. A jódtérképezés különösen hasznos lehet olyan esetekben, amikor a nodulus morfológiai jegyei nem egyértelműek, illetve posztterápiás állapotokban a residualis tumor és a hegesezés elkülönítésére.

A morfológiai képeken azonosított térfoglaló elváltozások funkcionális értékelése jódtperfúziós rekonstrukciók segítségével pontosítható. Egy jobb alsó lebenyi peribronchovascularis térfoglaló képlet esetében a jódtperfúziós képen hiányzó perfúzió ábrázolódik, amely a laesio vascularisatiójára és biológiai viselkedésére utal (3. ábra).

A virtuális monoenergetikus képek alkalmazása PCD-CT-ben alacsony keV-értékeken fokozza a kontrasztanyag jelintenzitását, ezáltal javítja a kontraszt-zaj arányt, és elősegíti a tumor–parenchyma kontraszt növelését, különösen a kis méretű vagy kis denzitáskülönbségű kontraszthalmozó laesiók pontosabb elkülönítését. Nagyobb energiájú rekonstrukciók alkalmazásával egyidejűleg csökkenthetők a sugárkeményedési és fémes műtermékek, ami komplex onkológiai és posztoperatív betegek esetében klinikailag releváns előnyt jelenthet [6].

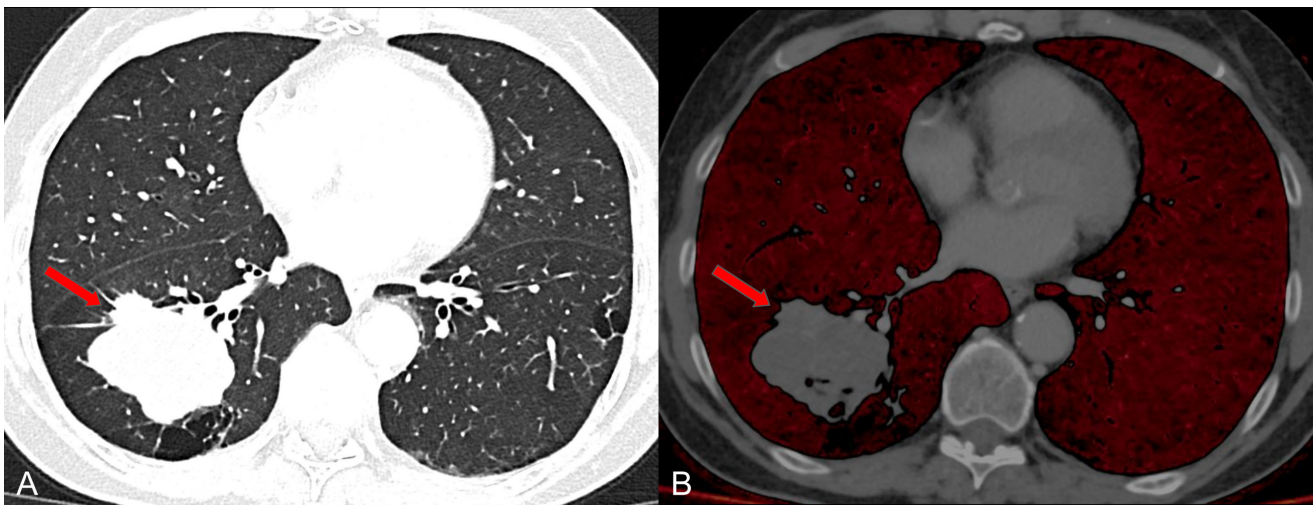
Terápiás válasz és utánkövetés

A daganatos betegek utánkövetése során a PCD-CT által biztosított pontosabb volumenmérés és a jódtérképen követhető halmozásváltozás érzékenyebb markere lehet a biológiai válasznak, mint a kizárólag méretalapú kritériumok [12, 14]. Emellett a jobb dózishatékonyság miatt a PCD-CT különösen alkalmas lehet hosszú távú onkológiai utánkövetésre, amelynél a kumulatív sugárterhelés csökkentése kiemelt jelentőségű.

Infektív eredetű gyulladások

Az infektív eredetű pulmonalis kórképek CT-megjelenése gyakran heterogén, finom morfológiai eltérésekből áll, amelyek felismerése hagyományos EID-CT-vel – különösen kis dózisu protokollok alkalmazása esetén – diagnosztikus kihívást jelenthet. A PCD-CT ultranagy térbeli felbontása és a parciális volumenhatás csökkentése révén lényegesen javítja a kis légúti és interstitialis érintettséghez társuló eltérések ábrázolhatóságát, így pontosabb morfológiai karakterizálást tesz lehetővé [6, 7, 10].

Ennek klinikai jelentősége különösen olyan infekciós folyamatok esetén hangsúlyos, amelyeknél a 'tree-in-bud' (rügyező fa) mintázat, finom reticulatio, bronchiolectasia vagy apró cavitációk dominálnak. Ezek az eltérések gyakran részben vagy teljesen elfedve maradnak EID-CT-vel, elsősorban a korlátozott térbeli felbontás és a voxelen belüli szövettani heterogenitásból adódó parciális volumenhatás miatt. A PCD-CT kisebb effektív detektorpixel-mérete és kedvezőbb zajtulajdonságai révén ezek a finom struktúrák nagyobb kontraszttal és élesebben ábrázolhatók, ami közvetlen hatással van a diagnosztikus bizonyosságra és a terápiás döntéshozatalra [1, 6, 7].

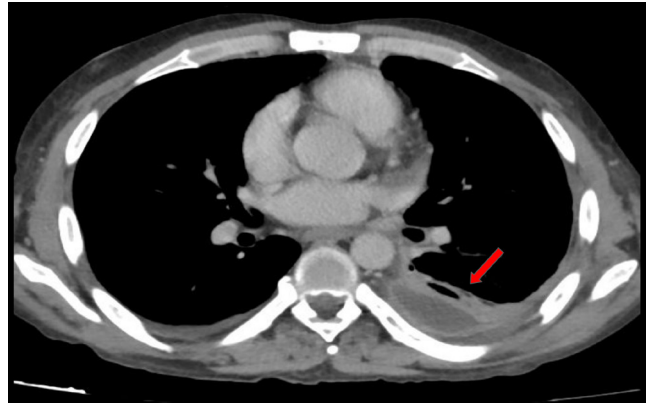


3. ábra (A) Axialis síkú PCD-CT vénás fázisú, tüdőablakos kép. A jobb alsó tüdőlebenyben peribronchovascularis, egyenetlen kontúrú solid terime (nyíl). (B) Axialis síkú PCD-CT, spektrális információ alapuló jódtperfúziós kép. A térfoglaló képlet területén hiányzó perfúzió (nyíl)

PCD-CT = fotonyszámoló detektoros komputertomográfia

A PCD-CT előnye jól demonstrálható posztinfekciós állapotokban is, különösen COVID-19-et követően fennálló perzisztáló pulmonalis eltérések esetén. Intraindividuális, azonos napon végzett összehasonlító vizsgálatok igazolták, hogy PCD-CT-vel az EID-CT-n tejüveg-homályként értelmezett területek egy részében finom reticularis eltérések és bronchiolectasiák azonosíthatók. Ezek a morfológiai jelek korai, potenciálisan irreverzibilis parenchymás károsodásra utalhatnak, amelyek felismerése az infekció utáni állapot pontos megítélése és a betegkövetés szempontjából is kulcsfontosságú [18].

A PCD-CT spektrális képalkotási képessége további diagnosztikus többletet biztosít az infektiós eltérések értékelésében. A virtuális monoenergetikus képek javítják a kontrasztérzékenységet, míg a jódtérkép lehetővé teszi a gyulladásos területek kontrasztanyag-halmozásának és perfúziós viszonyainak funkcionális megítélését. Tejüveg-homályok és konszolidációk esetében a jódtérkép segíthet elkülöníteni az aktív gyulladásos komponenseket a residualis, inaktív vagy fibroticus eltérésektől. Aktív gyulladásos konszolidációkban a jódtérképen rendszerint fokozott jódfelvétel figyelhető meg, míg a posztinfekciós, inaktív residualis eltérések általában nem vagy csak minimális halmozást mutatnak, ezáltal a jódtérkép



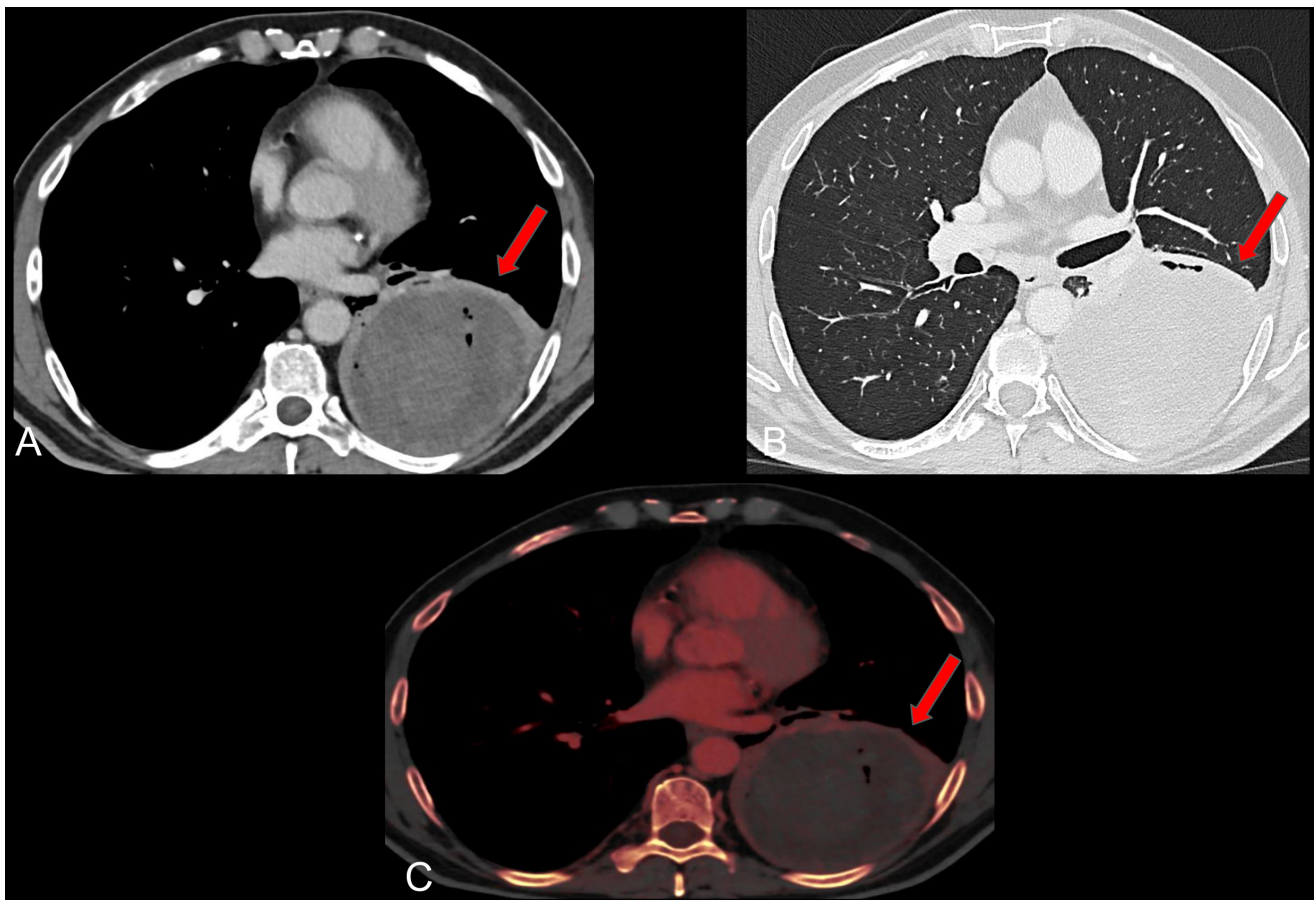
4. ábra

Axiális síkú PCD-CT-kép. Bal oldalon a pleuralis térben vaskos fallal rendelkező hypodens folyadékgyülem megvastagodott falú pleuralemezekkel, levegőzáránnyal (nyíl) – empyema

PCD-CT = fotonszámláló detektoros komputertomográfia

funkcionális kiegészítő információt nyújt a morfológiai CT-megítéléshez [12, 19].

A PCD-CT-vel készült virtuális monoenergetikus képek és a jódtérkép javítja a pleuralis empyema diagnosztikus pontosságát, mivel lehetővé teszik a pleuralis megvastagodások, septumok és a parietalis pleura halmo-



5. ábra

Axiális síkú PCD-CT-kép lágyrész- (A) és tüdőablakkal (B). Bal oldalon a tüdőparenchymában vaskos fallal rendelkező inhomogén folyadékgyülem, levegőzáránnyal (nyíl) – tályogra típusos megjelenés. (C) Axiális síkú PCD-CT spektrális kép a bal alsó lebenyi pulmonalis tályogról

PCD-CT = fotonszámláló detektoros komputertomográfia

zásának direkt vizualizációját. Ez elősegíti az empyema elkülönítését a nem gyulladásos eredetű pleurális folyadékgyülemektől, és különösen értékes lehet olyan klinikai helyzetekben, amelyeknél a drenálhatóság vagy az invazív beavatkozás indikációja kérdéses [20] (4. ábra). Hasonlóan, pulmonális tályog esetén a vastag falú, inhomogén folyadéktartalmú képlet és a kísérő levegőzárványok részletgazdagabban ábrázolhatók, míg a spektrális képek kiegészítő információt nyújthatnak a laesio szerkezetéről és elkülönítéséről (5. ábra).

Végül a PCD-CT kedvező dózishatékonysága lehetővé teszi 'ultra-low-dose' (ultrakis dózisú) protokollok alkalmazását is, amelyek pneumonia gyanúja esetén diagnosztikus értékű információval szolgálhatnak. Ez különösen releváns a sürgősségi ellátásban és utánkötés során, amikor a klinikai kérdés az infekció jelenlétének vagy hiányának, illetve kiterjedésének változásának eldöntésére korlátozódik, és a sugárterhelés minimalizálása kiemelt szempont [6, 10].

Interstitialis tüdőbetegségek

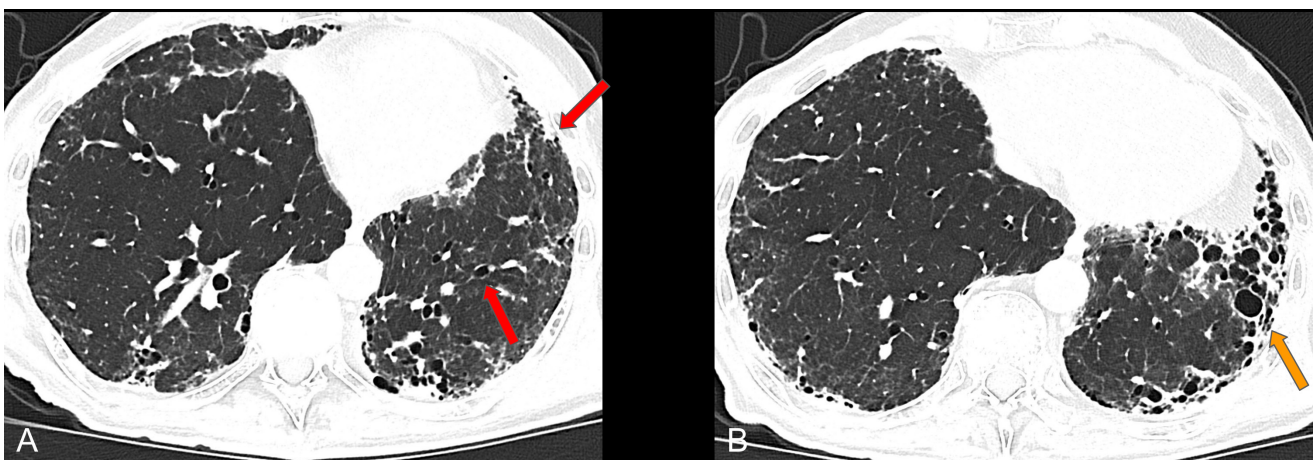
Az interstitialis tüdőbetegségek (ILD-ek) képalkotásában a nagy térbeli felbontás és a finom morfológiai eltérések megbízható felismerése alapvető jelentőségű, mivel a diagnózis, a mintázat szerinti besorolás és a prognózis elsősorban a CT-n azonosítható strukturális jeleken alapul. A PCD-CT ultranagy térbeli felbontása és a parciális volumenhatás csökkentése révén lényegesen javítja az ILD-ekre jellemző finom eltérések ábrázolhatóságát, különösen az intralobularis reticulatio, az interlobularis septummegvastagodás, a korai tractiós bronchiectasia és a microcysták felismerése terén [7, 21, 22].

A PCD-CT egyik legfontosabb előnye, hogy csökkenti annak kockázatát, hogy finom fibroticus eltérések pusztán tejüveghomályként jelenjenek meg. Hagyományos EID-CT esetén a voxelen belüli szövettani hetero-

genitás és a korlátozott térbeli felbontás miatt a reticularis komponensek gyakran összemosódnak az alveolaris denzitásfokozódással, ami a betegség aktivitásának vagy reverzibilitásának túlbecsléséhez vezethet. PCD-CT-vel ezek az eltérések elkülöníthetővé válnak, ami pontosabb morfológiai karakterizálást és megbízhatóbb, mintázat szerinti besorolást tesz lehetővé [6]. A finom fibroticus rajzolat és az interlobularis septummegvastagodás nagy felbontású megjelenítése különösen fontos az interstitialis eltérések korai felismerésében és pontos karakterizálásában.

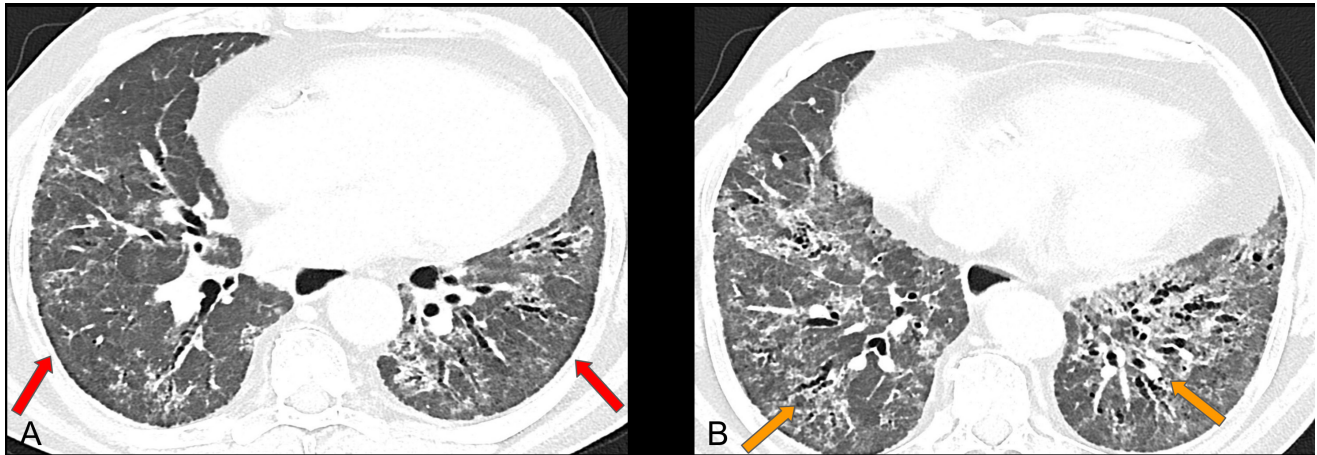
Az idiopathiás interstitialis tüdőbetegségek közül a szokásos interstitialis pneumonia (UIP) és a nem specifikus interstitialis pneumonia (NSIP) mintázatok elkülönítése különösen nagy klinikai jelentőségű. UIP esetén a PCD-CT előnye elsősorban a subpleuralis és basalis dominanciájú reticularis mintázat, a tractiós bronchiectasia és a korai lépesmészrajzolat részletgazdag ábrázolásában mutatkozik meg. A kisebb voxelméret révén a korai lépesmészrajzolatához tartozó microcysták elkülöníthetők a paraseptalis emphysemától vagy a durva reticulatiótól, ami hagyományos CT-vel gyakran nehézséget okoz [21, 22]. Ez különösen fontos azokban az esetekben, amelyeknél a CT-lelet alapján (a nemzetközi nevezéktan szerint) a „probable UIP” és az „indeterminate for UIP” kategóriák közötti döntés klinikai következményekkel járhat, vagy kis kiterjedésűek az interstitialis eltérések [21, 22] (6. ábra).

NSIP esetén a PCD-CT hozzájárul a homogénebb tejüveghomályok, a finom reticulatio és a relatíve megkímélt subpleuralis régiók pontosabb megítéléséhez. A jobb térbeli felbontás révén csökken annak esélye, hogy a gyulladásos és fibroticus komponensek összemosódjanak, ami különösen releváns a celluláris és fibroticus NSIP elkülönítésében, valamint az utánkötés során bekövetkező finom strukturális változások detektálásában [23] (7. ábra).



6. ábra (A) Axiális síkú PCD ultranagy felbontású (0,2 mm szeletvastagságú) CT-kép, UIP radiomorfológiai képe – basalis túlsúlyú subpleuralis reticulatio és tractiós bronchiectasia [(A) nyílak]. (B) Axiális síkú PCD 0,2 mm szeletvastagságú CT-kép, lépesmészmintázat [(B) nyíl]

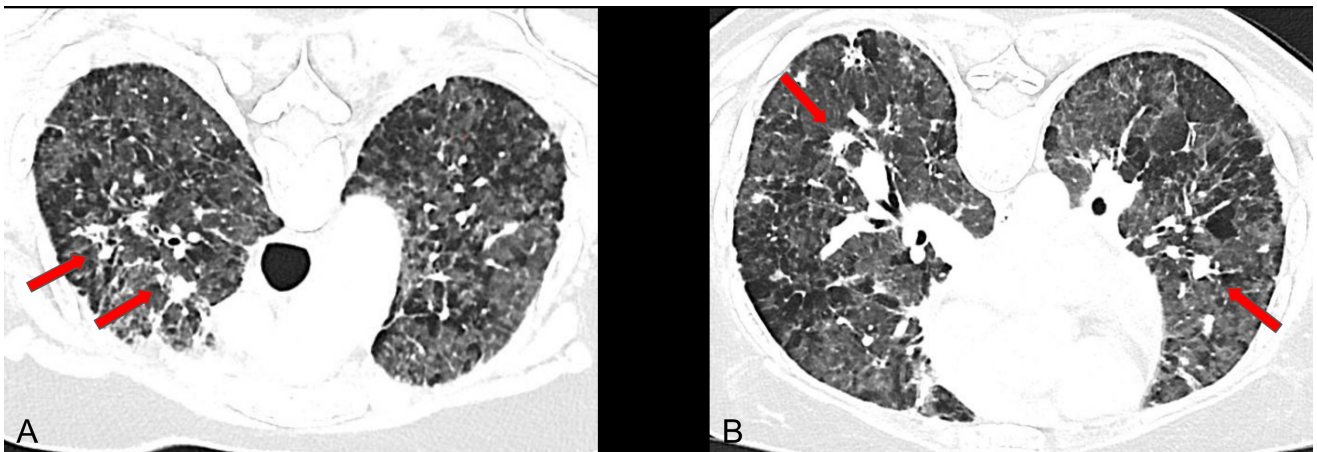
CT = komputertomográfia; PCD = fotonszámláló detektor; UIP = szokásos interstitialis pneumonia



7. ábra

(A) Axiális síkú PCD 0,2 mm szeletvastagságú CT-kép, NSIP radiomorfológiai képe – szimmetrikus halvány subpleuralis reticulatio enyhe subpleuralis megkíméltséggel (nyílak) és tractiós bronchiectasiával (B) (nyílak)

CT = komputertomográfia; NSIP = nem specifikus interstitialis pneumonia; PCD = fotonszámláló detektor



8. ábra

Axiális síkú PCD-HRCT-kép. Sarcoidosis radiomorfológiai képe – mindkét oldalon az emphysemás tüdőparenchymában apicalis túlsúlyú (A) diffúz, reticulonodularis rajzolat, mozaikos, foltos attenuációval (nyílak A, B)

PCD-HRCT = fotonszámláló detektoros nagy felbontású komputertomográfia

Sarcoidosis esetén a PCD-CT kiemelt előnye a nyirokutak mentén eloszló micronodulusok, a bronchovascularis kötegek menti finom nodularis eltérések és a subpleuralis nodularis rajzolat részletgazdag ábrázolása. A csökkent parciális volumenhatás révén a nodularis mintázat elkülöníthető a finom reticularis eltérésektől, ami elősegíti a sarcoidosis elkülönítését más granulomatosus vagy fibroticus interstitialis tüdőbetegségektől. Előrehaladott stádiumban a felső lebenyi dominanciájú fibroticus átalakulás és a tractiós bronchiectasia pontosabban ítéltető meg PCD-CT-vel [23] (8. ábra).

Kötőszöveti betegségekhez társuló interstitialis tüdőbetegségek (CTD-ILD) esetén a morfológiai spektrum gyakran átfedést mutat az UIP és az NSIP jegyeivel. A PCD-CT ebben a heterogén betegcsoportban különösen hasznos a finom reticulatio, a korai tractiós bronchiectasia és a subpleuralis fibroticus eltérések felismerésében, valamint a gyulladásos és a fibroticus komponensek arányának becslésében.

Friss adatok alapján a 'low-dose' PCD-CT jelentősen nagyobb érzékenységgel képes kimutatni a korai, gyakran szubklinikai interstitialis eltéréseket, mint a klinikai vizsgálat vagy a légzésfunkciós tesztek, miközben kis sugárdózis mellett is megőrzi a diagnosztikus képminőséget [24]. Ez különösen fontos CTD-ILD esetén, amelynél a betegek jelentős részében a parenchymás eltérések kezdetben tünetmentesek, és csak képalkotó módszerekkel detektálhatók.

A spektrális képalkotásból származó kiegészítő információ, különösen a jódterképeken ábrázolt perfúziós viszonyok, támogathatják az aktív gyulladás és az inaktív fibroticus komponensek elkülönítését, ami a terápiás döntések szempontjából is releváns lehet [13, 24, 25].

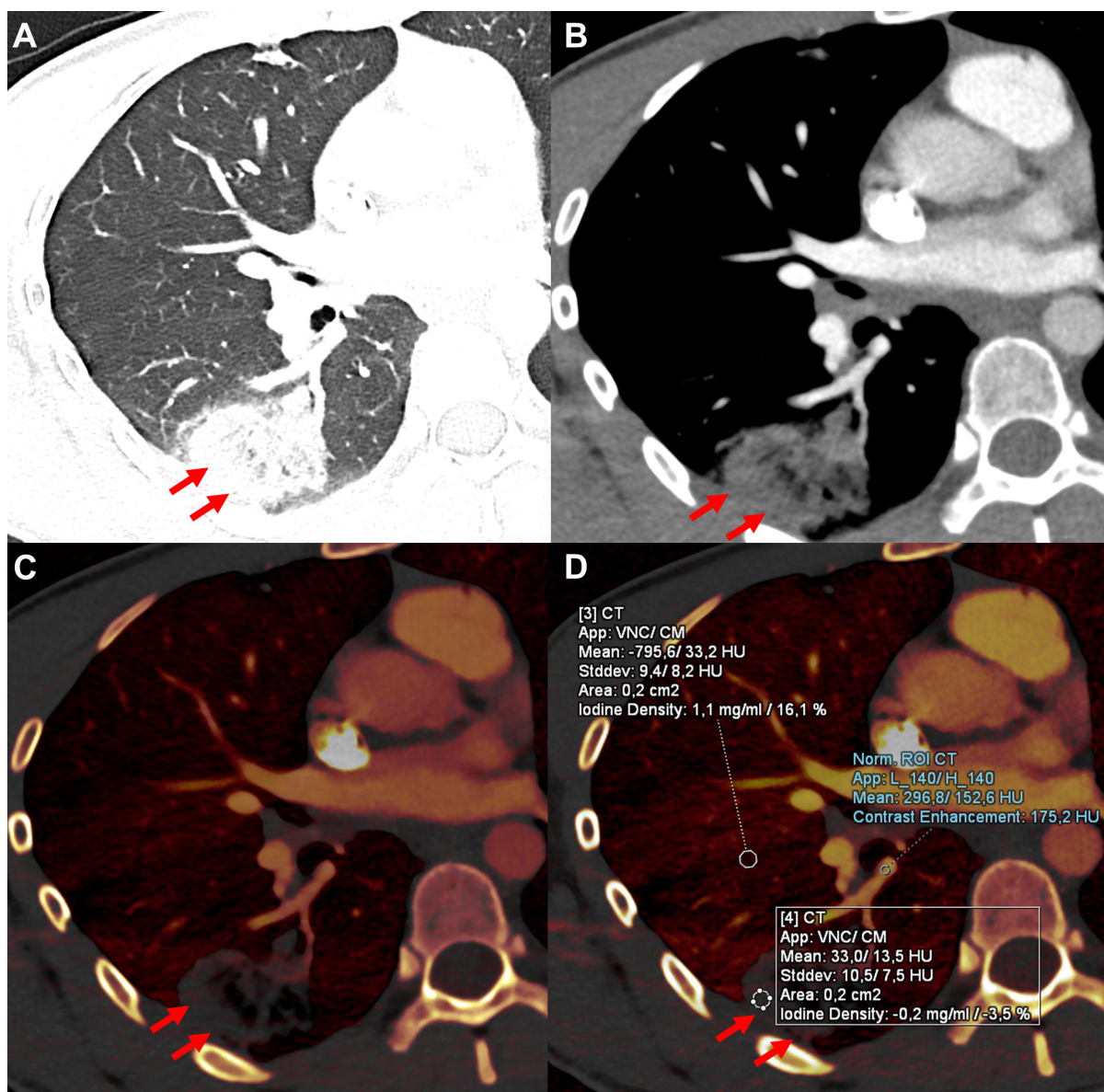
A hyperszenzitív pneumonitis fibroticus formáiban a PCD-CT előnye a komplex morfológiai mintázatok pontosabb felismerésében jelentkezik. A centrilobularis nodulusok, a mozaikos attenuáció, az 'air trapping' (levegőzárvány) és az úgynevezett háromdenzitású min-

tázat együttes értékelése PCD-CT-n nagyobb részletességgel végezhető, ami segíti az elkülönítést UIP-től és NSIP-től, különösen atípusos vagy kevert megjelenés esetén [23].

A bronchiectasia gyakran társul ILD-hez, különösen fibroticus kórképekben tractiós bronchiectasia formájában. A PCD-CT ultranagy térbeli felbontása lehetővé teszi a bronchusfal megvastagodásának, a lumen tágulatanak és a környező fibroticus eltéréseknek a pontosabb megítélését, ami segít elkülöníteni a tractiós bronchiectasiát a primer bronchiectasiától. Ez a differenciálás prognosztikai szempontból is lényeges, mivel a tractiós bronchiectasia az ILD progressziójának markere [22].

Vascularis eredetű kórképek

A pulmonalis vascularis betegségek képalkotásában a CT alapvető szerepet tölt be, ugyanakkor a hagyományos EID-CT-vel végzett vizsgálatok számos esetben korlátozott diagnosztikus bizonyosságot nyújtanak, különösen perifériás érintettség, komplex perfúziós eltérések vagy krónikus kórformák esetén [1, 5]. A PCD-CT technológiai sajátosságai – az ultranagy térbeli felbontás, a kedvező kontraszt-zaj arány és a spektrális képalkotás – új minőséget képviselnek a pulmonalis vascularis kórképek morfológiai és funkcionális értékelésében [10, 12].



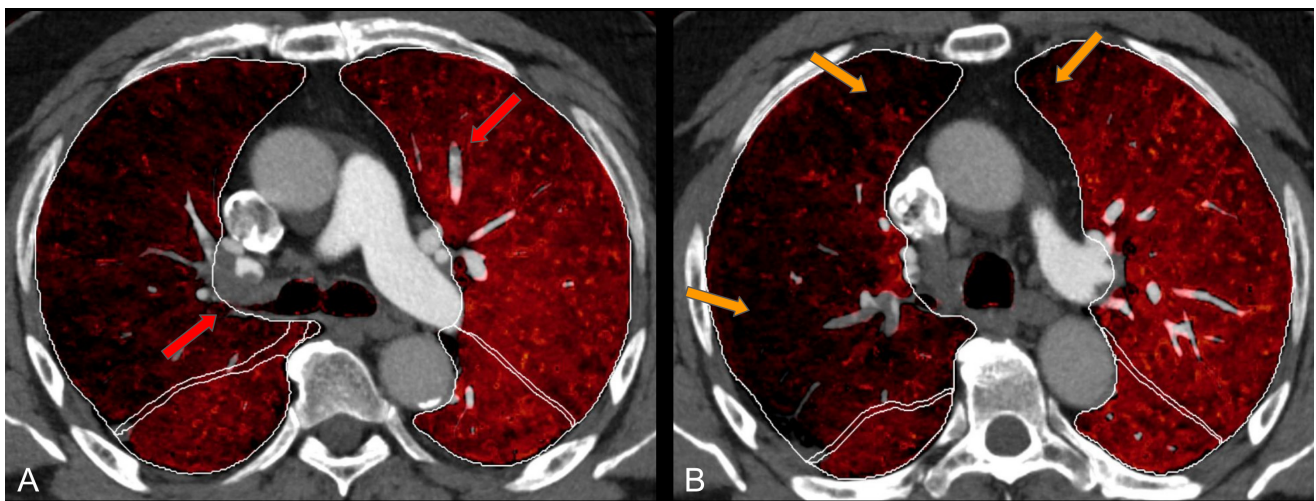
9. ábra

Pulmonalis CT-angiográfiás mérés. Az axiális síkú tüdőablakos (A) és lágyrészt ablakos (B) képeken a jobb alsó lebenyben tüdőembolia következtében kialakult infarct pneumoniának megfelelő consolidatum (nyílak). Kettős energiájú megjelenítési módban a virtuális nonkontrasztos kép kapuzás nélkül (C), illetve az arteria pulmonalisához történő normalizálás után (D). Az infarctált tüdőparenchyma halmozása (-0,2 mg/ml jódkoncentráció) elmarad az intakt parenchyma halmozásától (1,1 mg/ml jódkoncentráció)

CT = komputertomográfia

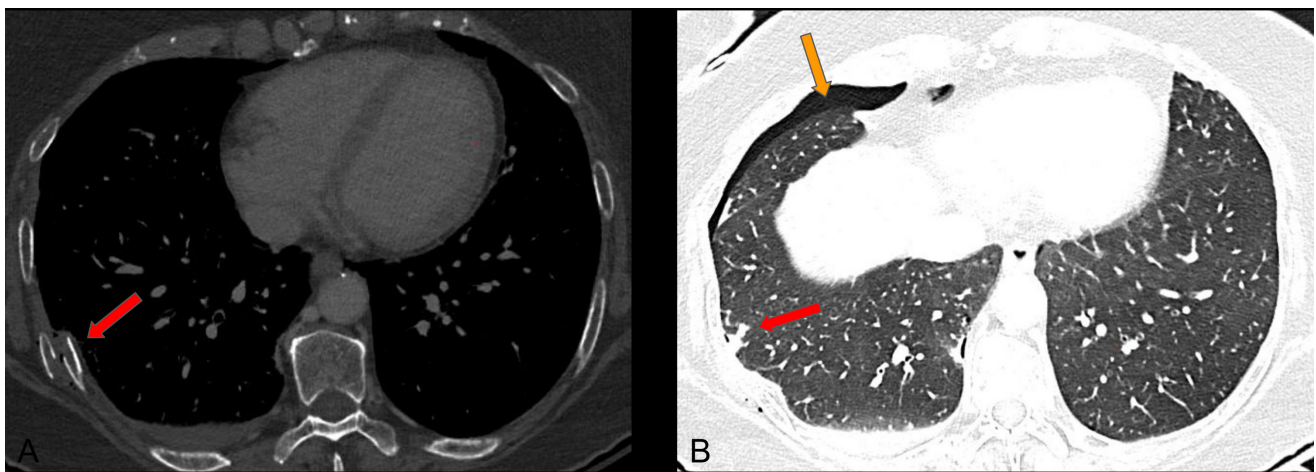
Akut tüdőembolia esetén a PCD-CT-vel végzett pulmonalis CT-angiográfia különösen előnyös a perifériás és szubssegmentális ágak megítélésében [26]. A virtuális monoenergetikus rekonstrukciók kis energiájú tartományban fokozzák a kontrasztanyag jelintenzitását, ezáltal javítják az érfali kontrasztot és a kontraszt-zaj arányt, ami különösen a kis méretű, perifériás thrombusok felismerését segíti. Nagyobb energiájú rekonstrukciók alkalmazásával egyidejűleg csökkenthetők a sugárkeményedési műtermékek, ami különösen centrális erek és kontrasztos vizsgálatok során javítja az értékelhetőséget [27]. A csökkent parciális volumenhatás révén az ér lumenének és falának elkülönítése pontosabbá válik, miközben a jódtérképek kimagasló kiegészítő információt szolgáltatnak a parenchymás perfúzióról, lehetővé téve

az ék alakú perifériás perfúziós deficitok ábrázolását [28]. A jódtérképek nemcsak vizuálisan ábrázolják a perfúziós eltéréseket, hanem kvantitatív információt is szolgáltatnak, lehetővé téve az érintett és az ép területek közötti jódkoncentráció összehasonlítását ROI-alapú mérések segítségével (9. ábra). A PCD-CT alkalmazásával diagnosztikus képminőség érhető el kisebb sugár- és kontrasztanyag-terhelés mellett, ami sürgősségi és utánkövetési vizsgálatok során is klinikailag jelentős előnyt jelent [26]. A PCD-CT alkalmazásával nemcsak a centrális és perifériás thrombusok ábrázolhatók részletgazdagabban, hanem a jódtérképek segítségével az érintett parenchymaterületek perfúziós kiesése is jól demonstrálható, ami az akut tüdőembolia funkcionális következményeinek megítélését is támogatja (10. ábra).



10. ábra (A) Axialis síkú PCD-CT-angiográfias jódperfúziós kép. A jobb arteria pulmonalis főtrunkusban részleges telődéskiesés, amely ráterjed a jobb felső, középső és alsó lebenyi ágakra. Bal oldalon a felső szegmentális ágakban látható telődéskiesés (nyílak). (B) Axialis síkú PCD-CT-angiográfias jódperfúziós kép. Kétoldali tüdőembolia, az érintett területeken perfúziós deficit (nyílak)

PCD-CT = fotonyszámoló detektoros CT



11. ábra (A) Axialis síkú PCD-CT csontablakos kép – jobb oldalon sorozatablakos bordatörés (nyíl). (B) Axialis síkú PCD-CT tüdőablakos kép – a bordatörések mentén contusio a tüdőállományban (nyíl), illetve a jobb felső lebenyben pneumothorax (nyíl)

PCD-CT = fotonyszámoló detektoros CT

Krónikus thromboemboliás pulmonalis hypertensio (CTEPH) esetén a PCD-CT szerepe túlmutat a klasszikus endoluminalis eltérések felismerésén. A krónikus thrombusokra jellemző hártyszerű és kötegszerű intraluminalis maradványok, szűkületek és perifériás abrupt occlusiók mellett a jódterképek lehetővé teszik a lobaris és szegmentális perfúziós deficitok ábrázolását, egyetlen vizsgálat keretében integrálva a strukturális és funkcionális információt. Ez a megközelítés különösen értékes olyan esetekben, amelyeknél a mozaikos perfúzió dominál, de a makroszkópos thrombusjelek kevésbé kifejezetek [29].

A PCD-CT egyik legjelentősebb újítása CTEPH-ben a microvasculopathia CT-jeleinek nagy felbontású vizsgálata. Az elmaradó perfúziót mutató parenchymás területeken jellegzetesen elmosódott szélű micronodulusok, lobularis tejüveghomályok és diffúz denzitásfokozódás figyelhető meg, amelyek a distalis kiserek strukturális és funkcionális átalakulására utalnak. A hyperperfúziós régiókban ezzel szemben tágult arteriolák, venulák és fokozott bronchialis és nem bronchialis kollateralizáció ábrázolódhat, ami hozzájárulhat a residualis pulmonalis hypertensio patofiziológiai magyarázatához [30].

A vasculitisek közül a granulomatosus polyangiitisszel társuló pulmonalis eltérések képalkotásában a PCD-CT szintén jelentős hozzáadott értéket képvisel. A kis méretű, gyakran üregesedő nodulusok, a vascularis eloszlású gócok és a vérzéses komponensek ultranagy térbeli felbontással részletgazdagabban ábrázolhatók, míg a jódterképek segítségével az aktív gyulladásos komponensek kontrasztanyag-halmozása megítélhető [12]. Ez támogatja a betegség aktivitásának értékelését és a kezelés hatásának követését, valamint segíthet az infekciós vagy neoplasztikus eltérésektől való elkülönítésben [11].

Pulmonalis arteriovenosus malformatiók esetén a PCD-CT előnye a finom vascularis anatómia pontos ábrázolásában mutatkozik meg [27]. A tápláló artéria és az elvezető véna megbízható azonosítása mellett a spektrális képalkotás különösen értékes az intervenciót követő állapot megítélésében, mivel fémes embolisációs eszközök jelenlétében a műtermékek mérsékelhetők, és a jódterképen megítélhető az esetleges residualis kontrasztanyag-halmozás, ami residualis fistulára utalhat [12].

Traumás eltérések

A traumás eredetű pulmonalis eltérések CT-értékelésében a kontraszt-zaj arány és a képzaj mértéke meghatározó jelentőségű, különösen a heterogén denzitású parenchymás elváltozások, így a tüdőcontusio és az atelectasia elkülönítése során. Virtuális monoenergetikus képek alkalmazásával, optimális energián rekonstruálva, a képzaj szignifikánsan csökkenthető, miközben a kontraszt-zaj arány érdemben javul a hagyományos 120 kVp-os CT-hez képest, azonos sugárdózis mellett. A virtuális monoenergetikus rekonstrukciók alkalmazása lehetővé teszi az optimális energiaválasztást, amely a kü-

lönöző szövetek közötti kontraszt maximalizálása mellett a képzaj csökkentését is biztosítja. A közepes energiájú, megközelítőleg 68–70 keV tartományban rekonstruált képek kedvező kompromisszumot biztosítanak a zaj és a kontraszt között, ami klinikai szempontból különösen releváns a mellkasi trauma képalkotásában [31].

Ezek az előnyök közvetlen jelentőséggel bírnak politraumatizált betegek esetén, akiknél a tüdőcontusio gyakran finom denzitáskülönbségekkel járó tejüveghomályok és foltos konsolidációk formájában jelenik meg, és társulhat atelectasiával vagy aspirációs eltérésekkel [32]. A javult kontraszt-zaj arány elősegíti ezen eltérések felismerését és pontosabb kiterjedésük megítélését, különösen nem kooperáló, szedált vagy gépi lélegeztetés alatt álló betegekben, akiknél a mozgási műtermékek jelentősen ronthatják a képminőséget [33].

A PCD-CT spektrális képalkotási képességei lehetővé teszik a virtuális monoenergetikus rekonstrukciók rutinszerű alkalmazását, miközben a technológia ultranagy térbeli felbontása és a csökkent parciális volumenhatás hozzájárul a finom alveolaris vérzéses eltérések és subpleuralis contusiók pontosabb ábrázolásához. Lélegeztetett, nem kooperáló betegek esetén a nagyléptékű (high-pitch) spirális akvizíció alkalmazása különösen előnyös, mivel a rövid vizsgálati idő révén csökkenti a légzési és mozgási műtermékeket, ezáltal javítja a képminőséget és az értékelhetőséget. Ennek jelentősége különösen nagy nem kooperáló, dyspnoés vagy lélegeztetett betegek vizsgálata során, amelynél a gyors adatgyűjtés hozzájárul a diagnosztikai pontosság növeléséhez [33].

A spektrális képalkotás funkcionális kiegészítő információt is nyújt traumás pulmonalis eltérések esetén. A jódterkép segítségével elkülöníthetők a perfundált atelectasiás tüdőterületek és a súlyosan sérült, perfúzióban károsodott parenchymás régiók, amelyek contusio vagy laceratio esetén jellemzően csökkent vagy hiányzó kontrasztanyag-halmozást mutatnak [33]. Ez a megközelítés hozzájárulhat a sérülés súlyosságának pontosabb megítéléséhez, valamint a további intenzív terápiás és lélegeztetési stratégia megtervezéséhez [32]. Traumás eredetű eltérések esetén a PCD-CT nemcsak a csontos sérülések, például bordatörések pontos ábrázolását segíti, hanem a társuló parenchymás contusiók eltérések részletesebb megjelenítését is lehetővé teszi (11. ábra).

Intervenciók

CT-vezérelt intervenciók során a képalkotás minősége közvetlenül meghatározza a beavatkozás pontosságát, biztonságát és sikerességét. A hagyományos EID-CT alkalmazása fémes eszközök jelenlétében, illetve kis méretű céllaesiók esetén számos korláttal jár, amelyek a PCD-CT használatával részben vagy teljes mértékben mérsékelhetők.

CT-vezérelt tüdőbiopsziák és thermoablációk során gyakori kihívást jelent a fémes beavatkozó eszközök – el-

sősorban biopsziás tűk, vezetődrótok, ablatiós szondák – által okozott sugárkeményedési (beam-hardening) és túlnyúlási (blooming) műtermékek megjelenése. PCD-CT alkalmazásával ezek a műtermékek csökkenthetők, mivel a detektor energiadiszkriminációja és a spektrális rekonstrukciók lehetővé teszik a fém környezetének jobb ábrázolását, ezáltal a tű- vagy szondahegy pontosabb lokalizációját a céllaesión belül vagy annak közvetlen közelében [1, 12]. Ez különösen fontos kis méretű, subpleuralisan vagy vascularisan gazdag területen elhelyezkedő elváltozások esetén, amelyeknél a néhány milliméteres pontatlanság is diagnosztikus vagy terápiás sikertelenséghez vezethet.

A PCD-CT ultranagy térbeli felbontása szintén jelentős előnyt jelent intervenciók során. A kisebb voxelméret, kisebb parciális volumen effektus révén a céllaesiók határai, belső szerkezete és környezete részletgazdagabban ábrázolhatók, ami javítja a célzás pontosságát biopszia esetén, valamint lehetővé teszi az ablatiós zóna és a környező kritikus struktúrák pontosabb megítélését thermoablatio során [7, 10]. Ez a nagyobb felbontás különösen értékes lehet kis méretű pulmonalis nodulusok, tejüveg homályos komponenssel rendelkező eltérések, illetve komplex morfológiájú elváltozások esetén.

Az intervenciók munkaszervezés szempontjából további előnyt jelent a PCD-CT gyorsabb képalkotási lehetősége. A rövidebb akvizíciós idő és a 'high-pitch' technikák alkalmazhatósága csökkenti a mozgási műtermékeket, különösen nem vagy nehezen kooperáló illetve fájdalom miatt nehezen pozicionálható betegek esetén, és lerövidíti az egyes kontrollmérések közötti időt [6]. Ez nemcsak a beavatkozás teljes idejét csökkentheti, hanem hozzájárulhat a sugárterhelés mérsékléséhez is, mivel kevesebb ismételt kontrollfelvétel válhat szükségessé.

Thermoablatiók során a spektrális képalkotás további potenciális előnyt kínál a beavatkozás utáni azonnali kontroll során. A virtuális monoenergetikus képek és a jódtérkép segítségével az ablált terület és a residualis perfundált parenchyma elkülönítése pontosabbá válhat, ami támogatja az azonnali, illetve későbbi technikai siker megítélését, valamint a korai inkomplett ablatio felismerését [11, 12].

Következtetés

A PCD-CT a hagyományos EID-CT-hez képest számos klinikailag releváns előnyt kínál a pulmonalis képalkotásban. Az ultranagy térbeli felbontás, a kedvezőbb jel-zaj arány és az intrinszik spektrális képalkotás javítja a finom morfológiai eltérések felismerését, miközben a kisebb detektorelemek csökkentik a parciális volumen hatást, elősegítve a kis méretű struktúrák pontosabb ábrázolását [7, 13, 30].

A kis és ultrakis dózisu protokollok lehetővé teszik a sugárterhelés csökkentését diagnosztikus képminőség mellett, ami különösen fontos krónikus betegségek, például intersticiális tüdőbetegségek esetén. A finom reticu-

laris eltérések és korai fibroticus jelek kis dózison is megbízhatóbban felismerhetők [21, 22].

A spektrális információ egyetlen akvizíció során történő nyerése egyszerűsíti a vizsgálatokat, és csökkenti a műtermékeket. A nagyobb felbontás pontosabb nodulus méret-meghatározást tesz lehetővé, különösen subolid és tejüveg homályok esetén. Az anyagszintű lebontás révén a különböző anyagok elkülöníthetők és kvantifikálhatók, ami segíti a parenchymás eltérések és perfúziós viszonyok pontosabb értékelését [5, 11].

A jódtérképek funkcionális információt nyújtanak, támogatva a tumoros és infekciós elváltozások karakterizálását, míg az infektiós betegségekből a finom morfológiai jelek megbízhatóbban felismerhetők akár kis dózison is. A virtuális monoenergetikus képek javítják az érkontrasztot, és csökkentik a műtermékeket [13, 19, 20].

A technológia alkalmazását ugyanakkor nehezíti az eltérő CT-rendszerek közötti összehasonlíthatóság és a korlátozott hozzáférhetőség, valamint a nagy költségek. Fontos megjegyezni, hogy a bemutatott eredmények részben kezdeti tapasztalatokon alapulnak, így a módszer szélesebb körű klinikai validálásához további vizsgálatok szükségesek. Mindezek ellenére a PCD-CT jelentős potenciállal bír, és várhatóan egyre nagyobb szerepet kap a pulmonalis diagnosztikában.

Anyagi támogatás: A közlemény megírása nem részesült anyagi támogatásban.

Szerzői munkamegosztás: R. M.: A törzsszöveg összeállítása. G. K. B.: Az ábrák összeállítása. M.-H. P.: A kézirat jóváhagyása. M. N.: Konceptió, a szöveg és az ábrák mentorálása, a kézirat jóváhagyása. A közlemény végleges változatát valamennyi szerző elolvasta és jóváhagyta.

Érdekltségek: A szerzőknek nincsenek érdekltségeik.

Irodalom

- [1] Willemink MJ, de Jong PA, Leiner T, et al. Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 1: technical principles. Eur Radiol. 2013; 23: 1623–1631.
- [2] Geyer LL, Schoepf UJ, Meinel FG, et al. State of the art: iterative CT reconstruction techniques. Radiology 2015; 276: 339–357.
- [3] Botz B, Toth A, Bogner P. Increase in the radiology imaging case volume and workload in a Hungarian university clinical center. [A képi diagnosztikai adatmennyiség, esetszám, valamint a diagnosztikus munkaterhelés emelkedése egy magyar klinikai centrumban.] Orv Hetil. 2024; 165: 1894–1903. [Hungarian]
- [4] Viczei A, Lapis I, Kiss G, et al. Could the head CT scans be reduced for patients with minor head injury in emergency practice? [Lehetne-e csökkenteni az enyhe koponyasérültek sürgősségi koponya-CT-vizsgálatainak számát?] Orv Hetil. 2024; 165: 538–544. [Hungarian]
- [5] McCollough CH, Leng S, Yu L, et al. Dual- and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications. Radiology 2015; 276: 637–653.
- [6] Greffier J, Viry A, Robert A, et al. Photon-counting CT systems: a technical review of current clinical possibilities. Diagn Interv Imaging 2025; 106: 53–59.

- [7] Leng S, Bruesewitz M, Tao S, et al. Photon-counting detector CT: system design and clinical applications of an emerging technology. *Radiographics* 2019; 39: 729–743.
- [8] Danielsson M, Persson M, Sjölin M. Photon-counting X-ray detectors for CT. *Phys Med Biol*. 2021; 66: 03TR01.
- [9] Borbély K, Lénárd Z, Budai BK, et al. Photoncounting-detector CT: Basic principles, advantages and implications in clinical practice. [A fotonszámláló detektoros CT működési alapelve, előnyei és jelentősége a klinikai gyakorlatban.] *Magy Radiol Online* 2023; 14(2): 1–15. [Hungarian]
- [10] Rajendran K, Petersilka M, Henning A, et al. First clinical photon-counting detector CT system: technical evaluation. *Radiology* 2022; 303: 130–138.
- [11] Si-Mohamed SA, Mialhes J, Rodesch PA, et al. Spectral photon-counting CT technology in chest imaging. *J Clin Med*. 2021; 10: 5757.
- [12] Douek PC, Boccalini S, Oei EH, et al. Clinical applications of photon-counting CT: a review of pioneer studies and a glimpse into the future. *Radiology* 2023; 309: e222432.
- [13] Tárnoki ÁD, Tárnoki DL, Maurovich-Horvat P. Photon-counting CT in lung imaging. *Expert Rev Respir Med*. 2025; 19: 77–81.
- [14] Yanagawa M, Ueno M, Ito R, et al. Photon-counting detector computed tomography in thoracic oncology: revolutionizing tumor imaging through precision and detail. *Diagn Interv Radiol*. 2025 Sep 24. Doi: 10.4274/dir.2025.253550. [Online ahead of print]
- [15] Kerpel-Fronius A, Bogos K. HUNCHEST projects: advancing low-dose CT lung cancer screening in Hungary. *Pathol Oncol Res*. 2024; 30: 1611635.
- [16] Glandorf J, Vogel-Claussen J. Incidental pulmonary nodules – current guidelines and management. *Rofo* 2024; 196: 582–590.
- [17] Wang J, Huang Z, Zhu Z, et al. Photon-counting detector CT provides superior subsolid nodule characterization compared to same-day energy-integrating detector CT. *Eur Radiol*. 2025; 35: 2979–2989.
- [18] Prayer F, Kienast P, Strassl A, et al. Detection of post-COVID-19 lung abnormalities: photon-counting CT versus same-day energy-integrating detector CT. *Radiology* 2023; 307: e222087.
- [19] Huisinga C, Bredemeier S, Hartung D, et al. Photon-counting detector CT (PCD-CT) generated iodine maps to characterize parenchymal lung disease: a feasibility study. *Eur J Radiol*. 2024; 181: 111689.
- [20] Jungblut L, Abel F, Nakhostin D, et al. Impact of photon-counting detector CT derived virtual monoenergetic images and iodine maps on the diagnosis of pleural empyema. *Diagn Interv Imaging* 2023; 104: 84–90.
- [21] Inoue A, Johnson TF, White D, et al. Estimating the clinical impact of photon-counting-detector CT in diagnosing usual interstitial pneumonia. *Invest Radiol*. 2022; 57: 734–741.
- [22] Gaillandre Y, Duhamel A, Flohr T, et al. Ultra-high resolution CT imaging of interstitial lung disease: impact of photon-counting CT in 112 patients. *Eur Radiol*. 2023; 33: 5528–5539.
- [23] Brixey AG, Oh AS, Alsamarraie A, et al. Pictorial review of fibrotic interstitial lung disease on high-resolution CT scan and updated classification. *Chest* 2024; 165: 908–923.
- [24] Fritsch K, Majnik J, Tomčík M, et al. Screening for rheumatoid arthritis-associated interstitial lung disease using low-dose CT: an emerging approach – an observational prospective case-control study. *Arthritis Res Ther*. 2025; 27: 208.
- [25] Marton N, Gyebnar J, Fritsch K, et al. Photon-counting computed tomography in the assessment of rheumatoid arthritis-associated interstitial lung disease: an initial experience. *Diagn Interv Radiol*. 2023; 29: 291–299.
- [26] Pannenbecker P, Huflage H, Grunz JP, et al. Photon-counting CT for diagnosis of acute pulmonary embolism: potential for contrast medium and radiation dose reduction. *Eur Radiol*. 2023; 33: 7830–7839.
- [27] Yalon M, Hoodeshenas S, Chan A, et al. Improved pulmonary artery evaluation using high-pitch photon-counting CT compared to high-pitch conventional or routine-pitch conventional dual-energy CT. *J Comput Assist Tomogr*. 2024; 48: 897–905.
- [28] Kerber B, Hüllner M, Maurer A, et al. Photon-counting detector CT iodine maps versus SPECT/CT: advancing lung perfusion imaging in chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Invest Radiol*. 2025; 60: 569–576.
- [29] Kerber B, Flohr T, Ulrich S, et al. Photon-counting CT iodine maps for diagnosing chronic pulmonary thromboembolism: a pilot study. *Invest Radiol*. 2025; 60: 328–333.
- [30] Remy-Jardin M, Duhamel A, Delobelle M, et al. Lung microvasculopathy in chronic thromboembolic pulmonary hypertension: high-resolution findings with photon-counting detector CT in 29 patients. *Eur Radiol*. 2025; 35: 6369–6381.
- [31] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT. *Radiology* 2011; 259: 257–262.
- [32] Schulz-Drost S, Finkbeiner R, Lefering R, et al. Lung contusion in polytrauma: an analysis of the TraumaRegister DGU. *Thorac Cardiovasc Surg*. 2021; 69: 735–748.
- [33] Kaatsch HL, Völlmecke MF, Becker BV, et al. Improved discriminability of severe lung injury and atelectasis in thoracic trauma at low keV virtual monoenergetic images from photon-counting detector CT. *Diagnostics (Basel)* 2024; 14: 2231.

(Marton Nikolett dr.,
Budapest, Korányi S. u. 2., 1083
e-mail: marton.nikolett@semmelweis.hu)