



Robotok, lézerek, kütyük: Pilótaként a műtőben

2. rész: Az intelligens másodpilóta és a jövő etikai dilemmái

Varga Zsolt*, Papp Dávid és Tóth Dezső

Debreceni Egyetem, Sebészeti Klinika, Magyarország

Beérkezett: 2026. február 12. – Elfogadva: 2026. február 13.

Cikksorozatunk második része a sebész-pilóta munkáját támogató technológiai környezetet, az „intelligens másodpilótát” mutatja be a perioperatív ellátás teljes spektrumában. A közlemény a digitális iker modelltől az intraoperatív kiterjesztett valóságon (AR) és a posztoperatív adatvezérelt értékelésen (feketedoboz-rendszereken) át a generatív mesterséges intelligencia (LLM) adminisztrációt tehermentesítő szerepéig tekinti át az innovációkat. A technikai elemzésen túl cikkünkkel szeretnénk felhívni a figyelmet az eszközök „ügynökké” válásának kockázataira, az automatizációs torzítás veszélyeire és az empátia hiányából fakadó etikai dilemmákra. A sakkból ismert „kentaur” modellel szemben a „kapitány és másodpilóta” hierarchia fenntartása mellett foglalunk állást, hangsúlyozva a kiberbiztonság betegjogi és betegbiztonsági jelentőségét, valamint a sebészi szuverenitás megőrzésének szükségességét egy algoritmusok vezérelte jövőben.

KULCSSZAVAK

mesterséges intelligencia, generatív MI, kiberbiztonság, robotsebészet, orvosi etika

Robots, lasers, and gadgets: The surgeon as pilot in the operating room

Part 2: The intelligent co-pilot and future ethical dilemmas

The second part of our article series presents the technological environment supporting the work of the surgeon-pilot: the “intelligent co-pilot” across the entire spectrum of perioperative care. The paper reviews innovations ranging from the digital twin model, through intraoperative augmented reality (AR) and postoperative data-driven assessment (black-box systems), to the administrative burden-relieving role of generative artificial intelligence (LLMs). Beyond technical analysis, our article aims to highlight the risks of tools evolving into “agents,” the dangers of automation bias, and the ethical dilemmas stemming from a lack of empathy. In contrast to the “centaur” model known from chess, we advocate for maintaining the “captain and co-pilot” hierarchy, emphasizing the critical importance of cybersecurity for patient rights and safety, as well as the necessity of preserving surgical sovereignty in an algorithm-driven future.

KEYWORDS

artificial intelligence, generative AI, cybersecurity, robotic surgery, medical ethics

BEVEZETÉS: A TECHNOLÓGIA MINT PARTNER

A cikksorozat első részében a sebészt egy folyamatosan átépülő műszerfalú kísérleti repülőgép pilótájához hasonlítottuk, aki az „üveg pilótafülke” információs túlterhelésében navigál. Láttuk, hogy a biztonság záloga a csapatmunka (crew resource management, CRM) és a parancsnok pilóta attitűd. De ki ül a jobb oldali ülésben? A modern pilótafülkében a parancsnokpilóta munkáját egyre inkább egy intelligens „másodpilóta” segíti: a fedélzeti számítógép és a döntéstámogató rendszerek. A sebészetben a mesterséges intelligencia (MI) és a fejlett robotika tölti be ezt a szerepet, a műtét minden fázisában támogatva a sebész-pilóta munkáját. De mik lehetnek az előnyei, hátrányai és legfőképp a veszélyei egy ilyen rendszernek?

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A SEBÉSZETI DÖNTÉSHOZATALBAN

Vitathatatlan előnye egy ilyen másodpilótának, hogy nem fárad el, nem lesz dekoncentrált, és hatalmas adatbázisból dolgozva képes olyan mintázatokat felismerni vagy javaslatokat tenni,

* Levelező szerző.
E-mail: varga.zsolt@med.unideb.hu

amelyek elkerülhetik az emberi pilóta figyelmét. A sebészetben a mesterséges intelligencia (MI) töltheti be ezt a szerepet, a műtét minden fázisában támogatva a sebész-pilóta munkáját.

Már a preoperatív fázisban – a „repülési terv” elkészítésekor – az MI a radiológus és a sebész egyszerű segédje lehet. A modern képfelismerő algoritmusok képesek a felvételeken az emberi szem számára alig észrevehető apró elváltozásokat (például korai stádiumú daganatokat vagy áttéteket) detektálni [1]. Ennél is fontosabb, hogy a két-dimenziós szeletekből automatikusan a páciensre adaptált, interaktív háromdimenziós modelleket tudnak előállítani. Ezek a virtuális modellek a sebész számára egyfajta „repülési szimulátorként” működnek: a sebész-pilóta a műtét előtt „bepilázhatja” a beteg anatómiáját, a kritikus képletek – erek, idegek, daganathatárok – alkotta veszélyes aszteroidamezőben milyen navigációs stratégiát kell majd alkalmaznia, hol kell extrém óvatossággal eljárnia, és hol engedhet meg egy radikálisabb manővert a teljes onkológiai biztonság érdekében [2]. Például egy májresektóció tervezésekor végigkövetheti a daganatot ellátó erek és az elvezető epeutak lefutását, vagy egy prosztatatektómia előtt feltérképezheti a prosztatata körüli idegek pontos anatómiai viszonyait [3]. A számítógépes tervezés drámaian csökkentheti az intraoperatív meglepetések számát, lerövidítheti a műtét időt és növelheti a beavatkozás onkológiai és funkcionális biztonságát. Ráadásul a 3D modellek a beteggel való kommunikációban is felbecsülhetetlen értékűek: a páciens a műtét előtt szó szerint „körüljárhatja” és megtekintheti a saját daganatát és annak viszonyát a környezetéhez egy virtuális szemüveg vagy monitor segítségével [4]. Ezzel a korábban elképzelhetetlen betekintéssel a beteg sokkal jobban megértheti a tervezett beavatkozást, ami erősíti a bizalmat és a partnerséget a gyógyító csapat és a páciens között.

Az intraoperatív fázisban – a navigáció és végrehajtás során – az MI egy valós idejű helyzetfelismerést támogató másodpilótaként működik. A számítógépes vizualizációs algoritmusok a laparoszkópos vagy robotkamerák élő videóképeit elemezve képesek automatikusan felismerni az anatómiai struktúrákat (például az epehólyagot és az epeutakat egy laparoszkópos cholecystectomy során) [5], azonosítani a sebészeti eszközöket, sőt, akár a műtét fázisokat is [6]. Az ilyen algoritmusok valós idejű visszajelzést adhatnak a sebésznek, mintegy digitális műtét asszisztensként működnek. Ha a rendszer „látja”, hogy a sebész éppen preparál egy érkepletet, figyelmeztethet egy rejtett oldalra vagy javasolhatja hook, olló vagy disszektor használatát a következő lépésben, mert a korábbi több ezer hasonló műtét adatai alapján statisztikailag úgy biztonságosabb [7]. A kiterjesztett valóság itt is szerephez jut: a preoperatív 3D terv vagy a korábban készült képalkotó vizsgálatok eredménye rávetíthető a műtét képre valós időben. Így a sebész-pilóta gyakorlatilag „röntgenlátással” rendelkezik: látja a szabad szemmel nem látható struktúrákat a háttérben, mintha a beteg szövetei átlátszóak lennének. Már ma is használatos például májresektciónál, hogy a sebész AR-szemüvegben látja a májban futó erek térképét a valós képhez illesztve, így milliméter pontossággal tudja megtervezni a resektóció

vonalat [8, 9]. Az intraoperatív fluoreszcens angiográfia (pl. ICG alkalmazásával) szintén reneszánszát éli: a kamera infravörös tartományban érzékeli a keringő ICG festékmolekulákat és megmutatja a szövetek perfúzióját, ezzel ellenőrizve például egy bélanasztomózis vagy benthagyott májrésztel vérellátását [10, 11]. Az MI ebben is tud segíteni: a képeket elemezve kvantifikálja a perfúzió mértékét, objektív adatokat szolgáltatva a sebész számára. Sőt, megjelentek olyan új eszközök is, amelyek más módszerrel, multispektrális kamerákkal valós idejű perfúziós térképet vetítenek az orvos elé: ilyen például az ActivSight rendszer, amely valós idejű véráramlás-figyelést kínál a monitoron egy AR-átfedés formájában, anélkül, hogy ICG-t kellene beadni [12, 13]. Ezek a technológiák afféle műtét GPS-ként működnek: növelik a precizitást és a biztonságot. Ugyanakkor – ahogy azt korábban tárgyaltuk – a rengeteg új információ a kognitív terhelést is fokozhatja, ezért a jövő feladata ezeknek a rendszereknek az ergonomikus, humán faktor szempontból optimális integrálása a műtét környezetébe [14].

A posztoperatív szakban – a kiértékelés és tanulás során – az MI egy fedélzeti adatrögzítőként („feketedobozként”) működhet. A repülésben minden egyes járat adatait rögzítik és egy incidens vagy baleset után ezeket részletesen elemzik a tanulságok levonása érdekében. A sebészetben ez a kultúra még gyerekcipőben jár, de az irány már látszik. Egyre több műtőben rögzítik rutinból a laparoszkópos vagy robotműtétek videóit és új platformok jöttek létre ezek elemzésére [15]. Ilyen például a C-SATS (Crowd-Sourced Assessment of Technical Skills) rendszer, amely anonimizált módon gyűjti a műtét videókat egy felhőalapú könyvtárba, majd MI-algoritmusok és humán szakértők kombinációjával elemzi azokat. A C-SATS objektív, számszerűsítható metrikákat ad a sebész kezébe a teljesítményéről: méri a mozdulatok hatékonyságát, az eszközhasználat precizitását, a szövetkímélő technika mértékét. Egy 2022-es vizsgálat szerint a közösségi (crowdsourced) videóelemzés meglepően pontos: a nem szakértő értékelők aggregált véleménye gyorsabban és költséghatékonyabban jelzi egy sebész technikai tudását, mint a hagyományos szakértői értékelés [16]. Az bátran kijelenthető, hogy a jövő MI-asszisztált orvoslásának kulcsfontosságú, névtelen hősei azok, akik ma az annotálást, vagyis az adatok elemzését végzik [17].

Ennél közvetlenebb klinikai előny, hogy egy esetleges reoperáció során a korábbi felvétel a pilóta számára egyfajta „repülési naplóként” szolgálhat. A sebész visszanezézheti a korábbi beavatkozás minden kritikus pillanatát, az egyedi anatómiai viszonyokat, az észlelt nehézségeket vagy potenciális komplikációkat, ami drámaian javíthatja a második műtét megtervezését és biztonságát, hiszen a pilóta már ismerős terepen, a korábbi tapasztalatok birtokában navigálhat.

Hasonló célt szolgál a kanadai fejlesztésű OR Black Box (ORBB) technológia is, amely a teljes műtét team munkáját monitorozza. Az ORBB nemcsak a videót veszi fel, hanem szinkronban rögzíti az altatógép adatait, a beteg életjeleit, a műtőhangokat és még a műszerek használatát is. Egy ilyen rendszer bevezetése nagy pontossággal tárhatja fel a rejtett hibákat: egy torontói tanulmányban, ahol az OR Black Box-

ot alkalmazták laparoszkópos műtéteknél, kiderült, hogy egy átlagos operáció során medián értékkel számolva 138 (!) alkalommal volt zavaró zaj vagy kommunikációs kiesés, a műszerek vagy eszközök hiánya/hibája az esetek harmadában fordult elő és egy műtét alatt átlagosan 20 technikai malőr történt, ami összességében medián 8 nem kívánt eseményt eredményezett beavatkozásokként [18]. Ezek a számok első olvasatra megdöbbentők, de egyben rávilágítanak a rendszer javításának lehetőségeire is. Az adatelemzés segítségével azonosítani lehet a folyamatok gyenge pontjait (például kiderülhet, hogy a checklisteket nem megfelelő alapossággal követik) és célzott beavatkozásokkal javítani lehet rajtuk [19]. Egy 2022-es beszámoló szerint az ORBB adatai alapján egy kórházban sikerült is növelni a biztonsági ellenőrzőlista betartását és minőségét, miután nyilvánvalóvá váltak a hiányosságok [20]. A posztoperatív adatelemzés tehát – legyen szó C-SATS-ról, OR Black Boxról vagy más rendszerről – a sebészeti minőségbiztosítás és oktatás forradalmian új eszköze lehet. Olyan ez, mint amikor a pilóták szimulátorban gyakorolnak vészhelyzeteket: a saját műtéteink „visszajátzása” és hibáink össze elemzése a tanulási görbe meredekebb szakaszába repíthet bennünket.

Ezt a szimulációs lehetőséget emelik a következő szintre a virtuális valóság (VR) eszközök. A VR-szemüvegek óriási lehetőséget kínálnak a sebész szakképzésben is, hiszen a korábban rögzített, valós műtétek háromdimenziós felvételeit képesek élethű, interaktív környezetbe helyezni [21]. Ebben a virtuális műtőben a beteg veszélyeztetése nélkül elemezhető egy korábbi hiba, de egy rezidens akár célzottan is képezhető egy kritikus műtéti helyzet újraélésével. Az ilyen módszerek nem csupán a betegek biztonságát növelik a kockázatmentes gyakorlás révén, de a jövő sebészei számára a hatékony, tapasztalati alapú képzést és a problémamegoldó képesség javulását is biztosítják [22].

A pilóta folyamatos fejlődésének és önreflexiójának egyik legújabb eszköze a digitális teljesítményanalitika, amelynek sebészeti megfelelője a robotsebészeti platformokhoz kapcsolt alkalmazásokban ölt testet. A Da Vinci rendszert fejlesztő Intuitive Surgical által létrehozott MyIntuitive applikáció például tökéletesen illusztrálja ezt a trendet, és leginkább egyfajta professzionális fitneszalkalmazásként értelmezhető. Ahogyan egy futó a Strava vagy Garmin Connect applikáción keresztül elemzi a lefutott távot, a tempót, a pulzust és a szintemelkedést, úgy a sebész is a telefonján vagy tabletjén követheti nyomon a saját robotsebészeti „teljesítményét”. Az alkalmazás nem kilométereket, hanem a konzolnál töltött időt, a műszerhasználat hatékonyságát, a kamera mozgásának stabilitását, a felesleges mozdulatok arányát és a szimulációs gyakorlatokon elért pontszámokat rögzíti és elemzi. Ez a technológia a szubjektív benyomások („úgy érzem, ez egy jól sikerült műtét volt”) helyett objektív, kvantitatív visszajelzést ad a sebész kezébe [23]. A sebész-pilóta a nap végén, a műtét után visszanezézheti saját „repülési adatait”, azonosíthatja azokat a pontokat, ahol a mozdulatai kevésbé voltak ergonomikusak, ahol túl sokáig tartott egy adott műtéti fázis, vagy ahol a virtuális tréning során javulásra szorul. Ez a fajta adataalapú önelemzés egy újfajta professzionalizmust hoz a szakmába: a folyamatos,

mérhető önfejlesztés kultúráját, ahol a cél nem csupán a műtét sikeres elvégzése, hanem annak mind hatékonyabb, precízebb és biztonságosabb kivitelezése [24]. A MyIntuitive így a pilóta személyes „fedélzeti adatrögzítőjévé” válik, amely elengedhetetlen a modern üveg pilótafülkében való magabiztos és folyamatosan fejlődő navigációhoz.

Nem szabad megfélekezni a technológia egy másik csodájáról, a távjelenlétéről sem. Ma már léteznek olyan platformok (például a Proximie vagy az Avail rendszerek), amelyekkel egy tapasztalt sebész a világ másik pontjáról becsatlakozhat a műtőnkbe élő videón és valós időben adhat tanácsot vagy irányíthat egy beavatkozást [25]. Ezek a megoldások egyfelől a ritka szakértelmet hivatottak „demokratizálni” (hiszen így egy vidéki kórházban is elérhetővé válhat egy világszerte elismert specialista tudása), másfelől a háborús övezetekben vagy űrbéli missziókban lévő orvosok hátországát is erősíthetik [26]. Képzeljük el, milyen lenne, ha egy marsi telepen dolgozó orvos egy földi specialistával együtt, telementorálás segítségével végezhetne életmentő műtétet. A technológia fejlődése ebbe az irányba mutat, noha a kommunikációs késleltetés kihívása még megoldásra vár [27].

A KAPITÁNY DILEMMÁJA: A „KENTAUR” ÉS A „MÁSODPILÓTA” MODELLJE

A humán-MI együttműködés leírására a szakirodalomban elterjedt Garri Kaszparov sakkmetaforája, a „kentaur”. Miután a sakkvilágbajnokot 1997-ben legyőzte az IBM Deep Blue szuperszámítógép, Kaszparov olyan versenyeket kezdeményezett, ahol ember és gép egy csapatban, egymást segítve játszottak. Ezeken az ún. advanced chess (fejlett sakk) vagy kentaur sakk versenyeken rendre bebizonyosodott, hogy egy ember és gép páros, tehát egy „kentaur csapat”, erősebb mind a legjobb nagymesternél, mind a legerősebb számítógépnél, ha külön indulnának. A metafora ereje abban rejlik, hogy hangsúlyozza az emberi stratégiai intuíció és a gépi taktikai precizitás szinergiáját: egyesíti a két fél erősségeit.

Bármennyire is vonzó, a kentaurmetafora a sebészeti kontextusban mégis félrevezető lehet. A kentaur egy mitológiai lény, egyetlen, összeolvadt entitás, ezzel szemben a műtőben a sebész és a technológia sosem olvad össze szó szerint és nem is szabad, hogy összeolvadjanak. A felelősség ugyanis – ahogyan azt a „parancsnok pilóta” elve is kimondja – nem osztható meg: az mindig a humán döntéshozó marad [28]. A sebész egy rendkívül fejlett eszközt használó, de attól elkülönülő, autonóm szakember marad. Ezért pontosabb a „kapitány és intelligens másodpilóta” modell. Ebben az analógiában a technológia aktív, cselekvő partner, de a humán fél (a sebész) marad a végső döntéshozó. A másodpilóta javasol, figyelmeztet, adatokat szolgáltat, sőt, a kapitány engedélyével bizonyos rutinfeladatokat – például a repülőgép esetén az egyenesen tartást vagy magasságtartást, a sebészetben mondjuk a kameravezérlést vagy az idegentestek számlálását – önállóan is

elvégezhet. Ám a végső döntés (leszálljunk-e, megváltoztassuk-e az útvonalat, vészhelyzetben milyen manővert hajtsunk végre, vagy orvosi megfelelőjét tekintve folytassuk-e a műtétet szövödmény esetén, melyik eret lássuk el először, mikor konvertáljunk nyitott műtetre stb.) mindig a kapitányé, vagyis a sebészé marad [29].

Ez a megkülönböztetés nem csupán szemantikai játék, hanem mély etikai és képzési következményekkel jár. Ha a sebészt „kentaurként” képezzük, akkor a technológiával való összeolvadást és kritikátlan ráhagyatkozást tanítjuk. Ha viszont parancsnok pilótaként, akkor a technológia kritikus, de kontrollált használatát, a rendszerszintű gondolkodást, a csapatvezetést és a végső felelősségvállalás momentumát helyezzük a középpontba. A jövő sebészének nem az a feladata, hogy a gép perifériájává váljon, hanem az, hogy a legkomplexebb technológiai környezetben is megőrizze ítélőképességét és vezető szerepét. Érdemes megjegyezni, hogy még Kaszparov „kentaur” sakkjában is végső soron az ember volt az, aki a számítógép javaslatai közül kiválasztotta a lépést – tehát a gyakorlatban ott is a humán fél maradt a döntéshozó. Ugyanez igaz a műtőben: a legokosabb MI sem vállalhat felelősséget és nem ismeri a beteg egyedi preferenciáit, a család elvárásait, a klinikai intuíció finom jeleit – ez mind-mind az emberi orvoslás része marad.

A „kapitány – másodpilóta” modell segít abban is, hogy a csapatmunka dinamikáját helyesen értelmezzük. A modern műtőben a „másodpilóta” nemcsak a gépet jelentheti, hanem akár egy fiatalabb kollégát vagy egy más terület szakorvosát konzílium során. Az MI ebben a keretben tekinthető egy nagyon intelligens rezidensnek vagy másodasszisztensnek, aki sosem fárad el, hihetetlen mennyiségű tudás van a fejében, de mégis szüksége van a vezető sebész tapasztalatára és bölcsességére a döntésekhez. Ez a szemlélet segít elkerülni két szélsőséget: az algoritmus-fétist, amikor a gép szavát szentírásnak tekintjük és az algoritmus-fóbiát, amikor mereven elutasítunk minden MI által javasolt segítséget [30]. A cél a konstruktív dialógus ember és algoritmus között – akárcsak egy jó pilótafülkében a kapitány és az első tiszt között.

A FELELŐSSÉG, AZ AUTONÓMIA ÉS A „DE-SKILLING” ETIKAI KÉRDÉSEI

A technológia gyors fejlődése elkerülhetetlenül felvet számos etikai kérdést, amelyekre a szakmának és a társadalomnak közösen kell választ találnia. Ezek a kérdések a parancsnok pilóta-modell három kulcsterületét érintik: a felelősséget, az autonómiát és a képességek megőrzését.

A felelősség és elszámoltathatóság kérdése a legégetőbb. Mit tegyünk, ha az intelligens másodpilóta hibázik? Ha egy MI-algoritmus egy rejtett hiba vagy téves adat miatt rossz javaslatot ad és a sebész azt követve kárt okoz a betegnek, ki a felelős? A sebész, aki a végső döntést meghozta? A kórház, amely a rendszert beszerezte? Vagy a gyártó, aki az algoritmust fejlesztette? A jelenlegi jogi keretek, amelyek a „hajó kapitánya” elvén alapulnak egyértelműen a sebészre hárítják

a felelősséget. Jelenleg ugyanis az orvosi műhibaperekben nincs olyan irányelv, amely a felelősséget megosztaná egy MI-rendszerrel, még akkor sem, ha a döntést közvetlenül a MI javaslata befolyásolta. A bíróságok ma is azt vizsgálják, hogy „a hasonló képzettségű orvosokhoz képest észszerűen járt-e el” a vádlott orvos. Ha pedig egy orvos követte az MI tanácsát és az hibásnak bizonyult, jelenleg akkor is az orvost tekintik felelősnek. Ez hosszú távon tarthatatlan helyzetet teremthet, hiszen az MI-rendszerek egyre komplexebbek és sok esetben átláthatatlanok („fekete doboz” jellegűek). Felmerül az igény egy új, megosztott felelősségi modell iránt [31]. Egyes jogtudósok már javasolják, hogy az MI-fejlesztők és -gyártók is vállaljanak bizonyos felelősséget, különösen, ha autonóm (emberi beavatkozás nélküli) döntéshozatalról van szó. Az Európai Unióban például készül egy MI felelősségi irányelv, amely magas kockázatú MI-rendszerek meghibásodása esetére egyfajta objektív felelősség (non-fault liability) bevezetését pedzegeti (bár bonyolítja a helyzetet, hogy ez jelenleg visszavonás alatt áll). Az Egyesült Államokban is többen sürgetik, hogy ha egy orvos igazoltan észszerűen, a protokollok szerint használ egy algoritmust, akkor egyértelmű hibája esetén a gyártó is perelhető legyen. Ma még azonban az a realitás, hogy „ha az MI hibázik, az orvost vonják felelősségre” – és nekünk, sebészeknek ennek megfelelően kell eljárunk, azaz mindig felülbírálnak és ellenőrizhetőnek kell tekintenünk a gépi döntéseket [32].

Ez hosszú távon tarthatatlan helyzetet is teremthet, hiszen az MI-rendszerek sok esetben átláthatatlanok. Éppen ezért a jövő fejlesztéseinek egyik legfontosabb iránya az Explainable AI (XAI), azaz a „magyarázható mesterséges intelligencia”. A cél az, hogy a másodpilóta ne csak annyit mondjon: „vágj itt”, hanem tegye hozzá: „azért javaslom a disszekciót itt, mert 98%-os valószínűséggel egy aberráns eret fogsz találni a mélyebb rétegekben”. Csak így, a döntési logika ismeretében várható el a sebésztől, hogy felelős döntést hozzon és ne váljon az algoritmus vak követőjévé [33].

A sebészi autonómia és ítélőképesség megőrzése a másik kritikus pont. Az MI-alapú döntéstámogató rendszerek óriási segítséget jelentenek, de magukban hordozzák a túlzott ráhagyatkozás veszélyét. Az úgynevezett automatizációs elfogultság (automation bias) jól ismert jelenség: hajlamosak vagyunk az automatizált rendszer javaslatát kritikátlanul elfogadni, még akkor is, ha az ellentmond a saját megérzéseinknek vagy tapasztalatunknak. Gondoljunk csak autóvezetés során a különböző navigációs szoftverek használatára, milyen könnyen adjuk át a döntéshozatal egy baleset vagy torlódás során. Ez kétféle hibához vezethet: kommissziós hibához (amikor egy helytelen gépi tanácsot követve hibázunk) és omissziós hibához (amikor valamit elmulasztunk megtenni, csak mert a gép nem jelezte szükségességét). Klinikai vizsgálatok igazolják, hogy az orvosok (még a tapasztaltak is) sebezhetőek az automatizációs elfogultsággal szemben. Egy brit tanulmányban például a háziorvosok 5,2%-ában helyes terápiás döntést változtattak meg helytelenre egy klinikai döntéstámogató rendszer téves javaslata nyomán [34]. Magyarán: minden huszadik esetben az történt, hogy az orvos eredetileg jól gondolkodott, de az MI tanácsára átírta a receptet egy rosszabb választásra.

Ez intő jel számunkra, sebészek számára is. Természetesen bízunk kell a modern rendszerekben, de meg kell őriznünk az egészséges kételkedés képességét. Ha az MI például műtét közben azt jelzi, hogy „ezt a képletet bátran vágja még át”, de mi biztosan tudjuk a műteti szituáció és a preoperatív terv alapján, hogy az információ téves, akkor asszisztensként is merjünk ellentmondani – ahogy az első tiszt is szólhat a kapitánynak, hogy téved az automatika. Az MI nem veszi figyelembe a beteg nem számszerűsíthető egyedi szempontjait, az orvos holisztikus szemléletét, a műtői összképet. Ezért az MI javaslat még hosszú ideig csak javaslat maradhat, soha nem utasítás. Ehhez viszont az kell, hogy a sebész megőrizze saját klinikai ítélőképességét és önállóságát [35]. Paradox módon az MI egyes területeken a túlzott óvatosság irányába is torzíthat: ha mindig a „legbiztonságosabb” vagy statisztikailag legsikeresebb megoldást javasolja, lehet, hogy a kreativitásunk vagy beteg érdekében meghozott bátor döntéseink szenvednek csorbát. Fontos tehát, hogy a jövő sebésze kritikus partnerként tekintsen az MI-re – se nem szolgaként, se nem guruként.

A „de-skilling”, vagyis a készségek leépülésének veszélye, az utolsó nagy kihívás. Lényege, hogy ha egy feladatot állandóan a gép végez helyettünk, mi magunk leszünk róla, és idővel már nem is leszünk képesek elvégezni. A repülésből számos adat utal erre: a modern utasszállító repülőgépeken a pilóták repült idejük 90–95%-ában robotpilótát használnak, így a kézi repülés – különösen a finom manőverek végrehajtása – kevésbé begyakorolt készséggé válik. Ennek következtében a kézi vezérlésben szerzett jártasság csökkenhet, ami vészhelyzetben (amikor az automata kikapcsol vagy hibázik) komoly kockázatot jelent. Az Airbus A380 pilótáinál például felmerült, hogy a ritka manuális repülés miatt kevésbé érzik a gépet, mint akik kisebb, kevésbé automatizált gépeken repülnek.

Ez a jelenség a gasztroenterológiában már nem csupán elméleti veszély, hanem adatokkal igazolt valóság. Egy friss, nagy visszhangot kiváltó, a *The Lancet* folyóiratban publikált vizsgálat azt elemezte, hogyan teljesítenek a vastagbéltükrözést végző orvosok, miután hozzászoktak egy mesterséges-intelligencia-alapú polipfelismerő rendszer használatához. Az eredmények kijózanítóak voltak: amikor az orvosoknak az MI segítsége nélkül, hagyományos módon kellett vizsgálatot végezniük, az adenoma-detekciós rátájuk (ADR) szignifikánsan, 28,4%-ról 22,4%-ra csökkent [36]. Más szavakkal, miután az orvosok megszokták az intelligens másodpilóta jelenlétét, a saját „manuális” képességeik jelek szerint romlottak. A technológia nem csupán segítette, hanem egyúttal el is kényelmesítette őket, csökkentve a vizuális éberségüket, amikor egyedül kellett navigálniuk. Ugyanez a jelenség a sebészetben is fenyeget. Ha a jövő generációja már úgy nő fel, hogy alig végez nyitott műtétet, minden esetet laparoszkóppal, robottal operál vagy VR-szimulátoron gyakorol, akkor mi történik, ha „kikapcsol az automata”? Vajon képes lesz-e a fiatal sebész a rutinszerűen használt technológia nélkül is boldogulni – mondjuk egy akut masszív vérzés esetén azonnal konvertálni és uralni a helyzetet? Vagy képes lesz-e pusztán tapintással megtalálni egy tumort, ha mondjuk elromlik az IR-kamera? Az ilyen

kérdések nem légből kapottak [37]. A válasz kulcsa a képzés. Fontos, hogy a sebészképzés fenntartsa a „stick-and-rudder skills”-t (vagyis „bot- és kormánylapát gyakorlatok”, hogy egy újabb repülés hasonlattal éljünk), vagyis az alapvető manuális készségeket. Ez nem jelenti azt, hogy lépünk vissza a múltba, hanem azt, hogy egy mai modern rezidensnek is meg kell tanulnia kézzel anasztomózt varrni, hallás után eligazodni az elektromos kés vágó és koaguláló hangja között és vészhelyzetben a B tervet végrehajtani, ha a high-tech eszközök cserben hagynak. Az automatizáció hajnalán a pilóták számára bevezették az időszakos „manual flying” tréningeket, hogy kondicionálják a régi reflexeiket. Hasonlóképpen, elképzelhető, hogy a jövőben kötelezővé kell tenni a robotot használó sebészeknek is bizonyos számú hagyományos műtét elvégzését évente, hogy karban tartsák manuális készségeiket. Emellett új készségeket is meg kell tanulni: az adatértelmezés, a gépi rendszerek ismerete, az ember-gép interfész optimális használata ma már éppúgy a sebész kompetencia részévé válik, mint egy sebészi csomó elkészítése vagy a varróanyagok ismerete.

Egy másik fontos fogalom, amely a de-skilling kapcsán szóba került, az a helyzetértékelési képesség (situational awareness) csökkenése. Ha a gép mindig mindent jobban tud, fennáll a veszély, hogy az operatőr „szellemileg kikapcsol”, és pusztán passzív végrehajtóvá válik. A repülésben jól ismert a jelenség, amikor a pilóta annyira bíz az automataban, hogy már nem figyeli a műszereket – például az Air France 447-es járat 2009-es katasztrófájában a pilóták nem vették észre időben, hogy a robotpilóta kikapcsolt és a gép átesésközeli helyzetbe került [38]. A vizsgálat kimutatta, hogy az emberi kezelő monitorozó szerepben rendkívül rossz hatásfokkal működik, figyelme könnyen elkalandozik. A túlzott automatizálás ezért paradox módon éberség csökkenéshez vezethet. A műtőben ennek megfelelője, ha a sebész annyira megbízik a navigációs rendszerben, hogy már nem is építi fel fejben a műteti anatómia képét, vagy annyira ráhagyatkozik a robotra, hogy a saját háromdimenziós térérzékelése tompul. Ez ellen tudatosan kell védekezni: aktívan bevonódva maradni, aktív emberi beavatkozás, vagyis „ember a hurokban” (human-in-the-loop) üzemmódban működni. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy az MI ajánlásait is mindig át kell gondolnunk és szükség esetén felülbírálni. Ahogy Biden amerikai elnök és Hszi kínai elnök 2024-ben közösen leszögezte: a legkritikusabb döntéseket (kontextusukban a nukleáris fegyverek használatát) mindig embernek kell meghoznia, és nem szabad átadni az irányítást a gépeknek [39]. Ez az alapelv az orvoslásra is igaz: a döntés felelőssége soha nem delegálható teljesen.

A GENERATÍV MI, VAGYIS AZ ADMINISZTRÁCIÓ „ROBOTPILÓTÁJA”

A repülés történetében az automatizáció egyik legnagyobb vívmánya nem a felszállás vagy a leszállás átvétele volt, hanem a hosszú, eseménytelen és monoton utazómagasság menedzselése. A pilótafülkében a robotpilóta egyik fő

feladata, hogy ezekben az órákban tehermentesítse a humán személyzetet, megóvva őket a mentális kifáradástól, hogy éberek és frissek maradjanak a kritikus manőverekre.

A sebészetben a „robotpilóta” ezen formája sokáig hiányzott, ám a „nagy nyelvi modellek” (large language models, LLM) és a generatív mesterséges intelligencia megjelenésével végre megérkezett. Hogy megértsük ennek jelentőségét, először a problémát kell látnunk: a modern orvoslás adminisztratív terheit. A 21. századi sebészet paradoxona, hogy miközben az orvos a műtőben csúcstechnológiás eszközökkel dolgozik, a műtőn kívül egy 20. századi adatrögzítő hivatalnok munkáját végzi. Kutatások bizonyítják, hogy egy kórházi orvos munkaidejének jelentős részét – egyes felmérések szerint akár 40–50%-át – nem a betegekkel, hanem a számítógép monitorja előtt tölti [40]. A dokumentációs kényszer, a dekuszok, zárójelentések megírása, a beavatkozás kódok rögzítése és a műtői leírások begépelése olyan kognitív terhet ró a sebészre, amelyet találón „death by paperwork” (papírmunka általi halál) jelenségnek neveznek [41].

Ez az adminisztrációs teher a szakmai kiegésző egyik fő hajtóereje [42]. A sebész, aki egy többórás, komplex műtét után még egy órán át ül a szobában, hogy adminisztrálja azt, amit éppen véghez vitt, nem csupán elfárad, hanem lassan elkoptatja a hivatástudatát is. A beteggel való szemkontaktust felváltja a képernyő bámulása, az empátiát pedig felőrli az adatrögzítés jogi kötelezettsége és monotonája.

Ebbe a helyzetbe robban be a generatív mesterséges intelligencia, mint a háttérben dolgozó, láthatatlan asszisztens. Az új generációs rendszerek már nem egyszerű diktáfonok, amelyek szóról szóra leírják a beszédet. Ezek az algoritmusok értik a kontextust. Az úgynevezett „ambient clinical intelligence” (környezeti klinikai intelligencia) képes arra, hogy a háttérben „hallgatózva” rögzítse az orvos és a beteg közötti beszélgetést, vagy a műtőben elhangzó kulcsszavakat és ezekből automatikusan, strukturált orvosi dokumentációt generáljon [43].

Ez a nyomás inspirálta azokat a célzott fejlesztéseket, amelyek ma már nem távoli ígéretek, hanem a magyar egészségügy számára is elérhető valóság, amennyiben a technika implementációját a jogi háttér is lehetővé teszi a jövőben. Az egyik ilyen algoritmus, a teljesen hazai fejlesztésű MedAssist rendszer például képes arra, hogy a rendelői vizit vagy a konzultáció során elhangzott természetes beszédet valós időben dolgozza fel és abból szakmailag strukturált, azonnal szerkeszthető orvosi szöveget generáljon. Ez a technológia – amely a fejlesztő ígéretek szerint 98%-os szakmai pontossággal dolgozik – képes páciensenként akár 5–10 percet is megspórolni az orvosnak, ami egyetlen rendelési nap alatt órányi felszabadult időt jelenthet.

A sebészetben ez a technológia a multimodális (szöveg és kép egy egyszerre értelmező) modellek révén válik igazán forradalmivá [44]. Képzeljük el a jövő műtői leírását: a rendszer nemcsak a sebész diktálását rögzíti, hanem a laparoskopos torony videójelét is valós időben elemzi. A műtét végén, mire a sebész leveszi a kesztyűt, az MI már el is készítette a műtői leírás tervezetét [45]. Az algoritmus felismeri a főbb lépéseket („12:48:32; az a. cystica műanyag

klippel való ellátása megtörtént”), rögzíti a felhasznált anyagokat, sőt, a videó alapján automatikusan beilleszti a dokumentációba a kritikus pillanatokról készült állóképeket. A zárójelentés elkészítésekor pedig az MI képes szintetizálni a beteg kórtörténetét, a friss laboreredményeket és a műtői történéseket egy koherens, szakmailag pontos és a beteg számára is érthető összefoglalóvá.

Fontos hangsúlyozni: ez a technológia nem a sebész helyett írja alá a dokumentumot. Az „ember a hurokban” elv itt is érvényes: a sebésznek, mint kapitánynak, ellenőriznie és hitelesítenie kell a generált szöveget. Azonban a különbség óriási: egy szöveget létrehozni 20 perc, ellenőrizni és jóváhagyni 2 perc.

Ez a technológiai ugrás nem arról szól, hogy kiváltjuk az orvost. Épp ellenkezőleg: arról szól, hogy felszabadítjuk. A generatív MI visszaadja a sebésznek a legdrágább és legszűkösebb erőforrását: az időt. Azt a felszabaduló időt és mentális kapacitást, amit az „asszisztense” biztosít, a sebész végre arra fordíthatja, amiért eredetileg ezt a hivatást választotta: a beteggel való törődésre, a vizitekre, a hozzátartozók tájékoztatására és a saját regenerációjára.

A paradoxon tehát feloldódni látszik: ahhoz, hogy az orvoslás újra emberarcúvá váljon, a legfejlettebb, embertelenül hatékony gépi intelligenciára van szükségünk, amely csendben elvégzi a gépies munkát a háttérben.

AMIKOR AZ ESZKÖZ ÜGYNÖKKÉ VÁLIK

A technológiai fejlődés eufóriájában hajlamosak vagyunk átsiklani egy fundamentális változás felett, amelyre Yuval Noah Harari *Nexus* című műve világít rá a legélesebben, és amely alapjaiban fenyegeti az orvoslás évezredes ethosát [46]. A sebészet története során mindig eszközöket használtunk. A kovakő késtől a laparoskopos toronyig, sőt, a Da Vinci robotkarjáig minden innováció (jelentős részben) passzív maradt: az emberi akarat meghosszabbítása, amelynek önálló céljai, döntései vagy ötletei nem voltak. A szike nem dönt úgy, hogy máshol vágna, a robotkar nem tagadja meg az utasítást, ha kockázatosnak ítéli a manővert. Az eszköz és a használója közötti viszony egyirányú és hierarchikus volt. Persze mondhatjuk, hogy például a nagy energiájú vágóeszközök a másodpercenkénti ezer mérésével már átvették az irányítást, hogy mikor vágjuk át a tökéletes érforrasztást követően a szöveteket, de a folyamatos impedancia-mérés egy sokkal átláthatóbb, megérthető és befogadható folyamat.

A mesterséges intelligencia belépésével azonban átléptünk egy láthatatlan határt: az emberiség történetében először nem eszközt (tool), hanem ügynököt (agent) alkottunk [47]. Ez a megkülönböztetés drámai súllyal nehezedik a jövő műtőjére. Az MI-alapú döntéstámogató rendszerek – a mi „intelligens másodpilótáink” – már nem passzív végrehajtók. Képesek tanulni, adaptálódni, önállóan döntéseket hozni és ami a legfontosabb: képesek célokat követni. Ez a másodpilóta valójában egy „idegen intelligencia” (alien intelligence) a műtőben. Nem abban az értelemben idegen, hogy földönkívüli, hanem abban, hogy a gondolkodásmódja, a logikája és a világtérképezése alapvetően különbözik az emberi orvostól.

Harari egyik legfontosabb figyelmeztetése az „információ naiv felfogásának” kritikája. A modern orvostudomány – és benne a digitális sebészet – arra a hitre épül, hogy a több adat automatikusan több igazságot és jobb gyógyítást jelent. Gyűjtjük a genomikai adatokat, a radiológiai pixeleket, a fiziológiai paramétereket, abban a meggyőződésben, hogy ha elég információt táplálunk a rendszerbe, a végén kijön a tökéletes, objektív „Igazság” [48].

A *Nexus* azonban rámutat, hogy az információnak nem feltétlenül az igazság feltárása a funkciója. Az információ elsődleges szerepe a történelemben mindig is a kapcsolatteremtés és a rend fenntartása volt. A bürokrácia, a hadsereg vagy egy kórházi menedzsmentrendszer nem az igazságra, hanem a működőképességre és a rendre törekszik.

A veszély abban rejlik, ha a sebész összetéveszti az MI által generált rendet a klinikai igazsággal. A mesterséges intelligencia, mint szervetlen ügynök, statisztikai valószínűségeken és optimalizációs algoritmusokban „gondolkodik”. Számára a beteg nem egy félelemmel és reménnyel teli, egyedi sorssal rendelkező lény, hanem adatpontok halma, egy megoldandó egyenlet.

Képzeliünk el egy nem is olyan távoli szituációt: egy idő, rossz általános állapotú beteg érkezik akut hasi kórképpel, feltételezhetően mesenterialis thrombózissal. A sebész klinikai tapasztalata, intuíciója és empátiája azt súgja: „Van esély, meg kell próbálnunk, a család és a beteg is küzdeni akar.” Ezzel szemben az intelligens másodpilóta – amely hozzáfér több millió hasonló eset kimeneteléhez, a kórház humán és eszköz erőforrás-kapacitásához, valamint finanszírozási protokollokhoz – lefuttatja az elemzését. Az eredmény: „A 30 napos posztoperatív túlélés valószínűsége 12%. A beavatkozás költséghatékonysága erősen negatív. Javaslát: szupportív, palliatív ellátás.”

Ez az a pont, ahol az MI nem eszközként, hanem bürokratikus ügynökként lép fel. Az algoritmus „rendet” teremt: optimalizálja az erőforrásokat, védi a statisztikát. De szolgálja-e az igazságot? Azt az emberi igazságot, hogy minden életért küzdeni kell és hogy a statisztikai 12% az adott egyén számára 100% reményt és valódi túlélést jelenthet [49]?

A legnagyobb kockázat nem az, hogy az MI fellázad ellenünk, ahogy a sci-fi-filmek sugallják. A Harari-féle disztópia sokkal csendesebb és hihetőbb: a kockázat az, hogy mi magunk adjuk át az irányítást, önként. A technológia csábítása ugyanis a kényelemben és a felelősség megosztásában rejlik.

Fentebb utaltunk már rá, ha az algoritmus azt mondja, „nyugodtan disszekálj ebben a síkban”, a sebész ott halad, majd a beteg meggyógyul, mindenki elégedett. De mi történik, ha az algoritmus téved? Vagy ami még rosszabb: mi történik, ha a sebész a saját (helyes) megérzése ellenére hallgat a gépre, mert fél szembemenni a szuper-intelligenciával? Ez az automatizációs torzítás (automation bias) pszichológiai csapdája. Ha a rendszert úgy építjük fel, hogy az MI döntéseit objektívnak és tévedhetetlennek tekintjük, akkor létrehozunk egy áttörhetetlen, digitális bürokráciát.

Egy ilyen rendszerben a sebész lassan degradálódhat a gép végrehajtójává, egyfajta „bio-interfészé”, aki csak azért van ott, hogy a robotkarokat fizikailag felügyelje, de a

szellemi autonómiáját már feladta [50]. Ha rendszeresen használunk különböző gépjármű navigációs applikációkat, akkor most nem indokolatlan, ha ebbe belegondolva némi kellemetlen érzésünk támad.

Fontos megértenünk, hogy ez az „idegen intelligencia” nem gonosz. Egyszerűen csak más. Nem rendelkezik tudattal, nem érez fájdalmat, és nem ismeri a mulandóság tragédiáját. Ebből fakadóan nem képes morális döntéseket hozni, csak matematikaikat.

A modern orvoslás egyik legnagyobb tévedése lehet, ha azt hisszük, hogy az intelligencia (a problémamegoldó képesség) elválaszthatatlan a tudattól (az érzés képességétől). A MI bebizonyította, hogy a magas szintű intelligenciához nincs szükség tudatra. A műtőben tehát egy szuperintelligens, de tudat nélküli entitással állunk szemben. Ha a döntéshozatal teljes egészében átengedjük neki, akkor az orvoslásból kiűzzük az empátiát. Márpedig a gyógyítás nem csupán a biológiai paraméterek helyreállítása (ezt a gép jobban tudja majd), hanem a szenvedés enyhítése és a beteg emberi méltóságának megőrzése. Egy daganatos betegség diagnózisának közlése, egy csontoló műtét utáni pszichés vezetés, vagy a döntés, hogy mikor kell elengedni a kezelést – ezek olyan területek, ahol a „szervetlen ügynök” logikája csődöt mond, mert nem érti, nem értheti a szó általunk ismert tartalmával az emberi létezést.

A Harari által felvázolt jövőkép fényében a „kapitány és másodpilóta” modell nem csupán egy munkaszervezési analógia, hanem egy morális iránytű. A jövő sebészének legfontosabb feladata nem a varrat technikai tökéletessége lesz (azt várhatóan a robotok valóban megoldják), hanem az, hogy szükség esetén tudjon ellentmondani az algoritmusnak.

Képesnek kell lennünk felismerni azt a pillanatot, amikor a statisztikai valószínűség, a hatékonyság és az algoritmus által diktált logika és statisztikai valószínűség szembe megy a humánummal. A kapitánynak kell lennie annak a biztonsági féknek, aki azt mondja: „Látom az adatokat, értem a kockázatot, de a beteg érdekében mégis másképp döntök.” A technológiai viharban, ahol az információ áradata könnyen elmoshatja az igazságot, a sebésznek kell maradnia az emberi tényező, a lelkiismeret és a felelősség hordozójának. Mert egy dolog biztos: az intelligens másodpilótánk a történelem leghatékonyabb bürokratája lehet, de a fájdalmat, a reményt és a részvétet – a gyógyítás valódi princípiumát – soha nem fogja érezni. Ezért a kapitányi székben – már amíg ember gyógyít embert – mindig embernek kell ülnie.

A SEBEZHETŐ HÁLÓZAT: A KIBERBIZTONSÁG

Ahogy az előző részben olvashattuk, a repülés történetének egyik legjelentősebb technológiai váltása a mechanikus rendszerekről a digitális, úgynevezett „fly-by-wire” megoldásokra való átállás volt. A pilóta kormányozdulatait ma már nem bowdenek és drótkötelek továbbítják a csűrőkhöz, hanem elektromos jelek és számítógépek. Ez a váltás soha nem látott precizitást és biztonságot hozott, de megnyitott egy korábban nem létező veszélyforrást: a rendszer távoli feltörhetőségét. Egy mechanikus drótkötelet nem lehet

meghekkelni egy másik kontinensről – egy fedélzeti számítógépet elméletileg igen.

A 21. századi műtő ugyanezen az átalakuláson megy keresztül. A „digitális műtő” (digital operating room) és az „orvosi dolgok internete” (internet of medical things – IoMT) korszaka azt jelenti, hogy a sebészeti eszközök, a robotplatformok, az altatógépek és a képmegjelenítők mind egyetlen, összefüggő hálózatra vannak kötve [51]. A műtő falai, amelyek korábban hermetikusan elzárták a külvilágot a sterilitás érdekében, a digitális térben átjárhatóvá váltak. Ha egy robotsebészeti rendszer, egy telekonzultációs platform vagy egy kórházi mesterséges intelligencia rendszer internetkapcsolaton keresztül kommunikál, az potenciális belépési pontot jelent a kiberbűnözők számára.

A legkézzelfoghatóbb és talán legfélelmetesebb fenyegetés a zsarolóvírusok (ransomware) támadása. A modern egészségügyben az adat nem csupán adminisztráció, hanem maga az életfunkció. Képzeliünk el egy szituációt: egy komplex robotasszisztált műtét közepén járunk, amikor hirtelen elsötétülnek a monitorok, a robotkarok lefagynak és a képernyőn megjelenik egy üzenet: „A rendszer zárolva. Fizessen, hogy visszakapja az irányítást.”

Ez nem egy disztópikus sci-fi-forgatókönyv, hanem a mai valóság. A WannaCry támadás, amely a brit állami egészségügy (NHS) több tucat kórházát érintette, legalább 80 szervezetet bénított meg az egész rendszeren belül [52], vagy a düsseldorfi egyetemi kórház elleni támadás, amely közvetve egy beteg halálához vezetett (mivel a leállt rendszerek miatt át kellett szállítani egy másik városba), mind intő jelek [53].

Még ennél is alattomosabb veszély – és itt visszautalnánk a Harari-féle „információ kontra igazság” dilemmához – az adatok integritásának csendes manipulációja. Kutatók már évekkel ezelőtt demonstrálták, hogy képesek rosszindulatú szoftverrel bejutni egy kórházi hálózatba, és a CT/MR-képeken manipulálni a pixeleket: daganatokat tüntethetnek el vagy éppen nem létező tumorokat generálhatnak a felvételekre, mindezt úgy, hogy az emberi szem (és gyakran az MI is) számára észrevehetetlen marad [54].

Ha a sebész-pilóta műszerei (a navigációs képek) hazudnak, a pilóta hibás döntést fog hozni, miközben teljes jóhiszeműséggel cselekszik. Ez a „kompromittált valóság” a legmélyebb bizalmi válságot okozhatja az orvos-gép kapcsolatban. Ha nem bízhatunk abban, amit a monitoron látunk, az orvoslás alapjai rendülnek meg [55].

A konklúzió egyértelmű: a kiberbiztonság a 21. században megszűnt tisztán informatikai kérdésnek lenni és megbízhatósági kérdéssé transzformálódott. Ahogyan Ssemelweis Ignác korábban felismerték, hogy a láthatatlan kórokozók ellen kézmosással kell védekezni, úgy a mai sebészeknek és kórházi menedzsmentnek el kell sajátítania a „digitális aszepszis” és a „kiberhigiénia” alapelveit. A jövő műtőjében a sterilitás fogalma kiterjed a bitekre és bájtokra is. A többfaktoros hitelesítés, a szegmentált hálózatok, a rendszeres biztonsági frissítések és a „security by design” (tervezett biztonság) elve alapján készült orvosi eszközök éppolyan fontosak lesznek, mint az autokláv vagy a steril kesztyű [56]. A sebész-pilótának pedig – bár nem kell

hackerré válnia – tisztában kell lennie a kockázatokkal, és fel kell készülnie a „manuális üzemmódra” való azonnali visszatérésre, ha a digitális rendszereket támadás éri. A kiberbiztonság nem opció, hanem a „Ne árts” elv digitális kiterjesztése.

Összefoglalva, a technológia-etikai horizonton egyszerre jelenik meg a nagyobb elszámoltathatóság igénye a gyártók és fejlesztők felé, az orvosi autonómia és kritikai képesség megőrzésének szükségessége, valamint a szakmai készségek tudatos ápolásának és továbbörökítésének feladata. Ezekre a kihívásokra nincsenek egyszerű válaszok, de a szakmai közösségnek már most el kell kezdenie a diskurzust. Szakmai társaságoknak, kollégiumoknak, etikai testületeknek, jogalkotóknak és a szélesebb nyilvánosságnak közösen kell kialakítania azokat a normákat és szabályokat, amelyek mentén a technológia úgy integrálható az orvoslásba, hogy közben az orvoslás lényege, az empatikus, felelős, humánus gyógyítás ne vesszen el.

VEZÉRFONAL A JÖVŐ SEBÉSZEI SZÁMÁRA

A sebészeti szakma történelmi léptékű átalakulás kellős közepén áll. Ez a technológiai forradalom nem egy múltó divathullám, hanem egy megállíthatatlan, a szakma alapjait újraformáló folyamat. A közleményben bemutatott, repülésből kölcsönzött metaforák arra világítanak rá, hogy a legnagyobb kihívást nem maga a technológia komplexitása jelenti, hanem a változás példátlan sebessége, illetve az ehhez való humán alkalmazkodás nehézsége – legfőképp pedig annak eldöntése, hogy ki vezeti a gépet: az algoritmus vagy az ember?

A megoldás nem a technológia elutasítása vagy a múltba való visszavágyódás, de nem is a kritikátlan, minden újdonságot azonnal alkalmazó lelkesedés, hiszen azzal önként adjuk át az irányítást ismeretlen, szervesen ügynököknek. A megoldás egy újfajta szakmai identitás és szemléletmód kialakítása, a parancsnok pilóta-identitás megerősítése, amely a szilárd hagyományos alapelveket ötvözi a nyitottsággal és a folyamatos tanulás képességével. Ez a belső iránytű segít felismerni: a sebész a felelős vezető, aki kezében tartja az irányítást, de mellette ott van egyre több és okosabb „másodpilóta” – legyen az robot, generatív MI vagy maga a csapat –, akiket nem szolgálnia, hanem irányítania kell és akinek a bevonásával biztonságosabban és hatékonyabban érhet célba.

A végső cél pedig messze túlmutat a technológián. A jövőkép egy olyan sebészet, ahol a gépek átveszik a repetitív, mechanikus feladatokat, a dokumentáció terhéért és a kimerítő adatelemzést, felszabadítva ezzel a sebész kognitív és érzelmi kapacitáit. A pilóta, aki megbíz a műszereiben, de képes bármikor felülbírálni azokat, végre felemelheti a tekintetét a műszerfalról és a horizontra nézhet. Paradox módon tehát a leghatékonyabb, „idegen intelligenciával” felszerelt műtő teremtheti meg annak lehetőségét, hogy egy mélyen emberi orvoslást valósítsunk meg. Ahol az időt és a figyelmet – amit a gép megspórolt nekünk – visszaadjuk annak, akitől a rendszer elvette: a betegnek. Ahogyan a

repülésben is a csúcstechnika és a humán faktor harmóniája hozta el a valaha volt legbiztonságosabb légi közlekedést, úgy a sebészetben is hiszünk abban, hogy a technológia – ha helyesen alkalmazzák – nem elidegeníti a beteget és az orvost, hanem közelebb hozza azokat egymáshoz.

Cikksorozatunk záró, harmadik részében ezért megfordítjuk a perspektívát. Kilépünk a pilótafülkéből, és leülünk az „utas” mellé. Megvizsgáljuk, mit vár el a 21. századi beteg ettől az úrkorszaki orvoslástól. Vajon a tökéletes statisztikát óhajtja jobban vagy a megértő embert? Hogyan éli meg a „marsi magányt” a high-tech diagnosztika útvesztőjében? És legfőképpen: hogyan használhatjuk a digitális másodpilótáinkat a fenti célok elérésére. Mert végső soron a repülőgép és a személyzet van az utasért, nem fordítva.

IRODALOMJEGYZÉK

- Koetzier LR, Mastrodicasa D, Szczekutowicz TP, van der Werf NR, Wang AS, Sandfort V, et al. Deep learning image reconstruction for CT: technical principles and clinical prospects. *Radiology* 2023; 306(3): e221257.
- Oh N, Kim JH, Rhu J, Jeong WK, Choi GS, Kim JM, et al. Automated 3D liver segmentation from hepatobiliary phase MRI for enhanced preoperative planning. *Sci Rep* 2023; 13(1): 17605.
- Shirk JD, Reiter R, Wallen EM, Pak R, Ahlering T, Badani KK, et al. Effect of 3-Dimensional, virtual reality models for surgical planning of robotic prostatectomy on trifecta outcomes: a randomized clinical trial. *J Urol* 2022; 208(3): 618–25.
- Khan A, Sellyn GE, Ali D, Moazzam Z, Samaras H, McChesney SL, et al. Three-dimensional-printed models and shared decision-making: a cluster randomized clinical trial. *JAMA Netw Open* 2025; 8(6): e2513187.
- Yin SM, Lien JJ, Chiu IM. Deep learning implementation for extrahepatic bile duct detection during indocyanine green fluorescence-guided laparoscopic cholecystectomy: pilot study. *BJS Open* 2025; 9(2).
- Shinozuka K, Turuda S, Fujinaga A, Nakanuma H, Kawamura M, Matsunobu Y, et al. Artificial intelligence software available for medical devices: surgical phase recognition in laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc* 2022; 36(10): 7444–52.
- Wagner L, Jourdan S, Mayer L, Muller C, Bernhard L, Kolb S, et al. Robotic scrub nurse to anticipate surgical instruments based on real-time laparoscopic video analysis. *Commun Med (Lond)* 2024; 4(1): 156.
- Ramalhinho J, Bulathsinhala S, Gurusamy K, Davidson BR, Clarkson MJ. Assessing augmented reality displays in laparoscopic liver surgery - a clinical experience. *Surg Endosc* 2025; 39(9): 5863–71.
- Oh MY, Yoon KC, Kong HJ, Jang T, Choi Y, Kim J, et al. Leveraging augmented reality for dynamic guidance in 3-dimensional laparoscopic and robotic liver surgery: a prospective case series study. *Ann Surg Treat Res* 2025; 109(1): 44–52.
- McEntee PD, Singaravelu A, McCarrick CA, Murphy E, Boland PA, Cahill RA. Quantification of indocyanine green fluorescence angiography in colorectal surgery: a systematic review of the literature. *Surg Endosc* 2025; 39(4): 2677–91.
- Maroli A, Paoluzzi Tomada E, Foppa C, Carvello M, Ris F, Hompes R, et al. Indocyanine green fluorescence to prevent anastomotic leak in colorectal surgery: an updated systematic review and meta-analysis on randomized controlled trials. *Surg Endosc* 2026.
- Liu YZ, Shah SK, Sanders CM, Nwaiwu CA, Dechert AF, Mehrotra S, et al. Utility and usability of laser speckle contrast imaging (LSCI) for displaying real-time tissue perfusion/blood flow in robot-assisted surgery (RAS): comparison to indocyanine green (ICG) and use in laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 2023; 37(6): 4803–11.
- Burstein MD. ActivSight intraoperative imaging system; 2021. Available from: https://www.sages.org/publications/tavac/activsight-intraoperative-imaging-system/?utm_source=chatgpt.com.
- Almukhtar A, Caddick V, Naik R, Goble M, Mylonas G, Darzi A, et al. Objective assessment of cognitive workload in surgery: a systematic review. *Ann Surg* 2025; 281(6): 942–51.
- Pugh CM, Hashimoto DA, Korndorffer JR, Jr. The what? How? And who? Of video based assessment. *Am J Surg* 2021; 221(1): 13–8.
- Barnhill CW, Kaplan SJ, Alseidi AA, Deal SB. A comparative analysis of video-based surgical assessment: is evaluation of the entire critical portion of the operation necessary? *Surg Endosc* 2022; 36(9): 6719–23.
- Dick L, Boyle CP, Skipworth RJE, Smink DS, Tallentire VR, Yule S. Automated analysis of operative video in surgical training: scoping review. *BJS Open* 2024; 8(5).
- Jung JJ, Juni P, Lebovic G, Grantcharov T. First-year analysis of the operating room black box study. *Ann Surg* 2020; 271(1): 122–7.
- Al Abbas AI, Meier J, Daniel W, Cadeddu JA, Bartolome S, Willett DL, et al. Impact of team performance on the surgical safety checklist on patient outcomes: an operating room black box analysis. *Surg Endosc* 2024; 38(10): 5613–22.
- Al Abbas AI, Sankaranarayanan G, Polanco PM, Cadeddu JA, Daniel W, Palter V, et al. The operating room black box: understanding adherence to surgical checklists. *Ann Surg* 2022; 276(6): 995–1001.
- Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg* 2002; 236(4): 458–63. discussion 63–4.
- Bruening DM, Truckenmueller P, Stein C, Fuellhase J, Vajkoczy P, Picht T, et al. 360 degrees 3D virtual reality operative video for the training of residents in neurosurgery. *Neurosurg Focus* 2022; 53(2): E4.
- Hung AJ, Chen J, Jarc A, Hatcher D, Djaladat H, Gill IS. Development and validation of objective performance metrics for robot-assisted radical prostatectomy: a pilot study. *J Urol* 2018; 199(1): 296–304.
- Gerull WD, Kulason S, Shields MC, Yee A, Awad MM. Impact of robotic surgery objective performance indicators: a systematic review. *J Am Coll Surg* 2025; 240(2): 201–10.
- Greenfield MJ, Luck J, Billingsley ML, Heyes R, Smith OJ, Mosahebi A, et al. Demonstration of the effectiveness of augmented reality telesurgery in complex hand reconstruction in Gaza. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2018; 6(3): e1708.

26. Cizmic A, Haberle F, Preukschas AA, Hampe L, Bintintan V, Hackert T, et al. Telestration with augmented reality in minimally invasive and robotic-assisted surgery: a scoping review. *Surg Endosc* 2025; 39(12): 8000–13.
27. Pantalone D, Faini GS, Cialdai F, Sereni E, Bacci S, Bani D, et al. Robot-assisted surgery in space: pros and cons. A review from the surgeon's point of view. *NPJ Microgravity* 2021; 7(1): 56.
28. Bleher H, Braun M. Diffused responsibility: attributions of responsibility in the use of AI-driven clinical decision support systems. *AI Ethics* 2022; 2(4): 747–61.
29. Sokol K, Fackler J, Vogt JE. Artificial intelligence should genuinely support clinical reasoning and decision making to bridge the translational gap. *NPJ Digit Med* 2025; 8(1): 345.
30. Giebel GD, Raszke P, Nowak H, Palmowski L, Adamzik M, Heinz P, et al. Problems and barriers related to the use of AI-Based clinical decision support systems: interview study. *J Med Internet Res* 2025; 27: e63377.
31. Price WN, II, Gerke S, Cohen IG. Potential liability for physicians using artificial intelligence. *JAMA* 2019; 322(18): 1765–6.
32. Cahill RA, Duffourc M, Gerke S. The AI-enhanced surgeon - integrating black-box artificial intelligence in the operating room. *Int J Surg* 2025; 111(4): 2823–6.
33. Abbas Q, Jeong W, Lee SW. Explainable AI in clinical decision support systems: a meta-analysis of methods, applications, and usability challenges. *Healthcare (Basel)* 2025; 13(17).
34. Goddard K, Roudsari A, Wyatt JC. Automation bias: empirical results assessing influencing factors. *Int J Med Inform* 2014; 83(5): 368–75.
35. Khera R, Simon MA, Ross JS. Automation bias and assistive AI: risk of harm from AI-Driven clinical decision support. *JAMA* 2023; 330(23): 2255–7.
36. Budzyn K, Romanczyk M, Kitala D, Kolodziej P, Bugajski M, Adami HO, et al. Endoscopist deskilling risk after exposure to artificial intelligence in colonoscopy: a multicentre, observational study. *Lancet Gastroenterol Hepatol* 2025; 10(10): 896–903.
37. Monteith S, Glenn T, Geddes JR, Whybrow PC, Achtyes ED, Bauer R, et al. Artificial intelligence and deskilling in medicine. *Br J Psychiatry* 2026; 1–3.
38. civile.BdEedAplsdla. Final Report On the accident on 1st June 2 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF 447 Rio de Janeiro - Paris 2012. Available from: https://www.faa.gov/sites/aa.gov/files/AirFrance447_BEa.pdf.
39. Lima USM. Readout of President Joe Biden's meeting with President Xi Jinping of the people's Republic of China; 2024. Available from: <https://pe.usembassy.gov/readout-of-president-joe-bidens-meeting-with-president-xi-jinping-of-the-peoples-republic-of-china/>.
40. Sinsky C, Colligan L, Li L, Prgomet M, Reynolds S, Goeders L, et al. Allocation of physician time in ambulatory practice: a time and motion study in 4 specialties. *Ann Intern Med* 2016; 165(11): 753–60.
41. Levy DR, Withall JB, Mishuris RG, Tiase V, Diamond C, Douthit B, et al. Defining documentation burden (DocBurden) and excessive DocBurden for all health professionals: a scoping review. *Appl Clin Inform* 2024; 15(5): 898–913.
42. Gesner E, Gazarian P, Dykes P. The burden and burnout in documenting patient care: an integrative literature review. *Stud Health Technol Inform* 2019; 264: 1194–8.
43. Stults CD, Deng S, Martinez MC, Wilcox J, Szwedinski N, Chen KH, et al. Evaluation of an ambient artificial intelligence documentation platform for clinicians. *JAMA Netw Open* 2025; 8(5): e258614.
44. Das A, Khan DZ, Hanrahan JG, Marcus HJ, Stoyanov D. Automatic generation of operation notes in endoscopic pituitary surgery videos using workflow recognition. *Intell Based Med* 2023; 8: 100107.
45. Khanna A, Wolf T, Frank I, Krueger A, Shah P, Sharma V, et al. Enhancing accuracy of operative reports with automated artificial intelligence analysis of surgical video. *J Am Coll Surg* 2025; 240(5): 739–46.
46. Harari YN. Nexus: a brief history of information networks from the stone age to AI. New York: Random House; 2024.
47. Rahwan I, Cebrian M, Obradovich N, Bongard J, Bonnefon JF, Breazeal C, et al. Machine behaviour. *Nature* 2019; 568(7753): 477–86.
48. Cao Y, Deng L, Liu X, Feng Z, Gao Y. Ethical challenges in the algorithmic era: a systematic rapid review of risk insights and governance pathways for nursing predictive analytics and early warning systems. *BMC Med Ethics* 2025; 26(1): 151.
49. Elgin CY, Elgin C. Ethical implications of AI-driven clinical decision support systems on healthcare resource allocation: a qualitative study of healthcare professionals' perspectives. *BMC Med Ethics* 2024; 25(1): 148.
50. Verdicchio M, Perin A. When doctors and AI interact: on human responsibility for artificial risks. *Philos Technol* 2022; 35(1): 11.
51. Sadhu PK, Yanambaka VP, Abdelgawad A, Yelamarthi K. Prospect of internet of medical things: a review on security requirements and solutions. *Sensors (Basel)* 2022; 22(15).
52. Office NA. Report by the comptroller and auditor general department of health investigation: wannacry cyber attack and the NHS; 2018.
53. Niki O, Saira G, Arvind S, Mike D. Cyber-attacks are a permanent and substantial threat to health systems: education must reflect that. *Digit Health* 2022; 8: 20552076221104665.
54. Mirsky Y, Mahler T, Shelef I, Elovici Y. CT-GAN: malicious tampering of 3D medical imagery using deep learning. In: Proceedings of the 28th USENIX conference on security symposium. Santa Clara, CA, USA: USENIX Association; 2019. pp. 461–78.
55. Chu LC, Anandkumar A, Shin HC, Fishman EK. The potential dangers of artificial intelligence for radiology and radiologists. *J Am Coll Radiol* 2020; 17(10): 1309–11.
56. Administration USDoHaHSA. Cybersecurity in medical devices: quality management system considerations and content of pre-market submissions guidance for industry and food and drug administration staff; 2026.