

A mesterséges intelligencia szerepe a stroke-ellátásban

The role of artificial intelligence in stroke management

Gunda Bence^{1,2} ✉

¹Semmelweis Egyetem Neurológiai Klinika

²Semmelweis Egyetem Egészségügyi Közzszolgálati Kar Egészségügyi Menedzserképző Központ

✉ bence.gunda@gmail.com

A mesterséges intelligencia (MI) az életünk és a tudomány számos területén egyre nagyobb jelentőségre tesz szert, így a medicinában is. Orvosi felhasználása elsősorban olyan klinikai döntéstámogató megoldások részeként történik, amelyek orvosi képalkotók automatizált képelemzése és egyéb releváns klinikai információk felismerése és kinyerése segítségével az egyre komplexebbé váló diagnózisalkotást gyorsabbá, pontosabbá és egységesen magas színvonalúvá tehetik. Ezáltal hatékony és személyre szabott terápiás döntéseket alapozhatnak meg, valamint időt és munkát takaríthatnak meg egy humán erőforrás-szegény ágazatban. Az integrált telemedicinás megoldások komplexebb betegutak esetén az egészségügyi ellátók közötti kommunikáció hatékonyságát jelentősen növelhetik. Mivel a stroke akut ellátása során rendkívül gyorsan kell képalkotó diagnosztikára alapuló komplex döntéseket hozni az ellátási hálózat több tagjának közreműködésével, ezért ideális felhasználási területe az MI-alapú döntéstámogató megoldásoknak. Ebben a narratív összefoglaló tanulmányban áttekintem az MI potenciális és aktuális alkalmazási lehetőségeit a stroke-ellátásban, ennek orvosszakmai, jogi, etikai és adatvédelmi vonatkozásait. Továbbá bemutatom a világviszonylatban is egyedülálló, a teljes magyarországi stroke-ellátó hálózatot lefedő, MI-alapú stroke-teleradiológiai rendszert. Összességében bár az MI jobb minőségű és hatékonyabb betegellátást tehet lehetővé, de megfelelő működtetéséhez elengedhetetlen a humán szakmai és etikai kontroll.

Kulcsszavak: stroke, mesterséges intelligencia, képalkotó diagnosztika, döntéstámogató megoldások, telemedicina

Artificial intelligence (AI) is becoming increasingly important in various domains of life and science, including medicine. In healthcare, AI is primarily applied as part of clinical decision support systems. These systems use automated analysis of medical images and extract other relevant clinical information to facilitate increasingly complex diagnostic processes. By doing so, they can make diagnoses faster, more accurate, and of consistently high quality. This contributes to effective and personalized therapeutic decisions while saving time and effort in a sector that is often burdened by workforce shortages. Integrated telemedicine solutions further improve the efficiency of communication between health-

care providers, especially when managing complex patient pathways. Acute stroke care, which requires rapid, imaging-based decision-making involving multiple members of a care network, represents an ideal area for the application of AI-driven decision support solutions. In this narrative review article, I summarize the potential and current applications of AI in stroke management, considering the medical, legal, ethical and data safety implications. I briefly describe Hungary's unique AI-based stroke teleradiology system, which covers the entire national stroke care network. I show how AI can significantly improve the quality and efficiency of patient care, however, the successful implementation of AI in healthcare requires robust professional and ethical control. Overall, this analysis highlights the transformative role that AI can play in stroke care while underscoring the critical importance of maintaining a balance between technological advancement and human oversight to maximize its benefits responsibly.

Keywords: stroke, artificial intelligence, medical imaging, decision support solutions, telemedicine

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA (MI)

Az elmúlt évtized, de még inkább az elmúlt néhány év során, mióta a generatív MI- megoldások a nagyközönség számára is elérhetővé váltak (pl. ChatGPT, Copilot, Gemini), az MI a figyelem középpontjába került. Egyes vélemények szerint az MI jelenlegi térnyerése egy újabb paradigmaváltás az emberi információs hálózatokban, amely a korábbi forradalmakhoz hasonlóan (mint a nyelv kialakulása és történetmesélés, írásbeliség, könyvnyomtatás, ipari forradalom, telekommunikációs eszközök) gyökeresen átalakítja majd a világ működését, és visszahathat az emberiségre magára is. Azonban amíg a korábbi forradalmak során csak az ember akaratának alávetett eszközök jöttek létre, az MI az első olyan találmányunk, amely önálló szereplőként akár önálló, általunk át nem látott logikájú döntéseket is hozhat, ennek minden potenciális veszélyével ránk nézve. Ráadásul az információfeldolgozás és döntéshozatal eddig végső soron a szerves alapú emberi agyakban ment végbe, azonban ez az új, szervetlen alapú információs hálózat nincs alávetve az élő anyagok limitációinak: nem alszik, nem fárad, nem felejt és nem hal meg [1]. Ezért egzisztenciális szempontból is nagyon fontos az MI működésének megértése és humán kontroll

alatt tartása [2]. Ha azonban sikerül helyes módon használni és fejlesztését/fejlődését megfelelő mederben tartani, akkor az MI sohasem látott lehetőségeket rejthet magában az emberiség fejlődése és jóléte szempontjából. Észnél kell azonban lennünk, mert bár már sok emberi tevékenységet könnyítettünk meg találmányainkkal, és adtuk át azok terhet az eszközeinknek, jelenleg a generatív MI-nak olyan feladatokat delegálunk, mint a fogalmazás, elemzés, előadások, műalkotások, tartalmak készítése, amelyek átadásával a legfontosabb tulajdonságunkat, a kreativitásunkat sorvaszthatjuk el.

Az MI-t sokrétű jellege miatt nehéz általánosan definiálni, a terület dinamikus fejlődésével új megközelítések és képességek jelennek meg. A klasszikus, közkeletű meghatározás szerint egy gép azon képességét jelenti, amellyel az emberi intelligenciát szimuláló módon old meg feladatokat. Egy újabb, modernebb megfogalmazás szerint: „Olyan gépi alapú rendszert jelent, amely egy adott, ember által meghatározott célokra vonatkozóan képes előrejelzéseket, ajánlásokat vagy döntéseket alkotni, ezáltal befolyásolva a valós vagy virtuális környezetet.” [3].

A gépi tanulás (machine learning, a továbbiakban ML) az MI egyik részterülete, mely lehetővé teszi a számítógépek számára, hogy adatokból tanuljanak, azokban mintázatokat és szabályokat azonosítsanak, és döntéseket vagy előrejelzéseket hozzanak anélkül, hogy kifejezetten konkrét feladatokra programoznák őket [4]. A ML legfontosabb altípusai a tanulási paradigmák alapján a következők: 1) A felügyelt tanulás során az algoritmus által megtanulandó feladat pontosan meghatározható, a tanulás során a már meglévő bemeneti adatokhoz rendelt kimeneti címkék alapján megtanulja a gép, hogyan kell az új, még nem látott bemeneti adatokra a helyes kimenetelt meghatározni. 2) A felügyelet nélküli tanulás során az algoritmusnak nincs a bemeneti adatokhoz kapcsolt előre meghatározott kimeneti címkéje, ilyenkor az algoritmus célja az, hogy önállóan találjon mintázatokat a bemeneti adatokban, amely alapján csoportosítani tudja őket. 3) A megerősítéses tanulás során az algoritmus szintén mintázatok önálló felismerésén alapul, azonban itt a rendszer tapasztalatokon keresztül tanul, azáltal, hogy a pozitív vagy negatív visszajelzések alapján optimalizálja a döntéseit [5]. A 4) mély tanulás (deep learning, a továbbiakban DL) a biológiai idegi hálózatokhoz hasonló felépítésű, mesterséges neurális hálózatokon alapuló rendszer, amely az összetettebb adatok, például mozgóképek, három dimenziós tárgyak és hangok elemzésére a leginkább alkalmas [5].

Az MI térnyerése az egészségügyben az orvostudomány egyik legígéretesebb és leggyorsabban fejlődő területe. Az MI legnagyobb hatását a klinikai döntéshozatal támogatásában fejti ki, különösen olyan területeken, ahol az orvosoknak gyors és precíz döntéseket kell hozniuk nagy mennyiségű adat elemzése alapján [6,7]. Az MI-alapú rendszerek orvosi képalkotó vizsgálatok (CT – computer tomográfia, MR – mágneses rezonancia és ultrahang) vagy szövettani minták automatizált képelemzésével képesek kiemelni a releváns klinikai információkat, amelyek az egyre komplexebbé váló diagnó-

zisalkotás folyamatát gyorsabbá, pontosabbá és egységesen magas színvonalúvá teszik [8]. Ezáltal időt és munkát is megtakarítanak egy sok területen humánerőforrás-hiánnyal küzdő ágazatban [9]. Az MI alkalmazása nem csupán a diagnosztikai pontosság javításában jelentős, hanem hozzájárul a személyre szabott orvoslás elterjedéséhez is. Azáltal, hogy az algoritmusok képesek összekapcsolni és elemezni a beteg kórtörténetét, genetikai adatait, vitális paramétereit, valamint a valós idejű diagnosztikai eredményeket, hatékonyabb és egyénre szabott terápiás döntések alapjául szolgálnak. Ez különösen fontos olyan krónikus vagy komplex betegségek esetén, mint a daganatok, immunbetegségek vagy kardiovaszkuláris betegségek [10]. Egy másik fontos hozzájárás az MI-alapú megoldásoknak a telemedicinás megoldások integrációja, amelyek képesek javítani az egészségügyi ellátók közötti kommunikáció hatékonyságát, különösen a komplexebb, több szakmát érintő betegutak esetén. Ezek a rendszerek nemcsak az adatok elemzésében és megosztásában, hanem a döntések koordinálásában is szerepet játszanak, elősegítve a gyors és hatékony betegellátást [11].

A mesterséges intelligencia alkalmazásának etikai és jogi kérdései azonban továbbra is jelentős kihívást jelentenek. Az adatvédelem, a megbízhatóság, valamint az MI-alapú döntések átláthatósága és felelőssége mind olyan területek, amelyeket a technológiai fejlődés mellett párhuzamosan kell szabályozni. Ennek ellenére az MI klinikai felhasználásában rejlő potenciál rendkívüli, és várhatóan meghatározó szerepet játszik majd az egészségügy jövőjének formálásában.

A STROKE ELLÁTÁSA

A stroke a leggyakoribb neurológiai betegség, és a fejlett országokban a tartós rokkantság leggyakoribb oka [12]. Incidenciája a világon 100 000 főre vetítve évente 158 eset (kb. 11 millió eset). Stroke okozta halálozás és rokkantság miatt évente több mint 143 millió egészséges életév vesz el [13]. Magyarországon mintegy évi 25–30 000 incidens stroke eset lehet.

A stroke-gyanús tünetekkel érkező betegeknek elsődleges az ischaemiás stroke és vérzéses stroke elkülönítése képalkotó segítségével. Ischaemiás stroke esetén szükséges a definitív károsodás (infarctus) lokalizációjának, kiterjedésének pontos meghatározása és elkülönítése a még megmenthető, de ischaemiás agyszövetből (penumbra), az érelzáródás helyének meghatározása, és ismeretlen idejű tünetkezet esetén a stroke korának meghatározása. Ezen felül a beteg aktuális neurológiai tüneteinek, előzményeinek, vitális és laborparamétereinek, szedett gyógyszereinek (pl. antikoaguláns) az ismerete is szükséges a helyes terápiás döntéshez [14].

Súlyos nagyérellúziós stroke esetén percenként 2 millió idegsejt pusztul el, ezért akut oki kezelése rendkívül sürgős, a reperfüziós terápiák (intravénás thrombolysis és endovascularis thrombectomy) időablaka nagyon szűk: alapesetben 4,5 és 6 óra (fejlett képalkotással kimutatható még megmenthető agyszövet esetén maximum 9 ill. 24 óra). A terápiák

nagy egyéni egészségnyereséggel járnak, ugyanakkor jelentős kockázatúak, mert intracranialis vérzéses szövődménnyel járhatnak, így az indikáció felállítása, a szakszerű kezelés és esetleges szövődményeinek ellátása is nagyfokú speciális szakértelmet igényel [15].

Az interdiszciplináris ellátás a mentőszolgálat, a sürgősségi osztályok, a neurológia, a képalkotás, a neurointervenció, az idegsebészet szoros és gyors együttműködését igényli. Az ellátás infrastruktúra- és szervezési igénye igen magas: állandóan elérhető képalkotó diagnosztikát, folyamatosan üzemelő angiográfiás katéteres labort, az ellátásban résztvevők közti gyors és hatékony kommunikációt és intézmények közti képkommunikációt is igényel. A súlyos nagy-érelzáródásos stroke-esetekben a betegek 90%-a csak egy második intézményben kap definitív ellátást, mert a primer stroke-centrumokban csak az intravénás thrombolysis érhető el; thrombectomiához a beteget egy komprehenzív stroke-centrumba kell átszállítani. Ez a betegút az ún. drip and ship modell, amelynek alternatívája lehet az ún. mothership modell, amiben a súlyos tünetekkel jelentkező (nagyérelzáródásra már prehospitálisan is gyanús) betegeket közvetlenül, a primer centrum kihagyásával egy távolabbi komprehenzív stroke-centrumba szállítják. Így a definitív ellátás szempontjából megspórolható a szekunder transzport idővesztése, de a primer ellátáshoz később jut a beteg, és nem is biztos, hogy szüksége van magasabb progresszivitású ellátásra. Magyarország intézményi infrastruktúrája, földrajzi és úthálózati viszonyai mellett a drip and ship modell tűnik hatékonyabbnak, ami alól kivételt képezhet a sűrűn lakott fővárosi régió.

AZ MI ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI A STROKE-ELLÁTÁSBAN

Az elmúlt évtizedekben a stroke ellátása egyre inkább összetetté vált az orvostudomány és a technológia fejlődése következtében. Az évről évre egyre növekvő mennyiségű új tudományos eredmények és a gyakran frissülő irányelvek alkalmazása állandó kihívást jelent a klinikusok számára. Ezt tetézi a stroke rendkívül magas időfaktora. Mivel a stroke akut ellátása során rendkívül gyorsan kell képalkotó diagnosztikára és nagy mennyiségű egyéb információra alapuló komplex döntéseket hozni egy ellátási hálózat több tagjának közreműködésével, ezért ideális felhasználási területe az MI-alapú döntéstámogató megoldásoknak [16].

A stroke ellátása egymásra épülő és egymásba fonódó lépésekből áll az első észleléstől a definitív kezelésig (1.

ábra). Gyakorlatilag az összes ilyen lépésben szerepe lehet az MI-alapú megoldásoknak, ezeket veszem az alábbiakban sorra.

Tünetek felismerése, segítségkérés

A stroke prognózisának szempontjából a betegség tüneteinek gyors felismerése és az azonnali stroke-kód segélyhívás kardinális jelentőségű. Rögzített bejelentővonalak esetén a stroke-ra jellegzetes kulcsszavak MI-asszisztált hangfelismerésével és automatikusan generált stroke-riadóval történnek próbálkozások.

Prehospitális ellátás

Az elmúlt évtizedekben a prehospitális ellátás hagyományos koncepcióját számos innovatív megoldás modernizálta, amelyekben helyük lehet az MI-alapú megoldásoknak is. A kórházba érkezést megelőző időszak kiemelt feladatai a tünetek és azok kialakulási időpontjának meghatározása, a nagyérelzáródás lehetőségének felvetése a hatékony betegút meghatározására, az esetleges prehospitális diagnosztikaalkotás és célzott transzport, valamint a kapcsolattartás a megfelelő fogadóintézménnyel.

A betegút (drip and ship vs mothership) meghatározásához ideális lenne, ha a nagyérelzáródás fennállása már a prehospitális ellátás során megbízhatóan megállapítható lenne. Számos klinikai skála használatos a világon erre a célra, az Országos Mentőszolgálat eljárásrendje a Rapid Arterial occlusion Evaluation Score-t (a továbbiakban RACE Score) alkalmazza a nagyérelzáródás valószínűségének értékelésére. Amennyiben a kalkulált érték ≥ 5 , 80% a nagyérelzáródás okozta ischaemiás stroke valószínűsége [17].

Az okostelefonos FAST-ED App (Field Assessment Stroke Triage for Emergency Destination) egy olyan platform, amely a stroke-betegek helyszíni gyors értékelésére és a legelőnyösebb betegút kiszámítására alkalmas. Az applikáció automatizált algoritmust alkalmaz, amely figyelembe veszi a beteg életkorát, antikoaguláns használatát, tüneteit és az elsődleges és másodlagos stroke-központok elérhetőségét a helyszín függvényében, valós időben. Ezen komplex adatok értékelése alapján megbecsüli a nagyérelzáródás fennállásának valószínűségét, és kalkulált transzportidőket és kezelési lehetőségeket figyelembe véve kiválasztja a legmegfelelőbb célállomást [18]. A FAST-ED városi környezetben történő alkalmazása biztató eredményeket mutatott a nagyérelzáródásos stroke-betegek azonosításában, jelenleg egy randomizált klinikai vizsgálat zajlik az alkalmazás előnyeinek



1. ábra
A stroke-ellátás lépései (saját szerkesztés)

vizsgálatára, amely a jövőben hasznos támogatója lehet a prehospitális ellátásnak [19].

A stroke prehospitális ellátásának új megközelítése a mobil stroke-egységek (mobile stroke unit, MSU) alkalmazása. Ezek a speciális járművek képesek helyszíni multimodális képalkotásra (CT, CT angiográfia – CTA, esetleg CT perfúzió – CTP), ágy melletti laboratóriumi vizsgálatokra, és telemedicina segítségével kapcsolatba tudnak lépni a kórházi személyzettel [20]. A hagyományos prehospitális ellátás során a stroke diagnózisát csak a kórházba érkezést követően lehet felállítani, mivel ehhez a képalkotó vizsgálatok eredményei szükségesek. Az MSU lehetőséget teremt még a kórházba szállítás előtt a vérzéses stroke diagnózisára, a vérzés kizárására, valamint a nagyérelzáródás (large vessel occlusion, LVO) kimutatására. A helyszíni diagnózisnak köszönhetően a gyógyszeres terápiás beavatkozások azonnal elkezdődhetnek az egységen, és a beteget a kórkép ellátására legmegfelelőbb központba lehet vinni, így elkerülve az időigényes szekunder transzportokat [21]. Az MSU elterjedése is lehetőséget teremt az MI-alapú döntéstámogató rendszerek használatára. Sikeresen alkalmazták mobil egységeken az ischaemia kiterjedését meghatározó, valamint nagyérelzáródás azonosítására képes ML-algoritmust [22,23].

A telemedicina különösen a távoli vagy kevésbé ellátott területeken tesz lehetővé gyorsabb hozzáférést a stroke-betegek számára a kórházi szakorvosi értékeléséhez. A Pulsara egy okostelefonos alkalmazás, amely telemedicinás kapcsolatot teremt a stroke-gyanús betegek ellátását végző prehospitális ellátók és a kórházi stroke-szakemberek között, ezáltal felgyorsítható az összetett sürgősségi ellátási folyamat [24]. A telemedicina alkalmazása lehetőséget kínál az MI-alapú kép- és hangfelismerő megoldások integrálására is.

Sürgősségi kórházi ellátás

A DeepStroke egy DL algoritmuson alapuló rendszer, amelyet a stroke sürgősségi osztályos triázshoz fejlesztettek ki. A program a beteg arcáról készített videófelvételeket és hangadatokat használja a stroke jeleinek azonosítására. A hagyományos klinikai triázssal összehasonlítva érzékenység szempontjából 10,94%-kal jobb eredményt mutat, míg a pontosság tekintetében 7,37%-kal teljesít jobban. A teljes értékelési folyamatot kevesebb mint hat perc alatt képes elvégezni [25].

A stroke kezelése során a betegbiztonság szempontjából kulcsfontosságú feladat a páciens kórtörténetének részletes áttekintése, beleértve a terápiák ellenjavallatainak azonosítását. Gyakran előfordul, hogy jelentős mennyiségű korábbi orvosi dokumentációt kell áttekinteni, ez időigényes folyamat, ami késleltetheti a terápia megkezdését. Az elektronikus orvosi dokumentumok MI segítségével történő feldolgozása képes az akut ellátás szempontjából releváns információk automatikus azonosítására és összefoglalására. Erre a célra natural language processing (NLP) technika használható, amely lehetővé teszi a humán erőforrások hatékonyabb kihasználását, és így javíthatja az ellátás minőségét [26].

Képanalízis és terápiás döntéstámogatás

Míg az ellátás előzőekben leírt lépéseinek MI-támogatása inkább kísérleti fázisban van, addig az MI-asszisztált képanalízis és terápiás döntéstámogatás mára széles körben elterjedt, integráns részei a fejlett világ stroke-ellátásának. Számos cég fejlesztett erre használható megoldásokat, amelyekből jelenleg 3-4 megoldás rendelkezik széles körű hatósági engedélyekkel (FDA-engedély, CE-jelzés), és van használatban világszerte. Magyarországon a Brainomix cég (Oxford, UK) által fejlesztett e-stroke platform használt, ezért ezt fogom részletesebben ismertetni.

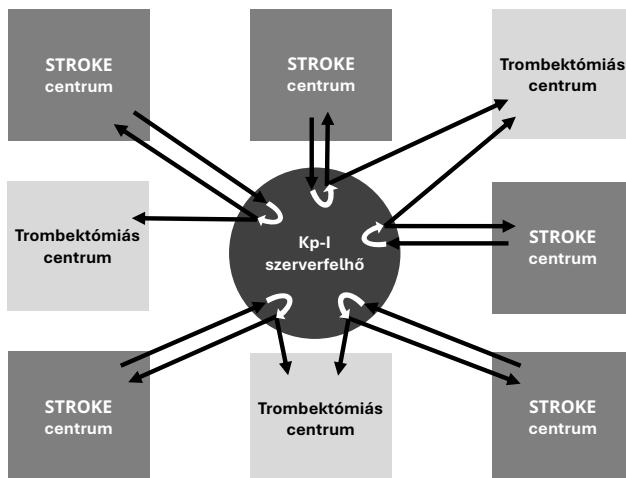
Mint korábban írtam, a technika és az orvostudomány fejlődése miatt a stroke képalkotása és az erre alapuló terápiás döntések egyre inkább bonyolulttá és időigényessé válnak, és egyre inkább speciális szakértelmet igényelnek. Ebben segítenek az MI-alapú megoldások, amelyek a multimodális képalkotók eredményeit nagyon gyorsan kiemezik, az emberi szemnél érzékenyebbek a finom elváltozásokra, amelyeket az eredeti képekre rávetítve annotációkkal kiemelnek, és megállapítják, hogy az előre betáplált (a mindenkor irányelvek szerinti) kritériumok alapján az adott beteg alkalmasnak látszik-e valamilyen reperfúziós kezelésre. Terápiás döntést nem hoznak, csak a képalkotó adatokat feldolgozva kínálják fel a klinikusnak a terápiás döntéshez. A rendszer előnye, hogy az emberi kiértékeléshez képest rendkívül gyors (kb. 15 perc helyett fél perc) és egyenesen magas minőségű, nem függ az értékelő tapasztalatától. A képkiértékelés minősége az expert neuroradiológusokéhoz hasonló, az általános radiológusokénál jobb. A rendszerek mind MR, mind CT elemzésére alkalmasak, de a CT-elemzés elterjedtebb, mert ez jóval szélesebb körben használt modalitás stroke esetén. A megoldás úgy működik, hogy miután elkészült a beteg képalkotó vizsgálata, az adatok egy dedikált szerverre futnak be, amely kb. 30 másodpercen belül visszaküldi a kiértékelését a helyi képfeldolgozó (Picture archiving and communication system – PACS) rendszerbe, és felhasználóbarát módon annotációkkal látja el. Agyvérzés esetén megméri a vér térfogatát. Ischaemiás stroke esetén jelzi: pontosan hol van az ischaemiás károsodás, milyen kiterjedésű (ASPECTS pontozás, natív CT alapján, 2. ábra), hol van érelzáródás, milyen a kollaterális keringés állapota és százalékos értéke a normális ellenoldali keringéshez képest (CT angiográfia alapján, 3. ábra), valamint mekkora és milyen lokalizációjú a kritikusan csökkent keringésű, de még megmenthető agyszövet (CT perfúzió alapján, 4. ábra). Ezek a számszerűsített adatok és képek a PACS rendszer mellett egy weboldalon és az ellátásban résztvevő orvosok mobiltelefon app-jában is azonnal elérhetők (az otthoni készenlétben levő intervenciós szakorvosnak is), ezzel jelentősen megkönnyítve a képkommunikációt. Sőt a rendszer automatikus üzenetet küld az ügyeleti intervenciós szakorvosnak, ha beavatkozásra radiológiailag alkalmas beteget detektál (5. ábra). (A 2-4. ábra csak színesben értelmezhető, ezért ezeket a cikk online verziójához csatolt mellékletben lehet megtekinteni.)

Kommunikációs platform, telemedicinás megoldások, teleradiológiai hálózatok

A döntéstámogató megoldások nemcsak a komplex képi és klinikai adatok feldolgozása, interpretálása és terápiás javaslat adása révén segítik a stroke betegek ellátását, hanem az ellátásban résztvevők hatékony kommunikációját elősegítő platformot is biztosítanak. A drip and ship modellben működő thrombectomiás ellátás szempontjából különösen fontos a különböző egészségügyi intézmények és szakemberek közti kommunikáció. A mobiltelefonon is elérhető applikációk egyrészt lehetővé teszik a kiértékelt képanyag megjelenítését, de lehetőség van figyelmeztetések beállítására is, ekkor a rendszer automatikusan üzenetet küld az ügyeletes intervenciók készülékére, ha thrombectomiára alkalmas beteget detektál. Az applikációk az ellátók közötti hang és videóhívásra, valamint klinikai adatok bevitelére és megosztására is alkalmasak, ami a hagyományos telefonos referálásnál jóval hatékonyabb és gyorsabb kommunikációt, telemedicinális konzíliumot biztosít (5. ábra).

A thrombectomiás ellátás hálózati működését segíti, ha egy teleradiológiai hálózaton keresztül az MI-asszisztált képfeldolgozás egy központi szerveren centralizáltan történik, amely mindegyik perifériáról kaphat képanyagot, amit aztán kiértékelve visszaküld a perifériának és a hozzá tartozó komprehenzív centrumnak is (6. ábra). Ez nemcsak a kép-kommunikációt és referálást segíti a hálózatban, de egységesíti a képalkotó és klinikai protokollokat is, és összességében

ben jelentősen növeli a hálózat működésének szakmai minőségét és hatékonyságát.



6. ábra

A stroke teleradiológiai rendszer sematikus ábrája: a stroke-centrumokban készült képanyagot egy központi szerver dolgozza fel, majd az eredményt visszaküldi a küldő stroke-centrumnak és a releváns thrombectomia-centrumnak is. (forrás: [27], saját szerkesztés)

Prognózisbecslés

Kiemelten fontos kérdés mind a klinikusok, mind a beteg és hozzátartozói számára a bekövetkezett stroke várható kimenetele. A prognózist befolyásoló tényezők közé tartozik a páciens életkora, a stroke típusa, súlyossága, a lézió mérete és lokalizációja, valamint a társuló szövődmények és egyéb társbetegségek. Ezen kívül az orvosi beavatkozások, valamint a kórházi ellátás és a rehabilitáció minősége is fontos szerepet játszik a beteg jövője szempontjából.

Ischaemiás stroke esetén mind a klinikai, mind a képalkotó paraméterek alkalmasak a prognózis előrejelzésére, ám külön-külön csak limitáltak. Az MI fejlődése lehetővé tette multimodális, vagy más néven fúziós neurális hálózatok létrehozását, melyek alkalmasak a képalkotó felvételek és klinikai adatok együttes, MI-alapú feldolgozására [28], és a 90 napos funkcionális kimenetel pontos előrejelzésére. Vérzéses stroke prognózisának előrejelzésére is létrehoztak képalkotó felvételek és klinikai adatok együttes értékelésén alapuló fúziós neurális hálózatokat, amelyek teljesítménye meghaladta a kimenetel előrejelzésére használt becslőskálák (ICH-pontszám és az ICH-GS) teljesítményét [29].

A MAGYARORSZÁGI STROKE TELERADIOLÓGIAI HÁLÓZAT

A Brainomix e-Stroke megoldása Magyarországon először 2017-től vált elérhetővé, majd 2018-tól használjuk a Semmelweis Egyetemen a szerző által kezdeményezett és azóta is futó kutatási együttműködés keretében, ezalatt az MI szoftver a Semmelweis Stroke Centrumban ellátott betegek adatait is felhasználta a tanuláshoz. Az implementálás évében az előző évi adatokhoz képest a thrombolysisek



5. ábra

Az e-Stroke mint kommunikációs platform a különböző ellátók között. A mobiltelefonos applikáció képe: felül a CTA megjelenítése, középen a telefon és chat funkció, alul a számszerűsített lelet és a CT kiértékelés. (Forrás: Brainomix.com)

száma 57%-os, a thrombectomiák száma 71%-os növekedést mutatott [30].

Később a dél- és nyugat-dunántúli régióban pécsi központtal kialakult egy eleinte 3, majd 10 intézményt magába foglaló teleradiológiai rendszer is, amely az intézményekben elkészült CT-felvételeket egy központi szerverre továbbította, itt a Brainomix MI szoftvere értékelte ki, majd az adatok megosztásra kerültek mind a primer ellátóval, mind a thrombectomiás központtal. A kiértékelt képalkotók eredményei elérhetőek voltak az ellátásban részt vevő centrumok saját PACS-rendszerén, webes felületen, és az ellátó orvosok mobiltelefon-applikációiban is. Ez Magyarországon az egészségügyi intézmények és azok eltérő PACS-rendszerei közti képkommunikációt először tette lehetővé, mivel a mai napig nem megoldott a képanyagok felhő alapú megosztása az EESZT-ben. Ilyen módon ezek az intézmények harmonizálták képalkotó és stroke-ellátási protokolljaikat, betegreferálási kritériumaikat, ezáltal növekedett a thrombectomiák száma, és elkerülhetővé váltak a költséges – sokszor helikopteres – felesleges szekunder transzportok [31].

Következő lépésként 2022-től egy EFOP-pályázat támogatásával az akkori Országos Mentális, Ideggyógyászati és Idegsebészeti Intézet (jelenleg Semmelweis Egyetem Idegsebészeti és Neurointervenciók Klinika) felügyeletével létrejött egy további, 28 stroke-centrumot magába foglaló, a fentihez hasonló elven működő teleradiológiai hálózat [27]. Jelenleg országosan havonta kb. 2000 felvételt értékel ki csak ez az utóbbi rendszer, a legtöbb stroke-centrumban kedvezőek a tapasztalatok: a radiológusok értékelik a képkiértékelő program segítségét, a neurológusok örülnek, hogy jóval a radiológiai lelet elkészülte előtt azonnal, menet közben vagy a betegágy mellett is látják a képalkotás eredményét; előfordul, hogy az intervenció szakorvos előbb értesül a kezelendő betegről a mobilapplikáció figyelmeztetése alapján, minthogy szóban referálnák neki az esetet, ráadásul kényelmesen, otthoni készenlétből dönthet a beteg átvételéről. Az, hogy Magyarországon az ország 39 stroke-centrumból 38 része egy MI-asszisztált teleradiológiai rendszernek, világviszonylatban is egyedülálló, és számos lehetőséget kínál epidemiológiai és klinikai tudományos kutatásra, és adat alapú informatikai fejlesztésre is. Fontos volna ezt a jelentős adatvagyonot a Magyar Állam javára felhasználni.

AZ MI ALKALMAZÁSÁNAK JOGI, ETIKAI ÉS ADATVÉDELMI VONATKOZÁSAI

Az egészségügyi szektorban az MI alkalmazása bár rendkívül ígéretes, de sok kihívással, sőt veszéllyel is jár. Az MI alkalmazása során előforduló hibák, tévedések, és az ezek következtében kialakuló esetleges egészségkárosodás vagy más negatív következmények esetén egyértelművé kell tenni a felelősség kérdését. Ennek érdekében az MI-rendszerek klinikai alkalmazásához szigorú szabályozásokra és megfelelő jogszabályi háttérre van szükség. Jelenleg minden MI-alapú döntéstámogató rendszer használatkor klinikai szakorvosok jóváhagyása is szükséges az esetleges tévedések,

hibák felismerésére. Erre a gyártók külön felhívják a felhasználók figyelmét, a jelenleg elérhető szoftverek nem döntéshozó, hanem csupán döntéstámogató rendszerek, így a végső döntés és a felelősség az orvosoké [16]. A jövőben az MI egyre szélesebb körben történő alkalmazása várható az egészségügyben. Ezért a jogi szakemberek, a fejlesztők és orvosok szoros együttműködésére van szükség annak érdekében, hogy egy szabályozott, etikus, és betegek számára biztonságos környezetet alakítsanak ki az MI orvosi alkalmazásához.

Az MI-rendszerek eredményessége jelentősen függ az elérhető adatok minőségétől és mennyiségétől. A megfelelő tanuláshoz hatalmas mennyiségű, változatos és releváns adatra van szükség [5]. Mindazonáltal az érzékeny egészségügyi adatok szigorú védelmet igényelnek, a gyűjtésük és megosztásuk során biztosítani kell az adatvédelmet, valamint kiemelt figyelmet kell fordítani a jogszabályi előírások (GDPR) betartására az esetleges visszaélések elkerülése érdekében. Az MI-megoldásokat fejlesztő cégek a klinikai felhasználás során keletkezett adatokat egy Adatkezelő (általában a kórház) nevében, annak felhatalmazása és utasításai alapján dolgozzák fel pseudonimizálás (álnevesítés) után. A személyes adatok kezelője a kórház, a cégek ezekhez nem férnek hozzá. Ugyanakkor látni kell, hogy a klinikai felhasználás során keletkezett adatok alapján tanulnak, tökéletesednek az MI-megoldások, tehát óriási mennyiségű hasznos adat kerül ezen cégek birtokába, amiből a rendszereiket fejlesztik, cégük értékét növelik (pl. a Brainomix tőzsdei értéke az FDA-befogadás után százszorosára nőtt!). Fontos volna tudatosítani, hogy ennek az adatvagyonnak az átadása csak kölcsönösen hasznos módon történjék meg, különben könnyen találhatja magát egy egészségügyi intézmény (vagy esetünkben egy egész ország) abban a helyzetben, hogy a saját adatain fejlesztett megoldásokért később jóval többet kell fizetnie.

Mivel az orvosi képalkotó adatok digitális formában könnyen manipulálhatók egy generatív MI segítségével (kóros elváltozást lehet „rátenni” vagy „levenni róla”), egy esetleges hackertámadásnak emberéleteket érintő következménye lehet, hogy a politikai következményekről ne is beszéljünk. Ezért ezen adatok védelme kiemelt jelentőségű [32].

KÖVETKEZTETÉSEK

Az MI-alapú döntéstámogató megoldások egyre nagyobb teret kapnak az egészségügyben, főleg azokon a területeken, ahol nagy mennyiségű, sokszor képi adatból kell gyorsan releváns adatokat kinyerni komplex diagnózisalkotáshoz. A stroke-ellátás pontosan ilyen terület, ezért az ellátás folyamatának szinte minden lépésénél szerepe lehet az MI-támogatásnak. Különösen a képelemzés területén terjedtek el a terápiás döntést támogató megoldások, amelyek ezen túlmenően kommunikációs platform szerepükből adódóan egész ellátóhálózatokat tarthatnak össze és egységesíthetnek. Az MI-alapú megoldások tehát jobb minőségű és hatékonyabb betegellátást tehetnek lehetővé. Le kell szögezni azonban,

hogy a hibák és tévedések elkerülése érdekében továbbra is szükség van az emberi intelligenciára, mert a klinikai döntések felelőssége az orvosé. Mivel az MI-alapú megoldások nagy mennyiségű klinikai adaton tanulnak, ezért fontos tudatosítani annak az óriási adatvagyonnak a jelentőségét, amely az egészségügyben keletkezik. Az orvosi képalkotók eredményeinek generatív MI általi manipulálhatósága egy új potenciális veszélyforrás, ezért az érzékeny egészségügyi adatok védelme fontosabb, mint valaha.

Anyagi támogatás: A jelen kézirat elkészítése anyagi támogatásban nem részesült.

Érdekeltségek: Gunda Bence jelenleg is folytat tudományos kutatási együttműködést a Brainomix Ltd.-vel, de a cikk megírására hatással lévő pénzügyi, személyes vagy egyéb érdekeltisége nincs.

Köszönetnyilvánítás: Joó Tamásnak a Semmelweis Egyetem Egészségügyi Menedzserképző Központjából az MI-vel kapcsolatos legújabb ismeretekért és inspirációért, George Harstonnak, Michalis Papadakisnak és Chadaide Zoltánnak a Brainomix-től az évek óta tartó együttműködésért, és Szikora Istvánnak a Semmelweis Egyetem Idegsebészeti és Neurointervenciók Klinikájáról a magyar stroke teleradiológiai hálózat kialakítása fölötti bábáskodásáért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Harari NY: Nexus- a Brief History of Information Networks from the Stone Age to AI: Random House; 2024. p.23
- [2] Bletchley declaration 2023 [Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/ai-safety-summit-2023-the-bletchley-declaration>.
- [3] National Artificial Intelligence Act of 2020, (2020). <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/6216> (acessed: 2025.07.04)
- [4.] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A: Deep Learning: The MIT press; 2016.
- [5] Meskó B, Görög M: Rövid útmutató egészségügyi szakemberek számára a mesterséges intelligencia korában. [A Short Guide for Medical Professionals in the Era of Artificial Intelligence.] Magyar Tudomány. 2020. doi:10.1556/2065.181.2020.10.8
- [6] Hassan N, Slight R, Morgan G et al.: Road map for clinicians to develop and evaluate AI predictive models to inform clinical decision-making. BMJ Health Care Inform. 2023;30(1):e100784. doi:10.1136/bmjhci-2023-100784
- [7] Balogh J, Szócska M, Palicz T et al. A mesterséges intelligencia alapú megoldások fejlesztése és bevezetése az egészségügyben – kézműves manufaktúrától a gyártósorig? [Development and deployment of artificial intelligence-based solutions in healthcare – from artisanal manufacture to production line?] IME. 2022;21(2):56-63. doi:10.53020/IME-2022-206
- [8] Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B et al.: A guide to deep learning in healthcare. Nat Med. 2019;25(1):24-9. doi:10.1038/s41591-018-0316-z
- [9] Topol EJ: High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nat Med. 2019;25(1):44-56. doi:10.1038/s41591-018-0300-7
- [10] McKinney SM, Sieniek M, Godbole V et al.: International evaluation of an AI system for breast cancer screening. Nature. 2020;577(7788):89-94. doi:10.1038/s41586-019-1799-6
- [11] Tamura Y, Takeyasu R, Furukawa A et al.: How COVID-19 affected the introduction of telemedicine and patient reported outcomes among patients with pulmonary hypertension – A report from a referral center in Japan. Circ Rep. 2020;2(9):526-530. doi:10.1253/circrep.CR-20-0088
- [12] Feigin VL, Brainin M, Norrving B, et al.: World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022. Int J Stroke. 2022;17(1):18-29. doi:10.1177/17474930211065917
- [13] World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022 2022 [01.10]. Available from: https://www.world-stroke.org/assets/downloads/WSO_Global_Stroke_Fact_Sheet.pdf
- [14] Powers WJ, Rabinstein AA, Ackerson T et al.: Guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: 2019 update to the 2018 Guidelines for the early management of acute ischemic stroke: A guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. Stroke. 2019;50(12):e344-e418. doi:10.1161/STR.0000000000000211
- [15] Berge E, Whiteley W, Audebert H et al.: European Stroke Organisation (ESO) guidelines on intravenous thrombolysis for acute ischaemic stroke. Eur Stroke J. 2021;6(1):I-LXII. doi:10.1177/2396987321989865
- [16] Bivard A, Churilov L, Parsons M: Artificial intelligence for decision support in acute stroke – current roles and potential. Nat Rev Neurol. 2020;16(10):575-585. doi:10.1038/s41582-020-0390-y
- [17] Perez de la Ossa N, Carrera D, Gorchs M et al.: Design and validation of a prehospital stroke scale to predict large arterial occlusion: the rapid arterial occlusion evaluation scale. Stroke. 2014;45(1):87-91. doi:10.1161/STROKEAHA.113.003071
- [18] Nogueira RG, Silva GS, Lima FO et al.: The FAST-ED App: A smartphone platform for the field triage of patients with stroke. Stroke. 2017;48(5):1278-1284. doi:10.1161/STROKEAHA.116.016026
- [19] Frank B, Lembeck T, Toppe N et al.: FAST-ED scale smartphone app-based prediction of large vessel occlusion in suspected stroke by emergency medical service.

- Ther Adv Neurol Disord. 2021;14:17562864211054962. doi:10.1177/17562864211054962
- [20] Fassbender K, Merzou F, Lesmeister M et al.: Impact of mobile stroke units. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2021;92(8):815-822. doi:10.1136/jnnp-2020-324005
- [21] Helwig SA, Ragoschke-Schumm A, Schwindling L et al.: Prehospital stroke management optimized by use of clinical scoring vs mobile stroke unit for triage of patients with stroke: A randomized clinical trial. *JAMA Neurol*. 2019;76(12):1484. doi:10.1001/jamaneurol.2019.2829
- [22] Grunwald IQ, Ragoschke-Schumm A, Kettner M et al.: First automated stroke imaging evaluation via electronic alberta stroke program early ct score in a mobile stroke unit. *Cerebrovasc Dis*. 2016;42(5-6):332-338. doi:10.1159/000446861
- [23] Czap AL, Bahr-Hosseini M, Singh N et al.: Machine learning automated detection of large vessel occlusion from mobile stroke unit computed tomography angiography. *Stroke*. 2022;53(5):1651-1656. doi:10.1161/STROKEAHA.121.036091
- [24] Bladin CF, Bagot KL, Vu M et al.: Real-world, feasibility study to investigate the use of a multidisciplinary app (Pulsara) to improve prehospital communication and timelines for acute stroke/STEMI care. *BMJ Open*. 2022;12(7):e052332. doi:10.1136/bmjopen-2021-052332
- [25] Cai T, Ni H, Yu M et al.: DeepStroke: An efficient stroke screening framework for emergency rooms with multimodal adversarial deep learning. *Med Image Anal*. 2022;80:102522. doi:10.1016/j.media.2022.102522
- [26] Ali F, Hamid U, Zaidat O et al.: Role of artificial intelligence in TeleStroke: An overview. *Front Neurol*. 2020;11:559322. doi:10.3389/fneur.2020.559322
- [27] Szikora I, Magyar B, Téglás S et al.: Mesterséges intelligencia alapú országos döntéstámogató rendszer bevezetése a hazai stroke-ellátás javítására. [Introduction of artificial intelligence based national decision support system to improve stroke care in Hungary] *LAM*. 2024 (34):145-52
- [28] Zihni E, McGarry BL, Kelleher JD: Moving toward explainable decisions of artificial intelligence models for the prediction of functional outcomes of ischemic stroke patients. In: Linwood SL, editor. *Digital Health*. Brisbane (AU): Exon Publications; 2022.
- [29] Zhao X, Zhou B, Luo Y et al.: CT-based deep learning model for predicting hospital discharge outcome in spontaneous intracerebral hemorrhage. *Eur Radiol*. 2023;34(7):4417-4426. doi:10.1007/s00330-023-10505-6
- [30] Gunda B, Neuhaus A, Sipos I et al.: Improved stroke care in a primary stroke centre using ai-decision support. *Cerebrovasc Dis Extra*. 2022;12(1):28-32. doi:10.1159/000522423
- [31] Bogner P, Chadaide Z, Lenzser G et al.: Stroke ellátást támogató teleradiológiai hálózat a Nyugat- és Dél-Dunántúlon. [Teleradiology-based stroke network in Western and Southern Transdanubia in Hungary]. *Orv Hetil*. 2021;162(17):668-675. doi:10.1556/650.2021.32097
- [32] Palicz T, Sas T, Szabó Z et al.: Magyar kórházakban előfordult zsarolóvírus támadások esetei. [Ransomware attacks in Hungarian hospitals – case studies] *IME*. 2021;20(1):32-38. doi:10.53020/IME-2021-105

A SZERZŐ BEMUTATÁSA

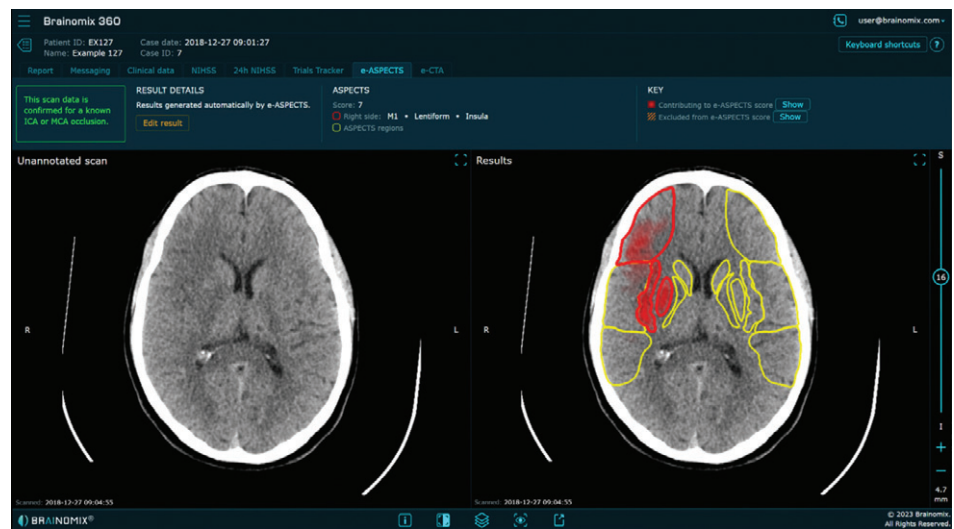


Gunda Bence neurológus, vascularis neurológus, a Semmelweis Egyetem Neurológiai Klinikájának adjunktusa, a Stroke Osztály vezetője, a Semmelweis Egyetem volt Stroke Biztosa, az Európai Stroke Társaság Oktatási Bizottságának tagja. Orvosi diplomáját 2005-ben a Semmelweis Egyetemen szerezte Summa cum laude minősítéssel. Neurológiai szakképzését az Agyérbetegségek Országos Központjában (OPNI) kezdte, majd a Semmelweis Egyetem Neurológiai Klinikáján folytatta. Egy évet a Lausanne-i Egyetemi Klinikán töltött. Doktori fokozatát párizsi kutatásaira ala-

pozta két Brain-prize díjazott professzor mentorálásával (Hugues Chabriot, Marie-Germaine Bousser), agyi kisérbetegségek multimodális MR-képalkotása témában. 2014-ben a londoni King's College Hospital Neurológiai osztályán dolgozott, majd a plymouth-i Derriford Hospital Stroke osztályán lett osztályvezető főorvos. 2015-ben szerzett diplomát az Európai Stroke Társaság Master in Stroke Medicine képzésén. 2016-tól a Semmelweis Egyetem Neurológiai Klinikája az állandó munkahelye. Szakterülete az agyérbetegségek, különösen is az akut stroke-ellátás, a ritka, örökletes és fiatalkori agyérbetegségek, a vascularis fejfájások és a neurovascularis képalkotás. Hazánkban először, 2017-től foglalkozik a MI-alapú döntéstámogató rendszerekkel a stroke-ellátásban.

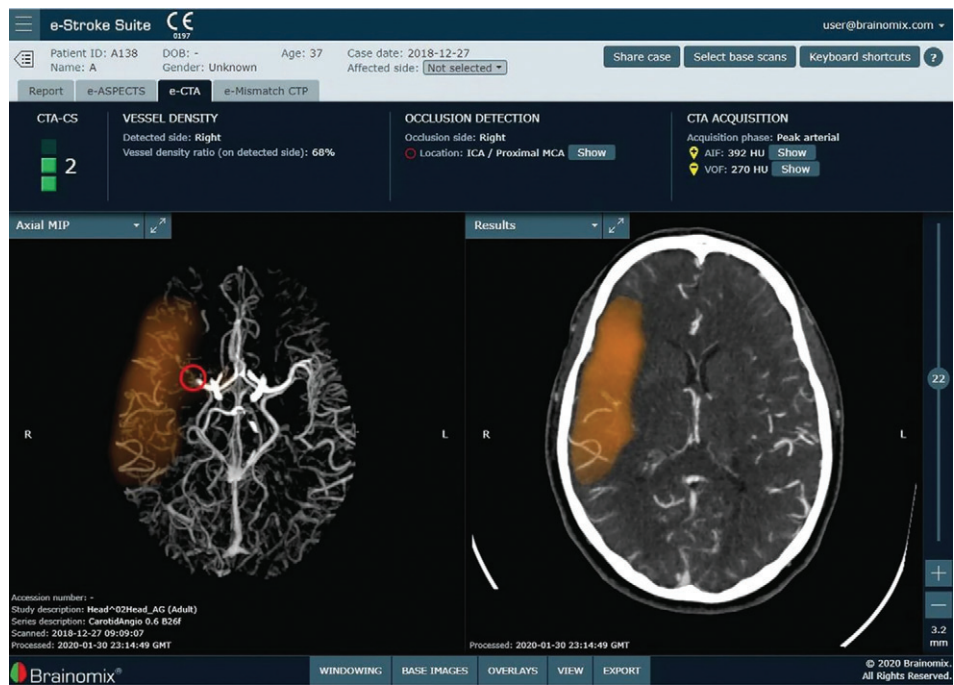
1. számú melléklet

2. ábra
Ischaemiás károsodás megjelenítése natív koponya CT-n (e-ASPECTS). Balra a natív felvétel, jobbra a szoftver általi annotált képek. A piros festés az akut ischaemiás agyterületet jelzi, a sárga régiók az ASPECTS pontozás régiói, a pirossal határolt régiók érintettek ischaemia által. (forrás: Brainomix.com)



2. számú melléklet

3. ábra
Nagyérelzáródás és kollaterális keringés megjelenítése CT angiográfián (e-CTA). A piros karika az érelzáródás helyét jelöli az angiográfián, a narancs-sárga terület a kollaterális erek sűrűségét jelzi. (forrás: Brainomix.com)



3. számú melléklet

4. ábra

Infarctus és penumbra megjelenítése CT perfúzió (e-CTP). A bal felső panelen pirossal jelölt az irreverzibilis infarctus, zölddel a még megmenthető agyszövet, a penumbra. (forrás: Brainomix.com)

