

3D nyomtatott orvosi eszközök felhasználhatósága sürgősségi és honvédkatasztrófaorvostani ellátásban

Tézisfüzet



Molnár Ferenc József

Interdiszciplináris Orvostudományok Doktori Iskola D93

Doktori Iskola vezető: Dr. Gallyas Ferenc

Programvezető: Prof. Dr. Nyitrai Miklós

Témavezető:

Dr. Maróti Péter egyetemi docens

Pécsi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar

Orvosi Készségfejlesztő és Innovációs Központ – Védelem-egészségügyi Kiválósági Központ

2025

Bevezetés

A honvéd- és katasztrófaorvostan fejlődése

A tömeges sérüléssel és katasztrófahelyzettel összefüggő diszciplína tudományának kialakulása az ipari forradalom korára nyúlik vissza, amikor a nagy méretű konfliktusok, háborúk és ipari balesetek rávilágítottak a tömeges sérültellátás szervezési problémáira. A modern katasztrófaorvostan alapelvei a 20. század folyamán születtek meg, az első világháborútól kezdődően. A katonai tapasztalatokra alapozva a tömeges sérültek gyors triázsának, sürgősségi ellátási protokolljainak, valamint a szervezett logisztikai rendszer kialakításának alapjait alkották meg, ami mára globális irányelvvé vált (pl. NATO irányelvek). Ezek magukban foglalják az első területi vagy harctéri szintű ellátási (ROLE-1) és a komplexebb, regionális szintű központokban lévő (ROLE-2 és ROLE-3) beavatkozások protokolljait, amelyeket a nemzetközi szervezetek folyamatosan adaptálnak a változó kihívásokhoz. A komplex, tömeges sérüléssel járó eseményekhez való felkészülés hierarchikus és szervezett rendszerének kialakítása, illetve az ellátási lánc gyors helyreállítása a sürgősségi orvoslás egyik legnagyobb kihívása. A protokollokat folyamatosan finomítják a háborús és civil tapasztalatok, a technológiai fejlődés, valamint a környezeti krízisek változatossága ellenére is szükséges, gyors és hatékony, de elégséges beavatkozásokra törekedve. A 21. századi történelem során a technológiai fejlődés alapvetően meghatározta a katasztrófaorvostan lehetőségeit. A helyszíni ellátáshoz alkalmazott modern eszközök mentőhelikopterek, mobil konténerkórházak, hordozható képalkotó és diagnosztikai berendezések megteremtik a lehetőségét a gyors, és célzott beavatkozásoknak, és a helyszíni állapot stabilizálásnak. A háborúból tanulva mára a strukturált protokollok (pl. MARCH, ABCDE) és szervezettség mellett a technológiai innovációk, így a 3D nyomtatás, a mesterséges intelligencia, a hordozható diagnosztikai eszközök elengedhetetlen részeivé kezdenek válni a hatékony tömeges sérültellátásnak. Az egyre összetettebb kihívások (pl. bio- és nukleáris események, terrorcselekmények, járványok) megkövetelik a folyamatos adaptációt, a szervezett és rugalmas stratégiák fejlesztését, valamint a technológia mihamarabbi átültetését az ellátásba.

A 3D nyomtatás elméleti alapjai és alkalmazási lehetőségek a katasztrófaorvostanban és a sürgősségi ellátásban

A 3D nyomtatás, mint additív gyártási eljárás, az 1980-es években vált technológiailag elérhetővé, elsőként a sztereolitográfia (SLA) technológia révén, amely az UV-fény általi fotopolimerizáció elvét alkalmazza. Ezt követte a Fused Filament Fabrication (FFF vagy FDM azaz szálhúzásos) módszer, mely olvasztott műanyag szálak rétegenkénti felépítésével készíti

el az objektumokat. A technológia gyors fejlődésével lehetővé vált komplex geometriai struktúrák, például anatómiai modellek, személyre szabott implantátumok, sőt biokompatibilis anyagból készült szövetek és szervek 3D nyomtatása is. A technológia alapját az anyagrétegezés és az számítógépes vezérlés adja, amely lehetővé teszi rendkívül precíz és egyedi eszközök gyors előállítását. A multiparaméteres irányítás révén (sebesség, hőmérséklet, rétegvastagság) a nyomatok mechanikai és biológiai tulajdonságai finomhangolhatók, így alkalmasak orvosi célokra, például csontpótló, fogpótló vagy szöveti modellezési feladatokra, orvostechikai eszközök elkészítésére.

Széleskörű alkalmazási lehetőségek az egészségügyben

A biotechnológiai fejlődés következtében a 3D nyomtatás jelentős szerepet tölt be a regeneratív medicinában, például szöveti modellezés, organoidok, vagy funkcionális szövetek (pl. bőr, csont, fog) kísérleti nyomtatásában, továbbá a páciens-specifikus eszközök, például ortézisek, protézisek és egyedi sebészeti implantátumok gyártásában. A katasztrófaorvostani alkalmazások közé tartozik a gyorsan előállítható eszközrendszerek, például MAYO-tubus, diagnosztikus eszközök sebészeti segédeszközök, illetve például az egyedi ollók, szikenyek, fogorvosi fogók, fonendoszkópok nyomtatása. Különösen értékes ez a technológia olyan helyszíneken, ahol nem áll rendelkezésre hagyományos gyártó- vagy raktárkapacitás. Vagy esetleg olyan helyen, ahol az ellátási lánc megbízhatatlan vagy sérült.

A problémakör és a kutatási kihívások összefoglalása

A hazai és nemzetközi katasztrófaorvostani gyakorlatban jelentős kihívást jelent az eszközellátás megfelelő szintű biztosítása olyan helyszíneken, ahol a hagyományos gyártási és szállítási láncok megbízhatatlanok vagy sérültek. Ugyanez figyelhető meg a sürgősségi orvoslásban az olyan időszakokban, mint például a COVID-19 okozta járványhelyzet. Továbbá ez különösen igaz a konfliktusövezetek, távoli vagy elzárt területek esetében, ahol a beszerezhetőség, a szállítási idő és a gyártási kapacitás szinte lehetetlenné teszik a folyamatos, stabil eszközellátást.

A megoldás egyik kulcsfontosságú iránya az adaptív, helyben gyártható, személyre szabott, gyorsan és olcsón előállítható orvosi eszközök fejlesztése. Ennek elengedhetetlen technológiai alapja a 3D nyomtatás, mely lehetőséget ad a 'self-sufficiency' („önellátás”) és a gyors reagálás paradigmájának megvalósítására. Azonban ennek gyakorlati alkalmazása – különösen a mechanikai szilárdság, a sterilizálhatóság és a technikai megbízhatóság – összetett kutatási kérdést jelent, melynek megválaszolása hozzájárulhat a katasztrófaorvostan hatékonyságának jelentős növeléséhez. További kihívás, hogy az additív gyártás során nyert

eszközöknek meg kell felelniük a klinikai és szabályozási követelményeknek, legyen szó például az FDM vagy CFR technológiával készült eszközök mechanikai szilárdságáról vagy biológiai kompatibilitásáról.

Célkitűzések

- Céljaink közé tartozott megtalálni azon gyártástechnológiákat, amelyek biztosítják a katasztrófaorvoslásban használható eszközök szerkezeti integritását és az elvárt terhelhetőséget.
 - A Pavlovsky és munkatársai által fejlesztett Glia-modell alapján készített 3D nyomtatott fonendoszkóp és az általunk modellezett MAYO-tubusok tesztelése szimulált környezetben azon kérdés megválaszolására, hogy a betegágy mellett milyen teljesítményt nyújtanak eszközeink a gyakorlatban.
 - Vizsgálatainkban arra is kerestük a választ, hogy a költséghatékonyságtól függetlenül képesek vagyunk-e a klinikai gyakorlatban használatos eszközökkel konzisztens és ekvivalens eszközöket gyártani az additív gyártástechnológia felhasználásával.
- Munkánk hosszú távú célja, hogy megalapozzon egy olyan komplex egészségügyi fejlesztést, melyben szükség esetén az ellátásban részt vevő eszközök digitális 3D modelljei megfelelő internet kapcsolattal felhőalapú szolgáltatásként a világ bármely pontjáról elérhetőek legyenek.

Anyagok és Módszerek

A vizsgált anyagokat a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (International Organization of Standardisation – ISO) szabványai alapján vizsgáltuk be, amelyek meghatározzák a műanyagok és a műanyag kompozitok szakítószilárdságát előre definiált körülmények között. Ezeket kiegészítettük további mérésekkel, mint például a szakítóvizsgálat, kétpontos hajlító-fárasztásos vizsgálat, torziós fárasztó vizsgálat és Shore-D keménységmérés is elvégzésre került a próba-testeken. A próbatestek, melyek a mechanikai vizsgálatok kivitelezéséhez, illetve a felhasználói teszteket megelőző analízisekhez szükségesek, polimer anyagból és/vagy kompozit anyag felhasználásával készültek. Ezen anyagtechnológiai mérések során kapott eredmények szükségesek voltak az általunk jellemezni kívánt eszközök végleges változatának kifejlesztéséhez. A szimulált beteg légútbiztosítását, állapotfelmérését vagy fogának eltávolítását szolgáló vizsgálati eszközeinkkel kapott eredményeket, egységesített értékelő lapon rögzítettük és ezzel párhuzamosan felhasználói elégedettségi felmérést is végeztünk. Munkánk során a következő technológiákat vizsgáltuk: FFF-technológia, CFR-

technológia, SLS-technológia, SLA-technológia. Az anyagtani mérések során az adalékanyag nélküli Herz-filament polilaktidsav (PLA)-nyomtatószálat hasonlítottuk össze a Polymaker Polymide PA-6cf (3Dee Technologies Hungary Kft.) Onyx-szénszál kompozit alapú próbatestekkel. A felhasznált anyag a Markforged X7 által nyomtatott folyamatos szálerősítéses (CFR), mikrokarbonszál aszotriamid, amely folytonos karbonszállal is meg van erősítve (CFR). A nyomtatási beállítások minden esetben az adott modell előállításához megfelelően kerültek kalibrálásra, így az egyes eszközök és próbatestek közötti beállítás eltérő volt a vizsgálat során. A 3D nyomtatóknál a nyomtatási hőmérséklet, rétegvastagság és kitöltési arány a legfontosabb paraméterek az eredményt figyelembe véve. Az anyagtani vizsgálatok után szükséges volt, az eszközeink egy részét lemodellezni és megtervezni. A 3D nyomtatott fogászati fogónk egy jobb felső első zápfog kihúzására alkalmas eszköz 1:1-es méretű másolata, amelyet az Artec Space Spider (Artec 3D) ipari szkennelvel digitalizáltunk. Ehhez elengedhetetlen volt az eszköz teljes szétszerelése és minden felületének fényvisszaverődés-mentessé tétele. Ennek az eljárásnak a lényege, hogy érintés nélkül, speciális kézi 3D szkennel segítségével visszük fel a mintadarab paramétereit a szerkesztő szoftverbe, melyet a kapott képek digitális modellé konvertálása követett. Tervezéskor a geometriai szerkezeten az általunk kívánt tulajdonságok eléréséhez helyenként kisebb módosításokat végeztünk. A szálhúzásos technikát szénszállal erősítettünk meg a terhelhetőség növelése érdekében. A forgáspontot további 3 mm-rel növeltük meg a várható terhelési tényezők miatt, így a pórák zárt állapotban érintkeznek egymással, ezáltal elegendő erőt lehet kifejteni a foghúzás elvégzéséhez. A fonendoszkóp vizsgálatához egy korábbi tanulmányból származó eszközt használtunk és optimalizáltunk. A Glia-modellen a feldolgozást követően minimális módosításokat végeztünk, például a felső részén vékonyítottunk a komfort növelése érdekében, olíva került felhelyezésre, valamint az egyik alkatrészt funkció hiányában eltávolítottuk. A fonendoszkóp lágy részei szilikon csőből épültek fel, membránja pedig közönséges nitril-kaucsukból készült. MAYO tubusok esetén nem volt korábbi digitális 3D modell vagy hozzáférhető szakirodalom. Első lépésként digitalizáltuk az eszközt, melyet Artec Space Spider ipari szkennelvel tettünk meg. Ezután a Rhino – Rhinoceros 3D tervező szoftver segítségével dolgoztuk ki a részleteket és végeztünk apró módosításokat, például a perem vagy a fal megvastagítását. A „slicing” (szeletelés) után a végleges MAYO tubus terveket a PreForm szoftverben alakítottuk ki, majd .stl formátumban mentettük el. A fogorvosi fogó felhasználói tesztelését és értékelését 5, a klinikumban aktívan dolgozó, legalább 2, de legfeljebb 20 éves szakmai tapasztalattal rendelkező fogorvos és szájsebész szakorvos végezte anonimizált, egységesített kérdőív segítségével. A 3D nyomtatott fonendoszkóp és a MAYO tubusok vizsgálatát összesen 26 résztvevő vállalta az etikai

előírásoknak megfelelően, írásos beleegyezés mellett. A jelentkezőket a katasztrófa- és a sürgősségi orvostan területén szerzett ismereteik és tapasztalataik alapján két csoportra osztottuk. Az első csoport tagjai releváns klinikai tapasztalattal rendelkező résztvevők voltak: rezidens orvosok, szakorvosok és mentőtisztek a sürgősségi orvostan vagy aneszteziológia területéről, akik legalább 3 éves klinikai vagy prehospitális tapasztalattal rendelkeztek (cs1=16). A második csoport a Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Karának orvostanhallgatóiból állt (cs2=10), akik rendelkeztek a szimulációs feladat végrehajtásához szükséges elméleti alapismeretekkel, de nem birtokoltak releváns klinikai tapasztalatot a sürgősségi orvoslás területén. Az orvostanhallgatók esetében beválogatási kritérium volt a harmadik évfolyam sikeres teljesítése. A résztvevők anonimizált, standardizált, papír alapú kérdőív segítségével fejthették ki szubjektív véleményüket a vizsgálatban felhasznált eszközökről. A 3D nyomtatott MAYO tubusainkat betegellátást szimuláló szituációs részfeladatok megoldásával tesztelték, ahol a résztvevőknek fel kellett használniuk a szükséges klinikai készségeiket a légúti tréneren (Laerdal Airway Management Trainer - LATM) történő légútbiztosításhoz. A légútbiztosítást akkor tekintettük sikeresnek, ha mindhárom 3D nyomtatott MAYO tubussal és egy kontroll, gyári MAYO tubussal egyaránt helyesen elvégezték a beavatkozást azonos eredménnyel. Mind a négy eszköz behelyezéséhez szükséges időt egyenként mértük. Ahhoz, hogy a végrehajtott készséget sikeresnek minősítsük, 2 sikeres ballon-maszkos (BVM) lélegeztetést kellett végrehajtani a három próbálkozásból, ami azt jelenti, hogy legalább 2 alkalommal minimum 450 ml levegőt kellett bejuttatni a LATM tüdejébe. A 4 db MAYO behelyezéséhez és a három lélegeztetési kísérlethez rendelkezésre álló maximális idő 2 perc volt. Amennyiben a lélegeztetés nem sikerült vagy felfúvódott a LATM gyomra, úgy a feladat megoldását sikertelenként tekintettük az érintett eszközzel. A feladat megoldását a vizsgálatra felkért független technikusok standardizált értékelő lapon értékelték. A fonendoszkóp esetében a résztvevőknek fiziológiás és patológias tüdőhangokat kellett felismerni, melyhez TCCS-S páciensszimulátor (Operative Experience) előre randomizált módon lett beállítva. Ezt követően a résztvevők által ismert diagnosztikai eljárás keretében (tüdő auszkultációja) kellett meghatározni az adott beállításnak megfelelő diagnózist. Kontroll műszerként Littmann Classic II fonendoszkópot alkalmaztunk, mivel ez hazánkban a mentőszolgálat és a kórházak által leggyakrabban használt típusok egyike. A TCCS-S minden esetben vagy fiziológiás légzési hangokat szimulált, vagy a pneumothoraxhoz társuló kórosan gyengébb/hiányos légzési hangokat. A résztvevők mindkét fonendoszkóppal elvégeztek egy-egy auszkultációt, majd az észlelt eredményt minden esetben jelentették egy megfigyelőnek. Az auszkultációs kísérlet akkor minősült sikeresnek, ha a résztvevő a helyes légzési hangokat

jelentette a megfigyelőnek. A rendelkezésre álló időkeretet mindkét eszköz esetében 3 percben maximalizáltuk. Ha az időkorlátot túllépték vagy a résztvevő helytelen auszkultációs eredményt kapott, a kísérletet sikertelennek minősítettük. A vizsgálat során mértük az auszkultáció elvégzéséhez szükséges időt (másodpercben), valamint a diagnosztikai pontosságot (helyes vagy hibás diagnózis) egy standardizált értékelőlap alapján. A statisztikai elemzést és a görbeillesztést az Origin 2018 szoftverrel végeztük (OriginLab Corporation). A MAYO tubusok és a fonendoszkóp statisztikai elemzéséhez az SPSS 26.00 programot használtunk. Az alkalmazott statisztikai tesztek típusai, a normalitásvizsgálat eredményétől függtek, mert minden esetben a Shapiro-Wilk-féle normalitásvizsgálatot és Levene-tesztet használtuk, majd a megfelelő parametrikus (ANOVA) vagy nem parametrikus (Wilcoxon, Mann-Whitney vagy Kruskal-Wallis tesztek) statisztikai teszteket választottunk. A Khi-négyzet tesztet kategorikus változók értékelésére használtunk.

Eredmények

Anyagvizsgálatok:

A PLA és Onyx-szénszál anyagok egészségügyi eszközfejlesztésben való felhasználási lehetőségeinek meghatározásához mindkét anyagból próbatestek készültek, melyeken fárasztásos-hajlítási vizsgálattal határoztuk meg az anyagok ellenállóképességét a kétpontos billenő, hajlító terhelés során fellépő erőkkel szemben. A PLA esetén a kapott fáradási görbe egybevágott a korábbi tanulmányokban már részletesen karakterizált és leírt eredményekkel. A fárasztásos hajlítási teszten a próbatest nem tört el, így a hajlító szilárdság nem került meghatározásra. Meglepő módon, a PLA próbatest, hogy a standard vizsgálati terhelés alatt nem tört el, de hosszú távú fárasztás során (125 000 ciklus) igen.

A szénszállal megerősített Onyx kompozit anyag közel állandó erőértékeket mutatott a 10 mm-es és 30 mm-es lehajlás között, enyhe folyamatos csökkenéssel 20 000 ciklusig mérve. A hajlítás és a mért erőértékek közötti korreláció 10 mm és 40 mm között szinte lineáris volt, azonban 5 000 ciklus után ezen linearitás csak a 10 mm és 30 mm-es lehajlási távolság között volt megfigyelhető. A 10 mm-es hajlításnál az első ciklusnál 15,37 N, az 5 000. ciklusnál 17,06 N, míg a 30 mm-es lehajlásnál az első ciklusnál 34,22 N, 5 000 ciklus után pedig 37,99 N erőérték volt mérhető. Amikor a mérést egy vizsgálati fázison belül a törésig végeztük, a hajlítószilárdságot 51,16 N értékűnek, az lehajlást pedig 50,56 mm-nek mértük.

A fárasztási vizsgálatok elvégzése után megfigyeltük, hogy a 35 mm-es vagy annál nagyobb lehajlású próbatesteknél a hajlítási ponton kis kidudorodás volt tapintható és állandó alakváltozás következett be, azaz hajlított állapotban maradtak.

A torziós fárasztó vizsgálat megmutatja egy adott anyag csavaró, rotáló, vagy görgető mozdulattal, erővel szembeni ellenállását. A PLA próbatestek esetében megfigyelhető volt, hogy 35°-os torzió esetén 800 cikluson belül bekövetkezett a törés, de 30°-os torzió esetén több mint 5 500 ciklust bírt ki állandó alakváltozás nélkül. 25°-os torzió esetén a törés 11 700 ciklusnál következett be.

A szénszálas anyag a torziós fárasztási vizsgálat során a hajlításhoz hasonló trendeket mutatott, a klasszikus értelemben vett fáradási mintázat nem volt kimutatható. A próbatesteknél 200-300 ciklus után a szénszálas próbatest elforgatásához szükséges nyomaték értéke megközelítőleg állandó értékre állt be elhanyagolható csökkenéssel. A vizsgálat 20 000 cikluson keresztül történő elvégzése után a próbatest torziós hajlékonyságát figyeltük meg, amely arányos volt a maximális elforgatási szöggel. A szénszálas próbatestek ellenállása radiális és axiális irányban is változatlan maradt. A próbatesteknél a maradandó torzulások 40°-os elfordulás után kezdődtek. Érdekes módon a Shore D-féle keménységmérések nem mutattak szignifikáns különbséget ($p > 0,05$) a polilaktidsav és a kompozit anyag között.

A hajlító és torziós fárasztási kísérleteket követően az Onyx-szénszál próbatesteken szakítószilárdsági vizsgálatokat végeztünk. A korábbi mérésekkel összhangban szignifikáns különbség volt leolvasható a hajlítóvizsgálati eredményeiből ($p < 0,05$). A szakítószilárdság átlagos értéke a 30 mm-es lehajlás alatt $258,30 \text{ MPa} \pm 10,79 \text{ MPa}$ volt, és a törés a lekerekítésnél V alakban manifesztálódott. A 30 mm-es lehajlás felett az átlagos érték $71,00 \text{ MPa} \pm 19,92 \text{ MPa}$ értéket érte el, a törések egyenes alakúak és helyileg a kiemelkedési pontoknál voltak leginkább megfigyelhetőek. Ezenkívül a torziós fárasztóvizsgálathoz használt próbatesteken elvégeztük a szakítóvizsgálatot is. A szakítószilárdság átlagos értéke $118 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$ volt, a törések jellemzően V alakban alakultak ki a lekerekítési pontnál – hasonlóan a hajlító próbatestekhez. Az értékek közötti különbség nem bizonyult statisztikailag szignifikánsnak.

Felhasználói vizsgálatok:

Az általunk additív technológiával elkészített fogorvosi fogók vizsgálatait olyan fogorvosok végezték, akik legalább 2, legfeljebb 20 éves klinikai tapasztalattal rendelkeztek. Első lépésként a szakemberek hagyományos, klinikai ellátásban használt fémfogóval végezték el az alábbi vizsgálatokat: a biaxiális anyagvizsgálóra 3D nyomtatással készült fog-modellen szimulálták a kihúzás erejét, egyet a hagyományos kihúzási folyamatot utánózva, majd egyet maximális erő kifejtéssel végeztek el, majd ezt követően ugyanezt megismételték a 3D nyomtatott fogóval is, ebben az esetben viszont arra kértük őket, hogy csak a maximális erőt

fejtsék ki, a normál folyamatot ne utánozzák. A mért adatok kontrollként szolgáltak a 3D nyomtatott orvosi eszköz értékeléséhez. Eredményeink alapján sem a normál foghúzás szimulációja esetén ($p=0,15$), sem a nagy erővel végzett foghúzás szimulálásakor ($p=0,10$) nem volt szignifikáns különbség a fogók segítségével kifejtett maximális erők között. Az asztali 3D nyomtatott fogorvosi fogóval maximális erő kifejtés átlagosan $70,30 \text{ N} \pm 4,41 \text{ N}$ volt, míg a normál fogorvosi fogóval $84,8 \text{ N} \pm 16,96 \text{ N}$ volt.

A fenti teszt elvégzése után minden fogorvos kitöltött egy kérdőívet a 3D nyomtatott fogó értékelésére. A kérdőív alapján az öt fogorvosból csak kettő használná az eszközt jelenlegi formájában tényleges fogászati beavatkozáshoz, de néhány kisebb módosítással mindegyikük alkalmazná a betegellátásban.

A különböző MAYO tubusokat az egyszerű légútbiztosításhoz szükséges időintervallum, a légútbiztosítás sikerességének aránya és a felhasználók szubjektív értékelése alapján hasonlítottuk össze. A légútbiztosítás időtartamának vizsgálatakor a klinikai tapasztalat (szakértő vs. hallgató) szignifikáns mértékben nem volt hatással a különböző tubusokkal végzett intubáláshoz szükséges időre, így a szakmai tapasztalattól függetlenül elmondható, hogy a beavatkozáshoz szükséges idő nem mutatott szignifikáns különbséget a különböző MAYO tubus változatok között. ($p=0,798$) A légútbiztosítás sikerességi aránya sem mutatott szignifikáns eltérést a különböző MAYO-változatok között. ($p=0,163$) A légútbiztosítási kísérleteket követő felhasználói tapasztalatok értékelésére Likert-skála alapú kérdőívet használtunk. A szubjektív felhasználói vélemény elemzése kimutatta, hogy a sztereolitográfiával készült Flexible V2 MAYO változat szignifikánsan alacsonyabb pontszámot kapott minden más MAYO változathoz képest. (medián $\pm$ SD, hagyományos MAYO tubus: $4,57 \pm 0,487$ pont vs. TPU A-95: $4,28 \pm 0,52$ pont vs. Flexible V2: $3,6 \pm 0,54$ pont vs. Flexa Black: $4,28 \pm 0,66$ pont; $p<0,001$) A hagyományos MAYO tubust, a TPU A-95 és a Flexa Black MAYO változatokat egyformán jónak értékelték. Az eszközöket szinte minimális módosítással vagy anélkül reprodukáltuk az eredeti változat alapján, ennek ellenére a felhasználók mégis másként értékelték. Az eredeti MAYO tubushoz való formai és szerkezeti hasonlóság döntött, nem pedig a funkció és felhasználhatóság. (átlag $\pm$ SD, hagyományos MAYO tubus: $4,48 \pm 0,82$ pont vs. TPU A-95: $4,28 \pm 0,54$ pont vs. Flexible V2: $4 \pm 0,7$ pont vs. Flexa Black: $4,16 \pm 0,7$ pont; $p=0,104$) A kialakítás szempontjából a hagyományos tubust kapta a legjobb értékelést, a 3D nyomtatott tubusok kialakításra adott pontszámai között nem volt lényeges eltérés. (medián $\pm$ SD, hagyományos MAYO tubus: $5 \pm 0,46$ pont vs. TPU A-95: $4 \pm 0,51$ pont vs. Flexible V2: $4 \pm 0,82$ pont vs. Flexa Black: $4 \pm 0,72$ pont; $p<0,001$) TPU A-95 és a FlexaBlack hasonlóan teljesített ez értékelésen, a FlexibleV2-t ítélték a felhasználók

legrosszabbnak, míg hagyományos, klinikumban elterjedt MAYO tubust a legjobbnak minősítették.

A fonendoszkópokat a résztvevők auszkultációs ideje, diagnosztikai pontossága és szubjektív értékelése alapján hasonlítottuk össze. Eredményeink alapján az auszkultációs időintervallum nem mutatott különbséget a kontroll és a 3D nyomtatott sztetoszkópok között összesítve, csoportosítástól függetlenül. (medián $\pm$ SD, Littman Classic $29 \pm 21,46$ sec vs. 3D nyomtatott fonendoszkóp $27 \pm 14,43$ sec; $p=0,864$) Emellett megállapítható, hogy az individuális tapasztalat nagyban befolyásolhatja az auszkultációs időt az általunk meghatározott csoport besorolási kritériumon felül, mivel a csoportokhoz tartozó SD értékek jellemzően nagyobbak voltak. A szakértők és hallgatók adott fonendoszkóp használata melletti időintervallumait összehasonlítva sem kaptunk szignifikáns különbséget (Littmann Classic szakértők vs. diákok: $p=0,115$, 3D nyomtatott szakértők vs. hallgatók: $p=0,216$), tehát a diagnosztikus hallgatózás időtartama nem különbözött szignifikánsan a vizsgált felhasználói csoportokban. (medián $\pm$ SD, szakértői felhasználói csoport: $25 \pm 10,41$ sec vs. $25 \pm 10,31$ sec; $p=0,460$; orvostanhallgatói felhasználói csoport: $29,5 \pm 29,5$ sec, $32 \pm 18,36$ sec; $p=0,552$) Minden auszkultációs kísérlet vagy helyes vagy helytelen diagnózist eredményezett előre meghatározott kritériumok szerint, így a diagnosztikai pontosság meghatározható volt. Az alacsony elemszám ellenére a diagnosztikus kísérletek esetén nem volt adatvesztés, hiszen a kontrollált körülmények és a résztvevők száma lehetővé tette a kiemelt figyelmet a részfeladat végrehajtásához. Meglepő módon a 3D nyomtatott fonendoszkóp használata kissé javította a diagnosztikai pontosságot, ám ez a különbség azonban nem volt szignifikáns. (a helyes/hibás diagnózisok aránya Littman Classic II 14:11 vs. 3D nyomtatott fonendoszkóp 18:7; $p=0,248$) A Likert-skála alapú kérdőívet többdimenziós szubjektív értékelésként használtuk a felhasználói élmény meghatározására az auszkultációs kísérleteket követően. Ez alapján a 3D nyomtatott fonendoszkóp általános értékelése szignifikánsan alacsonyabb volt a Littmann Classic II-höz képest. (medián $\pm$ SD; Littman Classic II $4,3 \pm 0,62$ pont vs. 3D nyomtatott fonendoszkóp $3,5 \pm 0,59$ pont; $p<0,001$) A 3D nyomtatott fonendoszkóp esetén a vélemények alapján a műanyag rigiditása nem befolyásolta jobban a használhatóságot, mint az eredeti eszköz esetében. A kérdőív kérdéseinek többségében a felhasználók értékelése összhangban állt az összesített eredményekkel.

Diszkusszió

Eredményeink és az irodalmi adatokkal való összevetésük alapján a 3D nyomtatási technológiák várhatóan átalakíthatják a mindennapi életet, beleértve az egészségügyi szektort

is. Számos nemzetközi tanulmány részletesen tárgyalta, hogy az additív gyártás hogyan támogatja a prevenciót, a diagnosztikát, emellett hogyan nyújthat lehetőséget innovatív individuális fogászati vagy sebészeti beavatkozásra. Mindemellett megoldást jelenthet a katasztrófa- és háborús helyzetek során fellépő erőforráshiányra, továbbá az expedíciós orvoslás nyújtotta kihívásokra. A 3D nyomtatók egyre könnyebben elérhetőek, ezért használata mára a mindennapi klinikai ellátásban, illetve sürgősségi- és katonarvoslásban is reális lehet, azonban a területen folyó kutatás-fejlesztés ellenére kézi orvosi eszközök gyártása ezen technológiákkal limitáltan van jelen. Ezen helyzet megváltoztatására és a technológia elterjedésének elősegítésére tettünk lépéseket munkánk során. Vizsgálataink egyediségét és fontosságát támasztja alá, hogy a folyamatos szálerősítéses (CFR) eljárással készült eszközöket korábban sürgősségi- és katonarvosi céllal nem fejlesztettek, mindemellett a felhasználható alapanyagok fáradási tulajdonságait sem vették figyelembe.

Emellett kutatócsoportunk első alkalommal készített gyakorlatban is használható fogorvosi fogót asztali 3D nyomtatóval. Munkánkhoz felhasznált korábbi tanulmányok eredményei felvetették, hogy a szálhúzásos gyártástechnológia (FFF/FDM) alkalmas lehet kézi orvosi eszközök gyártására, de részletes szerkezeti és mechanikai jellemzést mindeddig nem végeztek. A gyakorlatban sokrétűen felhasználható polilaktidsavhoz képest az általunk kialakított és vizsgált Onyx szénszálas kompozit anyag nem rendelkezik klasszikus fáradási tulajdonságokkal, mely előnyt jelenthet a 3D nyomtatás területén. A kapott eredményeinket figyelembe véve azt tapasztaltuk, hogy a folyamatos szálerősítéses technológia szilárdabb és mechanikai erőknek ellenállóbb orvosi eszközöket biztosíthat, mely eredményünk a nemzetközi tapasztalatokkal egybevágó. A polilaktidsav anyag esetében az általunk kapott fáradási görbe megfelelt a korábbi tanulmányoknak, ahol az anyag elemzését részletesen elvégezték, beleértve a különböző rétegvastagságok, nyomtatási sebesség, valamint a kitöltési sűrűség hatásait is a fáradásos törésre. Az említett vizsgálatokban a torziós és hajlítási méréseket is elvégezték. Feltételezésünk, miszerint az Onyx szénszálas megerősítésű eszközök ellenállóbbak a hagyományos polilaktidsavból készült eszközökkel szemben igazolódott: míg a PLA elhajlik és deformálódik, az Onyx-szénszál kompozit esetében a hajlító fárasztási vizsgálatok alapján a 30 mm-es lehajlás tekinthető határértéknek, mivel ezen érték felett jelentős szakítószilárdság-csökkenést mértünk. A torziós fárasztási vizsgálat 40°-os elfordulás után tartós deformációt mutatott, amelyet feltehetően a polimer mátrix és szénszál kohéziójának sérülése okozott. A szénszálak viszont épek maradhattak, mivel a vizsgálatok során 90°-ig a tengelyirányú és radiális ellenállás nem változott. A Shore-D keménység tekintetében az értékek összhangban voltak a korábbi tanulmányokkal. Eredményeink alapján elmondható,

hogy a folyamatos szálerősítési technológia alkalmas nagyobb erő kifejtést végző orvosi eszközök alapanyagaként való felhasználásra, mint például fogorvosi fogó, érfogók, vagy akár sebészeti kampók. Ellenben fontos megjegyeznünk, hogy a polilaktidsav rugalmassága hátrányt jelenthet az olyan eszközök esetében, ahol nagyobb erő kifejtés szükséges, így a polilaktidsav alapú eszközöket önmagukban, megerősítés nélkül, a kapott eredményeink alapján nem tartjuk alkalmasnak egy olyan beavatkozás elvégzésre, mint például a foghúzás. A foghúzás egy összetett és komplex folyamat, amely fogást, csavarást és húzást tartalmaz a fogmeder kitágítása és a periodontális ligamentum rostjainak elszakítása érdekében. Emiatt megfelelő geometriájú fogókra van szükség, amelyek ergonómiai kialakításuknak köszönhetően képesek mérsékelni alkalmazott erőt. A mechanikai és terhelési vizsgálataink eredményei alapján az első-felső molaris fogót inverz mérnöki módszerekkel terveztük meg és egy folyamatos szénszálerősítésű anyagból nyomtattuk ki, melyet a fogorvosok kritikusan értékelték és hasonlítottak össze egy hagyományos fém változattal. Egy egyedi, valódi méretű fogmodell segítségével igazoltuk, hogy a szénszálas fogorvosi fogó elegendő erőt képes kifejteni egy fog klinikai körülmények közötti eltávolításához. Fontos azonban kiemelni, hogy a tényleges sikeresség nagymértékben függhet a fogazat anatómiájától és aktuális egészségi állapotától. Ennek fényében az eredményeink önmagukban limitált értékűnek tűnhetnek, de összhangban voltak a korábbi irodalmi adatokkal, amelyekben valódi pácienseken mértek vertikális foghúzási erőket. Elmondható, hogy 100 N alatti erőket kell alkalmazni foghúzáskor, hogy ne okozzunk csontsérüléseket, mely erőnagyságot irodalmi adatok támasztanak alá. A mi eredményeink az elvárt érték alatt találhatók: a fogó típusától függően átlagosan 70 N - 84 N között volt. A fogorvosok visszajelzései alapján néhány kisebb módosítást követően eszközünk használható lenne valószínű klinikai körülmények között is. Tapasztalataink alapján szükséges lenne a rugalmasság további csökkentése, a fogópofák megerősítése, valamint a belső profil bordázottságának növelése. Ezen módosítási javaslatok a 3D technológia segítségével megvalósíthatók lehetnek, így a potenciális fejlesztési lehetőséget jelenhet az additív gyártástechnológiával előállított orvosi eszközök számára.

Az additív gyártástechnológiával előállított eszközök fő célcsoportjai közé tartoznának a fent említett terület mellett azok a különleges helyszínek, vagy olyan speciális feladatok, ahol a folyamatos gyógyászati eszközellátás nem biztosított - például az orvosi humanitárius missziók a harmadik világban vagy az űr expedíciók. A közelmúltban több tanulmány is kiemelte, hogy a 3D nyomtatás megoldást jelenthet globális válsághelyzetekben, pandémiák idején, egyéni védőfelszerelések létrehozásában. Eredményeink azt mutatják, hogy a folyamatos szálerősítési technológiával nyomtatott orvosi eszközök többször is

felhasználhatók és mechanikai tulajdonságaik jó tartósságot biztosítanak, emellett az így készült eszköz könnyű, könnyen testre szabható és különösebb infrastrukturális igények nélkül gyártható. A munkánk során elvégzett részletes mechanikai jellemzés rávilágított arra a tényre, hogy a jövőben rendkívül fontos lesz a 3D nyomtatott orvosi eszközök esetében olyan kémiai, mechanikai vagy termikus fertőtlenítési eljárások vizsgálata és beállítása, melyek alkalmazásával az eszközök anyagi tulajdonságaiban maradandó károsodást nem okoznak. Emellett szükségszerű lehet költséghatékonysági elemzést is elvégezni, hiszen az eszköz csak akkor jelenthet valódi előnyt, ha költségei nem haladják meg számottevően a gyakorlati használatban levőkéét. A közeljövőben fogorvosi eszközeinket a résztvevő fogorvosok javaslatai alapján kívánjuk továbbfejleszteni, valamint további vizsgálatokat tervezünk a részletesebb karakterizálás és a tartósság növelése érdekében. Távolati céljaink között szerepelnek olyan irányú innovatív fejlesztések, melyek lehetővé teszik ezen megoldások expedíciós orvoslás területén történő felhasználhatóságát. Fontosak számunkra a résztvevői értékelések, visszajelzések is, melyek fejlesztik eszközeink adaptálhatóságát, növelhetik használatuk komfortosságát, kiegészítve a mechanikai tulajdonságok vizsgálata során szerzett tapasztalatokat. A dolgozatban tárgyaltuk, hogy a 3D nyomtatási technológia alkalmas lehet a sürgősségi orvosi ellátáshoz szükséges eszközök gyártására ellátási hiány esetén, illetve, hogy az előállított orvosi eszközök használhatósága a gyakorló orvos tapasztalatától független. A MAYO tubusok és fonendoszkópok esetén a bevezetésig eltelt idő vagy a diagnosztikai pontosság tekintetében nem mutatkozott jelentős különbség. Az elégedettségi felmérés azt mutatta, hogy a résztvevők előnyben részesítik a gyakorlati munkájuk során megismert eszközöket, de nyitottak új eszközök tesztelésére is.

A 3D nyomtatással készített orvosi eszközök terjedésének egyik legnagyobb előnye, hogy az előállításukhoz szükséges infrastruktúra könnyen mobilizálható, ezáltal a gyártás logisztikai szempontból is rugalmasabban megoldható. Az ABCDE-szemléletű betegvizsgálat alkalmazása során a point-of-care diagnosztikai és terápiás eszközök lokalizált, on-demand gyártása (pl. mobil 3D nyomtatással előállított légútbiztosító eszközök expedíciós küldetésekből, vagy katasztrófa sújtotta területeken nyomtatott mechanikus nyomás működtette infúziós pumpák) potenciálisan minimalizálhatják az ellátási lánc logisztikai komplexitását és költségvonzatát. Például, egy távoli bázison működő ellátó csapat ahelyett, hogy előre gyártott oropharyngealis tubusokra várna, közvetlenül a helyszínen tudna steril, méret pontos eszközöket előállítani. Hasonlóképpen, egy földrengés sújtotta területen, ahol a kórházak megsemmisültek, azonnal gyárthatnának infúziós pumpákat, vagy akár ideiglenes kötőanyagokat is. Ez a decentralizált gyártási modell javíthatja az azonnali klinikai

döntéshozatal hatékonyságát a korlátozott erőforrású környezetekbe. Ezen eszközök a 3D nyomtatási technológia segítségével közel azonos minőséggel előállíthatók bizonyos kompromisszumok (pl. fentebb tárgyalt mechanikai és technikai tulajdonságok) árán. A 3D nyomtatott eszközök a gyártástechnológia szempontból a legkorszerűbb eszközök közé tartoznak és a felhasznált alapanyagok közül több is különleges mechanikai, szerkezeti vagy biológiai tulajdonsággal rendelkezik. Másik nagy előny, hogy szükség esetén kompozit anyagok is felhasználhatóak a még magasabb minőség és speciális funkció elérése érdekében. Mérnöki tervezésük lehetővé teszi, hogy sokkal pontosabban vagy egyedileg, akár személyre szabottan is lehessen őket gyártani. A dolgozatban a kiváló minőségű Littmann Classic II-t hasonlítottuk össze egy asztali 3D nyomtatott fonendoszkóppal. A diagnosztikus vizsgálat időtartama mindkét eszköz esetében közel azonos volt. Az eredmények meglepőek voltak a diagnosztikai pontosság tekintetében, mivel nem tapasztaltunk szignifikánsan alacsonyabb értékeket a pontosság tekintetében, sőt a 3D nyomtatott eszköz esetében tendenciózusan jobb diagnosztikai pontosság volt megfigyelhető. A diagnosztikai pontosság javuló tendenciája ellenére az elégedettség mindkét felhasználói csoportban szignifikánsan magasabb volt a hagyományos klinikai eszközök javára, melynek oka lehet 3D nyomtatott eszközök esztétikai különbözősége, illetve, hogy a felhasználók számára sokszor ismeretlennek és kényelmetlennek bizonyultak. Hasonló eredményeket kaptunk a MAYO tubusok esetében is. Nem találtunk azonban szignifikáns különbséget a helyes pozíció vagy a beavatkozás időtartama tekintetében. A behelyezés időtartama és az értékelés független az gyártástechnológia típusától (kivéve a Flexible V2 esetén) és inkább a klinikai tapasztalattól függött. Megfigyelhető volt, hogy a tapasztalt ellátók jobb manuális készségekkel rendelkeznek és magabiztosabbak még akkor is, ha megszokottól eltérő eszközöket használnak. Az eszköz felhasználói értékelése szempontjából a hagyományos eszközt tekintették a legjobbnak, azonban TPU A95 és FlexaBlack egyaránt jó eredményeket értek el. E két változat között nem volt különbség, míg legrosszabbul a Flexible V2 teljesített. A légútbiztosítás végrehajtásában nem volt szignifikáns különbség. A felhasználói visszajelzések alapján, a 3D nyomtatott eszközeink jelenleg nem alkalmasak mindennapi használatra, további finomítások és változtatások mellett a későbbiekben elképzelhető gyakorlati alkalmazásuk. Asztali 3D nyomtatott eszközeink közül a fonendoszkópot több résztvevő is kényelmetlennek értékelte a Littmann Classic II-höz képest, de teljesítményében megegyezőnek találták, így a jövőben szintén elképzelhető klinikai felhasználásuk. Összességében véve kijelenthető, hogy további átfogó vizsgálatok szükségesek a 3D nyomtatott eszközök mindennapi gyakorlatban való rendszeresítéséhez, azonban szükséghelyzetben valós alternatívát nyújthatnak. A vizsgálatok megismétlése több résztvevő

bevonásával jövőbeli terveink részét képezi, illetve további, hasonló eszközök fejlesztését és összehasonlító elemzését is tervezzük kutatócsoportunkkal.

A 3D nyomtatott orvosi eszközök jelentős potenciált rejtenek magukban, mivel hozzáférhetőségük, sokoldalúságuk és az eszközök testreszabhatósága szinte korlátok nélküli lehetőségeket biztosít a betegellátásban. Ezen tulajdonságaik teszik őket képessé gyors adaptációra szinte bármilyen egészségügyi helyzetben. Az asztali 3D nyomtatott fonendoszkóp hatékonysága megegyező a hagyományos eszközökével. A szubjektív felhasználói vélemények alapján a vizsgálatban résztvevő alanyok az eredeti műszereket részesítették előnyben. A különböző 3D nyomtatási technológiákkal (FFF, SLA és SLS) gyártott MAYO tubusok közül egyet leszámítva (SLA) hasonlóan jól teljesítettek a szimulált beavatkozások során. Fontos megjegyezni, hogy előttünk más kutatócsoport nem készített egyszerű légútbiztosításra alkalmas eszközöket additív gyártástechnológiával. Anyagvizsgálat során is megfelelő ellenállást mutattak a betegellátás során esetlegesen fellépő erodáló erőknek. Vizsgálataink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a fonendoszkópok és a MAYO tubusok sikeresen tervezhetők és gyárthatók 3D technológiák felhasználásával. A vizsgálat egyik erőssége, hogy elsők között teszteltük szimulált körülmények között az eszközöket, ahol a cél, már nem az anyagvizsgálat és az ergonómia felmérése volt önmagában, hanem az adaptációs képesség és felhasználhatóság validálása a mindennapi prehospitális és hospitális gyakorlatban. Továbbá, munkánk során demonstráltuk, hogy a kompozit anyagok alkalmasak lehetnek a nagy erő kifejtéssel járó beavatkozások eszközeinek alapanyagaként szolgálni, ahogy a demonstráltuk a fogorvosi fogó esetében. Az eredmények alapján az általunk készített eszközök gyakorlati felhasználhatósága tekintetében nem mutattak eltérést a klinikumban használt típusokhoz képest, azonban ergonómiában és preferenciában elmaradtak, melyek javítására további fejlesztési lépések szükségesek. Ezt támasztja alá, hogy a szubjektív értékelésben alulmaradtak a klinikumban rutinszerűen használt társaikhoz képest, azonban ezen szubjektivitás egy szükségállapot esetén nem mérvadó. Összességében kijelenthetjük az általunk felhasznált technológiai előrelépés nagyban segítheti akár a honvéd és katasztrófa orvostani ellátási láncot, akár pedig az expedíciós orvoslás színtereit.

Vizsgálatunk limitációi közé tartozott a COVID-19 pandémia, mely elsődleges okként áll az alacsony elemszámok mögött. A kísérletek, véleményezések az egyetemi járvány intézkedések figyelembevételével lettek megszervezve, melynek koordinációja jelentős humán, szervezeti és területi erőforrásokat igényelt. A vizsgálatban résztvevők számára garantálnunk kellett a kontamináció lehetőségének minimalizálását, így a bevonható személyek száma és az időbeosztás szervezése komoly kihívást jelentett a vizsgálati időszakban. A szimulált környezet

és a résztvevők viszonylag alacsony száma korlátozta a vizsgálat pontosságát mind a két esetben. A vizsgálat nem értékelte költséghatékonyság szempontjából a 3D nyomtatott eszközöket.

Saját közlemények, konferencia részvételek listája:

Dolgozat alapjául szolgáló közlemények

1. **Ferenc Molnar**, Matyas Rendeki, Szilard Rendeki, Balint Nagy, Viktor Bacher, Peter Bogar, Adam Schlegl, Arnold Koltai, Peter Maroti, Gergely Marovics; Validation of 3D printed MAYO tubes and stethoscope in simulated medical environment – Tools fabricated with additive manufacturing for emergency care. (2023) *Heliyon*, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20866>.
2. Roland Told, Gyula Marada, Szilard Rendeki, Attila Pentek, Balint Nagy, **Ferenc Jozsef Molnar**, Peter Maroti; Manufacturing a First Upper Molar Dental Forceps Using Continuous Fiber Reinforcement (CFR) Additive Manufacturing Technology with Carbon-Reinforced Polyamide. (2021) *Polymers*, <https://doi.org/10.3390/polym13162647>

Dolgozat alapjául nem szolgáló közlemények

1. Miklós Siptár, Krisztina Tóth, Alexandra Csongor, Zsuzsanna Németh, **Ferenc Molnár**, György Tizedes, Zsombor Márton, Sándor Márton; Efficacy of laparoscopic sleeve gastrectomy on morbidly obese patients. (2023) *Orvosi Hetilap*, <https://doi.org/10.1556/650.2023.32918>.
2. Zsuzsanna Németh, Miklós Siptár, Natália Tóth, Krisztina Tóth, Csaba Csontos, Zoltán Kovács-Ábrahám, Alexandra Csongor, **Ferenc Molnár**, Zsombor Márton, Sándor Márton; Indications for Sleeve Gastrectomy—Is It Worth Waiting for Comorbidities to Develop? (2023) *Medicina*, <https://doi.org/10.3390/medicina59122092>
3. Peter Zoltan Bogar, Mark Virag, Matyas Bene, Peter Hardi, Andras Matuz, Adam Tibor Schlegl, Luca Toth, **Ferenc Molnar**, Balint Nagy, Szilard Rendeki, Krisztina Berner-Juhos, Andrea Ferencz, Krisztina Fischer & Peter Maroti; Validation of a novel, low-fidelity virtual reality simulator and an artificial intelligence assessment approach for peg transfer laparoscopic training. (2024) *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67435-6>
4. Szikora István, Magyar Bence, Téglás Sándor, Szudi Gábor, Szalmás Orsolya, Czencz Máté, Kondor Máté, Pozsár Kinga, Nardai Sándor, Erőss Lóránd, Óváry Csaba, Horváth Krisztina, **Molnár Ferenc József**, Pápai György, Jancsó Ádám, Szabó Zoltán, Benes, Edvárd, Chadaide, Zoltán; 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. (2024) *LEGE ARTIS MEDICINAE*, 34 (3). pp. 145-152. <https://doi.org/10.33616/lam.34.0145>

5. Peter Gedei, Szilard Rendeki, Norbert Wiegand, Peter Maroti, **Ferenc Jozsef Molnar**, Balint Nagy, Dora Keresztes, Peter Kiss, Ivett Jonas, Krisztina Szekely, Mark Ughy, Jozsef Farkas; Investigation of the effectiveness of prehospital amputation devices on cadavers (2024) *Injury*, <https://doi.org/10.1016/j.injury.2024.111548>.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a támogatást témavezetőm, Dr. Maróti Péter egyetemi docensnek. Köszönöm a rengeteg szakmai útmutatást, segítséget és a sok időt, türelmet, amit rám szántak a publikációk és jelen dolgozat elkészülése céljából. Szeretném kifejezni hálám az egykori tanszékem – amely mostanra központtá vált - igazgatójának, Dr. Rendeki Szilárdnak, akire nem csak, mint vezetőm tekinthetek, hanem aki kényesen vigyázott a szakmai előmenetelemre. Köszönöm néhai Édesanyámnak, Gungl Évának, aki mindig támogatott, biztatott és hitt bennem. Köszönet illeti Édesapámat, Molnár Józsefet, aki hosszú éveken keresztül kemény munkával alapozta meg a tanulmányaimhoz vezető utat. Köszönet illeti felségemet, Dr. Molnár-Gáspár Renátát, aki az elmúlt években minden nehézségben mellettem állt. E dolgozatot ajánlom életben maradt kisfiamnak Albertnek, aki kitartásból, élni akarásból óriási leckét adott az édesapjának. Köszönöm egyik legjobb barátomnak, Rendeki Mátyásnak a rengeteg segítséget a cikkírásban. Köszönettel tartozom Told Rolandnak, Péntek Attilának, Mánfai Bencének, Márovics Gergelynek, akik segítették szakértelmükkel a munkám. Emellett szeretném megköszönni a támogatását az Országos Mentőszolgálat néhány munkatársának is külön kiemelve Dr. Buda Péter regionális orvosigazgató urat. Szeretném megköszönni közvetlen felettesemnek, Lang Róbert vezetőmentőisztnek. Emellett szeretném megköszönni az Országos Mentőszolgálat Orvosszakmai Osztályának, a most és régebben ott dolgozóknak egyaránt. Szeretném megköszönni Dr. Göbl Gábornak a számtalan gondolatébresztő beszélgetést. Továbbá nem győzöm elégszer megköszönni az Orvosszakmai Osztály jelenlegi vezetőjének, Dr. Constantinovits Miklós osztályvezető úrnak a szakmaiságom színvonalának emeléséhez nyújtott támogatását. Emellett szeretném megköszönni Dr. Pápai György orvosigazgató bajtársnak a támogatását is, továbbá a közeli barátoknak, Bathó Jánosnak és Bathó Anitának. Szeretném köszönetem kifejezni Szűcs Péternek, Dr. Siptár Miklósnak, Dr. Németh Zsuzsannának, Dr. Nógrádi Bernátnak, Dr. Nógrádi-Halmi Dórának a barátságukért. Hálámat szeretném kifejezni az Általános Orvostudományi Kar Orvosi Készségfejlesztő és Innovációs Központ munkatársainak szeretném hálám kifejezni.

A dolgozat elkészítéséhez nagyban hozzájárult TKP2021-NVA-06 pályázat.