

ÉLVONALBAN: GYAKORLATI ÉS ELMÉLETI KÉPESSÉGEK A FOGÁSZATI IMPLANTOLOGIAI KÉPZÉSBEN ÉS A MODERN TECHNOLÓGIÁK KIHÍVÁSAI

ENGELSCHALK MARCUS, DMD

Ph.D. Absztraktfüzet

Pécsi Tudományegyetem
Általános Orvostudományi Kar

2025



Témavezetők

Prof. Dr. Molnár, F. Tamás

Dr habil. Bán, Ágnes

PTE ÁOK – Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola (D94)

A doktori iskola vezetője: Prof. Bogár, Lajos

B-2/2013 Parenchymás szervek heveny és idült sérüléseinek diagnosztikája és kezelése

Program vezető: Prof. Dr. Molnár, F. Tamás 2022 – 2023, Dr. habil. Szántó, Zsolt (2023-)

TARTALOMJEGYZÉK

Rövidítések	3
1. Bevezetés	4
2. Célok	4
3. Háttér	5
4. Módszerek	5
5. Immerzív technológiák a fogászati beavatkozások oktatásában	5
6. A mesterséges intelligencia a fogászati implamantációs képzésben	8
7. A mesterséges intelligencia a fogászatban– etikai megfontolások	9
8. A szükséges “kemény” és “lágy” képességek aránya (hard skills vs. soft skills)	10
9. Eredmények	11
10. Következtetések és megállapítások	12
11. A disszertációval kapcsolatos közlemények listája	13
12. Egyéb közlemények	13

Rövidítésjegyzék

3D	3 dimensional - háromdimenziós
AI	Artificial Intelligence – Művi Intelligencia
AFFECT	Affective emotional and physiological states detection and recognition érzelmi és élettani állapotvizsgálat és felismerés
AR	Augmented Reality - kitágított valóság
CAD	Computer-aided design - számítógép vezérelt tervezés
CAM	Computer-aided manufacturing - számítógépes előállítás
CBCT	Conebeam Computer Tomogram – kúpsugaras számítógépes rétegvizsgálat
CT	Computer Tomography - számítógépes rétegvizsgálat (röntgensugaras)
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine – számítógépes orvosi képalkotás
DL	Deep Learning - mélytanulás
FER	Facial emotion recognition – arcáról való érzékleolvasás
HMD	Head Mounted Device – fejre erősített eszköz
IOS	Intraoral Scan – szájüregi leképezés
ML	Machined Learning – gépi tanulás
MR	Mixed Reality – kevert valóság
MRI	Magnetic Resonance Imaging – mágneses rezonancia alapú képalkotás
NTS	Non-technical Skills – nem technikai képességek (soft skills: “lágy képességek”)
OR	Operating Room - műtő
STL	Standard Template Diary – standard sablonnapló
TS	Technical Skills – technikai képességek
VACID	Video Assisted Clinical Instruction – kepi támogatású klinikai utasítás
VR	Virtual Reality - látszatvalóság

1. Bevezetés

A téziszfüzet az elmúlt négy év PhD kutatási folyamatát és annak eredményeit összegzi. A fogászok, száj és maxillofacialis sebészek számára szükséges “kemény” és “lágy” képességek jelentését, tartalmát, arányait és megszerzésük mikéntjének fejlesztését vizsgálja. Immerzív technológiákat, látszatvalóságot, felfokozott valóságot és kevert valóságot [virtual reality (VR), augmented reality (AR), mixed reality (MR)] vizsgáltam a művi intelligencia [artificial intelligence (AI)] kontextusában, s azt, hogy ezen alapvetően technikai elemeknek milyenek a felhasználói, emberi vonatkozásai [humanistic dimensions] az implantológiában és a szájsebészetben. A kutatás és eredménye, a diszsertáció négy fő kérdés köré épül: (1) az immerzív technológiák helye és szerepe, valamint jövője a fogászatban és a szájsebészetben – a már megvalósult fejlesztések és a beteljesítésre váró ígéretek (2) az AR helye az implantációs képzésben (3) A képződő új orvosgeneráció AI-vel kapcsolatos várakozásai és etikai megfontolásai (4) A “kemény” (technikai) és a “lágy” (humanisztikus; non-technical) készségek, képességek jó arányának kutatása; példák keresése.

A munka koncepciókutatást (conceptual analysis), irodalmi feldolgozást, és gyakorlati, technikai megoldásokat egyaránt magába foglal. Megvalósíthatósági tanulmányként (proof-of-concept) vizsgálta a kevert-valóságú (MR) beavatkozásokat fogbeültetés kapcsán. Többközpontú felmérést végeztünk egyetemi fogáshallgatók között az AI etikai kihívásairól, hogy átfogó képet kapjunk a módszer recepciójáról, a várakozásokról. Vizsgáltuk, hogy az MR képes-e és ha igen, miként támogatni az intraoperatív visualisatiót, tájékozódást, és a távtanítást; hogy az AR/VR miként építhető be célszerűen a preklinikai és a postgradualis képzésbe. A hallgatók együttműködését az AI-val abból a szempontból is vizsgáltuk, hogy mit várnak, illetve milyen biztonsági garanciákat tartanak szükségesnek az átláthatóság, az ellenőrizhetőség és a tisztességes eljárás szempontjából (explainability, privacy, fairness and accountability). Alkalmasak-e a digitális transzformációs módszerek kordában tartására a “lágy képességek” (soft skills): empátia, kommunikáció, csapatmunka és etikai felismerések? (empathy, communication, teamwork, and ethical judgement.)

A technológiai áttekintésen elemzésen túlmenően cél egy olyan integrált képzési rendszer (integrative framework for training) amely összekapcsolja az adatvezérelt pontosságot (data-driven precision) és a humánummal telített klinikai gyakorlatot. A megcélzott új megfigyelések, melyeket klinikai vizsgálatok támogatnak, remélhetően iránymutatóul szolgálnak az olyan aktorok számára, mint az egyetemi oktatók, az ipari-fejlesztési résztvevők és a politikai döntéshozók.

2. Célok

1) A fogászatban alkalmazható immerzív technológiák szerepének és elérhető rövidtávú képességeinek tisztázása hangsúllyal azon, hogy mi építhető be ma, és milyen további teendők vázolhatóak.

- 2) A kiegészített valóság (AR) alkalmazása a fogászati képzésben, megkülönböztetve az újdonság voltától a valós használhatóságot; és azon módszerek megtalálása, melyekkel az a már működő rendszerekbe illeszthető.
- 3) Tisztázni és elemezni a jövő generáció AI fogászati alkalmazásával kapcsolatos várakozásait és aggodalmait, különösen az adatkezelés, a felelősség és a betegjogok szempontjaiból.
- 4) A „kemény és a lágy képességek” (hard and soft skills) ideális arányának keresése az elméleti és gyakorlati képzésben; valamint gyakorlati ajánlások tétele az oktatók és az intézetek számára.

3. Alapvetés – háttér

A fogászat mindig is magas fokú manuális ügyességet és klinikai előrelátást igényelt, de a modern gyakorlati munka egyre inkább olyan digitális rendszereken keresztül valósul meg, amelyek átalakítják a diagnosztika, a tervezés és a sebészi beavatkozások menetét. A nagyfelbontású 3D-képfalkotás (CBCT, CT, MRI), az intraorális szkennelés, a számítógépes tervezés és gyártás (CAD, CAM), valamint az intelligens szoftverrendszerek ma már a kezelés minden szakaszában strukturált adathalmazok bőségét és döntéstámogató eszközöket kínálnak a sebészek számára.

A „belehelyezkedő”; immerszív technológiák — mint a VR (virtuális valóság), AR (kiterjesztett valóság) és MR (kevert valóság) — ezt a fejlődési irányt tovább viszik oly módon, hogy a páciensre szabott modelleket, terveket és iránymutatásokat közvetlenül a sebész látóterébe emelik, illetve lehetővé teszik az interaktív, távoktatás jellegű oktatást is.

Ezzel párhuzamosan a mesterséges intelligencia ígérete a mintafelismerésben és az előrejelzésben rejlik — legyen szó képfalkotásról, diagnosztikáról vagy logisztikáról — miközben súlyos kérdéseket vet fel a felügyelet, a felelősség, az adatvédelem és a klinikai empátia megőrzésének terén.

A dolgozat alapvető tézise, hogy e technológiák teljes értéke csak akkor valósítható meg, ha tartós és fokozott figyelmet fordítunk a kemény és puha készségek kölcsönhatására.

Miközben a digitális adatok és szimulációk élesítik a technikai készségeket, fennáll a veszélye annak, hogy ezzel párhuzamosan csorbulnak a humán kompetenciák — azok a képességek, amelyek a beteg-orvos közti bizalom és a közös/megosztott döntéshozatal alapját képezik.

A kihívás tehát nem az innováció lassítása vagy fetisizálása, hanem annak biztosítása, hogy a technológia milyen módon ágyazódjon be egy etikus, emberközpontú gyakorlatba.

1. Módszertan és a kutatás empirikus alapja

Az MR-alapú klinikai kísérlet a standard implantációs tervezési folyamatot követte intraorális szkennelés és CBCT-felvételek révén. Az adatok összeillesztése (data fusion) STL-modelleket eredményezett, amelyeket MR-megjelenítéshez optimalizáltak.

A műtétek során a sebészek fejre szerelhető kijelzőket (HMD) viseltek, amelyek segítségével a steril környezetben közvetlenül hozzáférhettek a 3D-modellekhez és a fúrási protokollokat tartalmazó PDF-ekhez.

Távmentorálási (telementoring) kísérletként avatárokat is teszteltek, amelyek valós idejű kapcsolatot tettek lehetővé.

A megfigyelési szempontok között szerepelt a megvalósíthatóság, a használhatóság, a közelítés/igazítás pontossága, valamint a tájékozódási és oktatási érték kvalitatív megítélése.

Az MI-etikai kérdőív több területet érintett: az adathasználat elfogadható céljait, az adattárolás preferált helyét (szakmai szervezetek, WHO, EU, nemzeti szint, ENSZ), az adatgyűjtés terjedelmét (korlátozott, nagyléptékű, átfogó), valamint az érintettek szerepét az adathozzáférési döntésekben. A felmérés demográfiai változókat is rögzített (régió, nem, képzési szint), és egzakt statisztikai próbákat alkalmazott a vizsgált paraméterek csoportok közötti különbségeinek értékelésére.

Az eredmények differenciált preferenciákat mutattak: egyes csoportok jobban támogatták a WHO- vagy szakmai szervezetek által kezelt adatbázisokat, szigorúbb korlátozásokat kívántak az ipari felhasználásra, míg a fiatalabb válaszadók bizonyos intézményi környezetekben nyitottabbak voltak az átfogóbb adattárolásra — ugyanakkor következetesen a páciensek szerepét hangsúlyozták az adatkezelésben.

2. Immerzív technológiák a fogászati sebészetben

A fejezet célja a VR, AR és MR technológiák helyének meghatározása a sebészeti oktatásban és a műtéti munkafolyamatokban.

A VR teljesen mesterséges környezetet hoz létre a gyakorlás és az elméleti megértés számára.

Az AR a valós térre vetít digitális objektumokat, ezzel gazdagítva az észlelést és a kommunikációt.

Az MR lehetővé teszi a kétirányú interakciót a valós környezet és a digitális objektumok között, így a sebész valós időben vizsgálhatja, manipulálhatja és megoszthatja a páciensre szabott modelleket a beavatkozás során.

Egy klinikai bizonyítékként szolgáló kísérlet során az MR-t valós műtéti körülmények között tesztelték. A munkafolyamat intraorális szkenneléssel és CBCT-adatgyűjtéssel indult, majd ezekből készült az implantációs terv. A tervezés eredményei — például az állkapocs anatómiai STL-modelljei, az implantátumok tervezett helyzete és a kétdimenziós jelentések — előkészítésre kerültek intraoperatív megjelenítéshez.

A műtétek alatt a sebész és asszisztense fejre szerelhető kijelzőt (HoloLens 2, Microsoft, USA) vagy „see-through” táblagépet (Apple, USA) használt, hogy a steril térben holografikus modelleket, metszeti képeket, fúrási protokollokat és preoperatív terveket érjen el.

A távoli résztvevők avatárként csatlakozhattak a műtéthez, konzultáció vagy oktatás céljából, valós időben látva a sebész nézőpontját.

A tapasztalatok több pozitív hozadékot is feltártak:

- javult a sebész térbeli tájékozódása a folyamatosan elérhető, háromdimenziós vizuális környezetnek köszönhetően,
- lehetővé vált a fontos dokumentumok kéz nélküli elérése (például a fúrási protokollok megtekintése) anélkül, hogy a tekintetet el kellett volna fordítani a páciensről,
- valamint új oktatási lehetőség nyílt, amelyben a hallgatók és a külső szakértők ugyanazokat a holografikus objektumokat valós időben láthatják és közösen elemezhetik azokat a beavatkozás során.



1. **kép:** A műtét során kevert valóság (MR) eszközöket alkalmaztak, a sebész pedig fejre szerelhető kijelzőt (HMD) viselt.



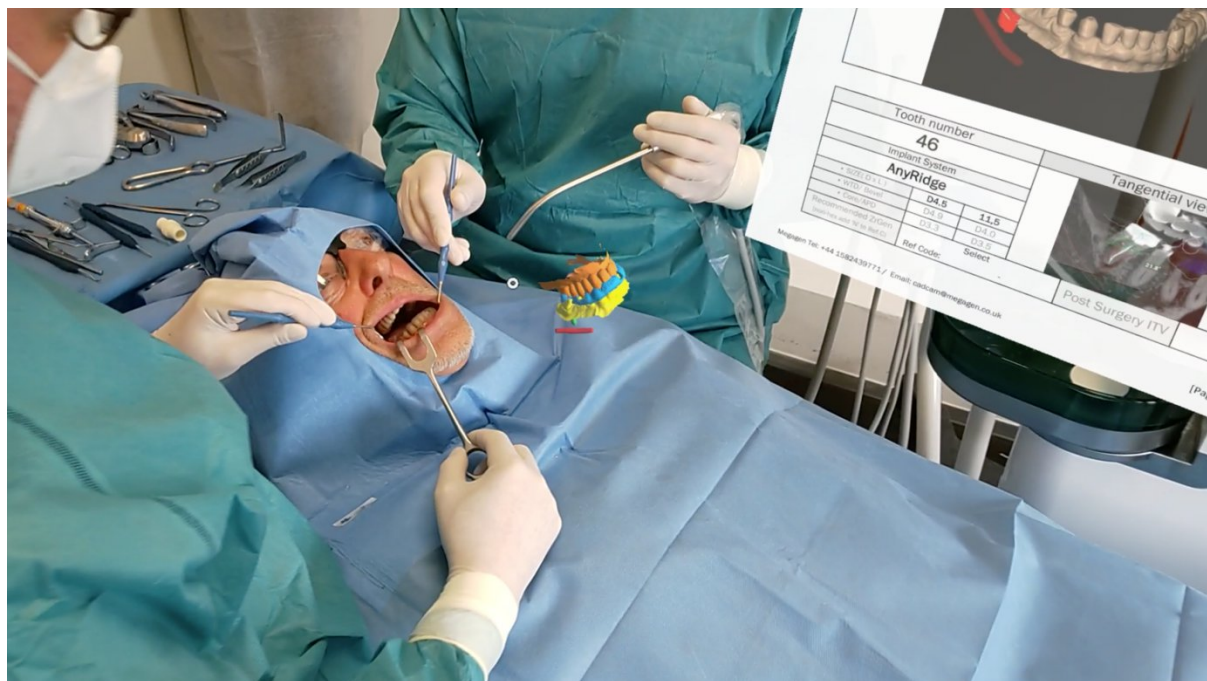
2. kép: “Láss-át rajta” eszköz alkalmazása műtét során.

A kísérlet ugyanakkor rámutatott azokra a technikai korlátokra is, amelyek jelenleg még gátolják a közvetlen, navigációs pontosságú alkalmazásokat: a hologramok mozgó anatómiai struktúrákhoz való, valós léptékű rögzítése továbbra is pontatlan volt; a bonyolult 3D-rétegek valós idejű hozzáadása vagy újrakombinálása gyakran megbontotta a regisztrációt; és a virtuális modellnek az intraorális helyzettel való automatikus igazítása még nem bizonyult kellően megbízhatónak a klinikai használathoz.

A megbeszélés-fejezet hat konkrét alkalmazási területet emel ki, ahol a kevert valóság (MR) már most is kézzelfogható értéket képvisel:

1. A csontstruktúrák és patológiák preoperatív vizualizációja, amely segíti a műtéti tervek kialakítását.
2. Háromdimenziós kommunikáció a terápiás csapaton belül és a páciensekkel.
3. Intraoperatív vizualizáció páciensspecifikus modellek alapján, a tájékozódás támogatására.
4. Távoli konzultáció és telementorálás megosztott hologramok segítségével.
5. Átlátható dokumentáció létrehozása, amely támogatja a minőségbiztosítást és a jogi-szakmai ellenőrzést.
6. Új oktatási modellek kialakítása, amelyek az észlelést interaktív részvétellel kombinálják.

Ebben az értelmezési keretben az MR növeli a sebész helyzetfelismerését és a csapat kollektív kognícióját, miközben az iparág folyamatosan fejleszti a nagyobb pontosságú követési rendszereket és az adatáramlás zökkenőmentes integrációját.



3. **kép:** A fűrészi protokoll PDF formátumban, virtuális prezentációban volt elérhető..

4. Az AR lehetőségei a fogimplantációs képzésben

A második fejezet az oktatási hatásokat vizsgálja.

A pandémia felgyorsította a vegyes (blended) és távoktatási formák elterjedését, és arra kényszerítette a karokat, hogy újragondolják, miként közvetíthető a háromdimenziós anatómiai szemlélet és a műtéti folyamatok rutinszerű kivitelezése hagyományos bonctermi vagy személyes klinikai gyakorlat nélkül.

Ebben a kontextusban az AR/VR-eszközök különösen ígéretesnek bizonyultak, mivel lehetővé teszik a gyakorlást, a manőverek ismétlését és a különböző nézőpontokból való megfigyelését, fejlesztik a térbeli gondolkodást, és integrálhatók számítógépes fantomfejekkel vagy videóalapú klinikai oktatási rendszerekkel (VACID).

A rendelkezésre álló korábbi kutatások és a saját tapasztalatok szintéziseként e technológiák legígéretesebb erősségei az alábbi területeken azonosíthatóak:

- anatómiai ismeretek elsajátítása,
- preoperatív tervezési gyakorlatok,

– műtéti lépéssorozatok előzetes begyakorlása.

A hallgatók gyakran számolnak be a 3D-viszonyok jobb megértéséről, valamint arról, hogy értékesnek tartják a tananyag megállításának, visszajátszásának és több nézőpontból való vizsgálatának lehetőségét.

Ugyanakkor korlátok is ismétlődően megjelennek: a tapintási valóságélesség hiánya, az eszközök időnkénti technikai vagy késleltetési problémái, valamint annak veszélye, hogy a közös fizikai térben zajló szociális tanulás és mentorálás háttérbe szorulhat.

A felmérések szerint a hallgatók többsége úgy véli, hogy az AR/VR-t inkább kiegészítő, semmint helyettesítő eszközként érdemes alkalmazni — ezt az álláspontot a dolgozat eredményei és elemzései is megerősítik.

A gyakorlati megvalósítás szintjén az alábbi javaslatok tehetők a tantervi összeállításra:

– a képzés elején modellalapú gyakorlás bevezetése a manuális készségek fejlesztésére,

– erre építve VR-modulok integrálása a térbeli gondolkodás erősítésére,

– majd AR/MR-eszközök alkalmazása a preoperatív tervek és a megfigyelt vagy szimulált beavatkozások összekapcsolására.

A standardizált értékelési rendszerek és a strukturált visszajelzések (debriefingek) továbbra is kulcsfontosságúak — egyrészt a kompetencia objektív értékelése, másrészt a soft-készségek (kommunikáció, csapatmunka, reflektív gondolkodás) fenntartása érdekében.

A korai adatok azt mutatják, hogy az implantációs tervezés pontosságához szükséges idő csökkenthető, ha a hallgatók integrált VR/AR-környezethez férnek hozzá.

Az eredmények azonban a korai túlzott általánosítással szembeni óvatosságra int mindaddig, amíg nem állnak rendelkezésre szélesebb körű, kontrollált összehasonlító vizsgálatok.



4.kép: A műtét során a külső szereplők avatárként jelentek meg, lehetővé téve a valós idejű vizualizációt és konzultációt.

5. AI a fogászatban. Etikai megfontolások

Az AI alkalmazása a képelemzéstől a kezelési terven át, prioritási kérdésekben (triage) és adminisztratív, dokumentációs tevékenységig és azon túl is elterjedt. Az irodalmi áttekintés során azonban súlyos aránytalanságot lehet észlelni a technikai közlések és a vonatkozó etikai kérdések vizsgálata között. Az 1999-2020 között áttekintett 1500 cikk közül 200-nál kevesebben merült fel egyáltalán az etikai komponens, melyeknek csak töredéke foglalkozott érdemben a kérdéssel. Ezért egy strukturált etikai analízist végeztem, alkalmazva és vizsgálva az ártalmatlanság, a jóra valószínűség / hasznosság, az autonomia, az igazságosság, az önrendelkezés (privacy) az átláthatóság és az elszámoltathatóság / felelősség principiumait.

Ezen sarokkövek és az AI viszonyát egyetemi hallgatók között végzett felmérésben vizsgáltam. A jövőbeli orvosgeneráció attitűdjeire kérdeztünk rá az adatbirtoklás; hozzáférés, a kontroll formája, allocatiója, és a döntéshozatal szintjeinek témájában. A válaszok általában támogatóak voltak a diagnosztikus, terápiás, és tudományos célú adatfeldolgozás tekintetében, amennyiben ezeket kellően kontrollálják. Elleneztek ugyanakkor az ipari vagy marketing célú felhasználást. A preferenciák változnak földrajzi régió, gender, és aszerint, hogy az egyetemi oktatás melyik szintjén tart a hallgató. A szabályozásban jóval nagyobb a

támogatottsága a nemzetközi (pld WHO) vagy EU szintű szakmai testületeknek, mint a nemzeti vagy más ENSZ formációknak. Jelentős számú válaszoló a betegeknek erős vagy éppen kizárólagos jogot adna az adataikat illetően. Nyilvánvaló elvárás az áttekinthetőség és jogi biztonság, különösen ami a klinikai döntéseket illeti.

Az attitűdökön kívül vizsgáltuk a a technikai és vezetés beli kihívásokat is, amit a hatalmas adatmennyiség (big data) jelent az egészségügyi ellátásban. Tárgya volt az elemzésnek a jó minőségű, zajmentes adatkészletek létrehozásának, tárolásának és biztonságos őrzésére kérdése is; a kellő dokumentálhatóság, a modellek nyomkövethetősége, valamint az ellenőrzési mechanizmusok működése intézeti és magasabb szinten egyaránt, amely a “képző-adatok” torzulását hivatott észlleni és elkerülni. Az ‘érthetőség’ nem csupán a modell tulajdonsága kell hogy legyen, hanem interdiszciplináris kötelezettség, ami kiterjed a klinika kommunikációra, a betegbeleegyezésre, a jogbiztonságra és a társadalmi bizalomra.

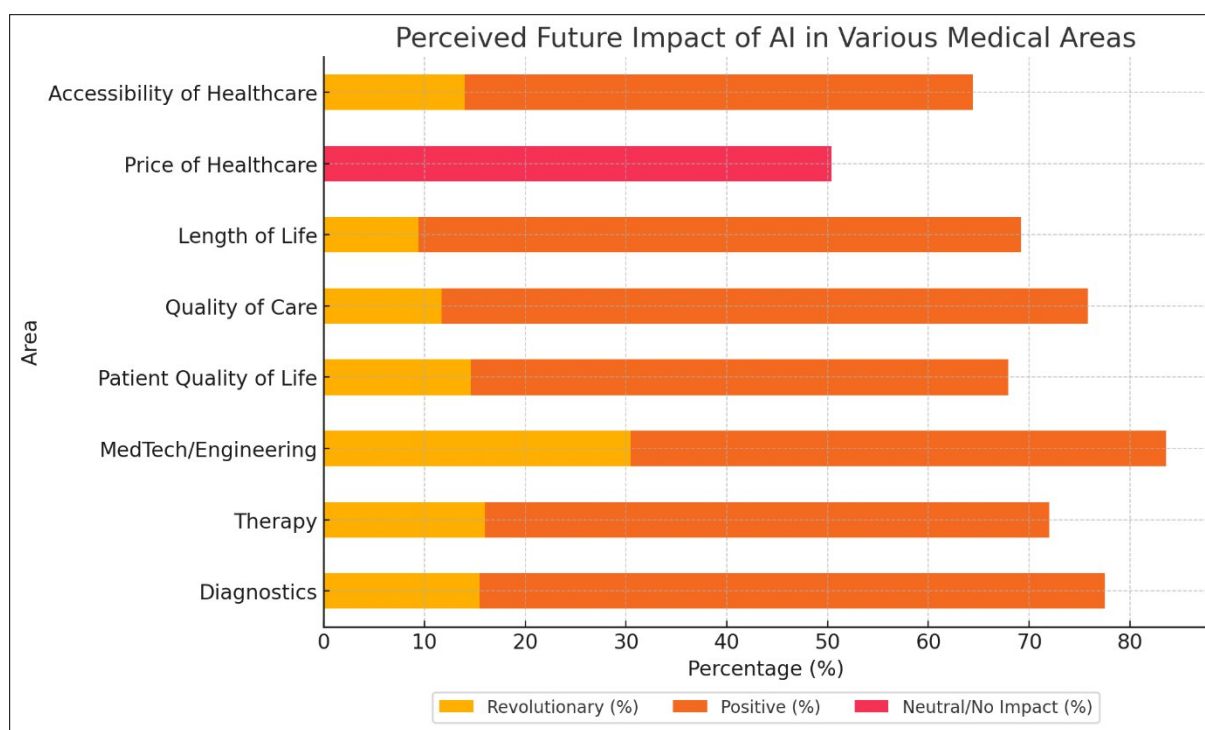


Table 1: Az AI várható hatása a különböző orvosi tevékenységre a jövőd fogorvosok szerint

6. A “kemény” és a “lágy képességek” egyensúlya (hard skills vs soft skills)

A negyedik pillért a duális kompetencia modell alkotja. Az olyan “kemény” képességek, lényegében technikai ismeretek, mint az anatómiai jártasság, a sebészi munkafolyamatok, eszközismeret és kezelés, minőségellenőrzés, nélkülözhetetlen feltételei a biztonságos, hatékony implantológiának. A nem-technikai, a “lágy” képességek, mint empátia, narratív kompetencia, kommunikáció, csapatmunka, és etikus

magatartás ugyanennyire szükségesek a betegközpontú ellátásban. Amellett érvelek, hogy a digitális transformáció éppen hogy növeli a “lágy képességek” fontosságát, mivel a technológia dominanciája azzal a veszéllyel jár, hogy a klinikus eltávolodik a beteg személyes igényeitől, a megélt tapasztalatától.

A professzionalizációs teóriára támaszkodva, az orvosi működés során öt szerkezeti jellemzőt azonosítok: (1) a beteg igényének/várakozásainak felmérése (2) atyáskodás mentes segítség (3) az egész személyiség figyelembevétele (4) a professzionális távolság megtartása (5) az eset megkövetelte tudás gyakorlati alkalmazása. Ennek fényében az AI képes kockázatelemzésre is, segítséget jelent, de nem helyettesítheti a klinikus felelősségét az adatfelhasználásban az adott beteg kontextusában. A történeti aspektusokat is soroló tanulmányom a mesiodensről aláhúzza annak fontosságát hogy a bizonyíték alapon alkotott protokollok aktuális alkalmazását az adott beteg személyiségével, esztétikai kívánságaival, kell harmóniába hozni.

7. Eredmények, következtetések és korlátok

7.1. Eredmények

A négy pillérre alapozott kutatások együttese a következőkre vezettek:

- Az immerzív technológiák az implantológiában és a szájsebészetben már alkalmasak azokra a feladatokra, amit a vizualizáció, a kommunikáció, és az oktatás állít eléjük. A sebészi pozíciót képesek releváns adatokkal valós időben ellátni, s így az együttműködés és az oktatás új formáit jelentik.
- Az AR/VR magas oktatási potenciállal rendelkeznek a fogászati térérzékelésben, tájékozódásban, a gyakorlásban, a képzésbe való beépítésüknek bizonyítható értéke van. Ugyanakkor nem válthatják ki a tactilis ingergazdag, felügyelt “inas-mester” típusú képzési szegmenst.
- A jövő fogászgeneráció óvatos lelkesedéssel tekint az AI-ra; feltételük a biztosítékok megbízható rendszere. Az etikai aspektusok interdiszciplináris megközelítést követelnek, a garanciák forrása csak az együttműködés lehet..
- A “lágy képességek” (non technical skills) képzését erősíteni kell, ezt a digitalizáció nem árnyékolhatja be. Az empátia, a kommunikáció, és a beteggel megosztott döntéshozatal nem “jó lenne, ha így lenne” – elemek, hanem a biztonságos, odafigyelő, a betegnek megfelelő és tisztességes ellátás alapfeltételei.

7.2. Következtetések

Oktatás: Az immerzív eszközök beépítése a curriculumba a konceptuális vizualizáción kezdve a beavatkozások gyakorlásán át az irányított / vezetett klinikai beavatkozásokig ível, Módot nyújt a technikai képességek fejlesztésére, mérésére is, csakúgy mint a kommunikatív kompetenciáéra. Megfelelő környezetet biztosítva az instruktorok olyan VR/AR/MR gyakorlatokat tudnak vezetni, melyek lélektanilag biztonságosak, pedagógiai célukat elérik, és inkluzívek.

Klinikum: Az MR kiváló segédeszköz a preoperatív tervezésben, ismertetésben és az intraoperatív orientációban, prezentációban, ahol jól válogatott esetekben és helyzetekben kritikus információkkal fog szolgálni. Fel kell készülni a megfelelő protokollokkal az adatelőkészítés, alkalmazás, az eszközök sterilizálása, és a csoporton belüli szerepek vonatkozásában. Az MR/AR kivetítők megosztott kognitív artefactumok, amelyeknek feladata a helyzet tudatosítása a figyelem zavarása, túlterhelése nélkül.

Irányítás, szervezés: A kiemelt etikai elvárásokat konkrét intézményi eljárásokban kell megvalósítani. Szükséges az AI támogatta döntések felelősségi körének tisztázása, a modellek működésének folyamatos dokumentálása, betegközpontú beleegyezési protokollok alkalmazása, és erőteljes adatminőség ellenőrzés. Többszereplős ellenőrző fórumokra van szükség, hallgatói részvétellel; az irányelvek megvalósulásának, a normák teljesítésének folyamatos megfigyelésével és javításával. .

7.3. Korlátok és további kutatási irányok

Az MR klinikai vizsgálat (pilot study) nem tartalmazott kimeneteli, összehasonlító elemzést; megvalósíthatósági tanulmány volt, a navigációs fokot nem mérte. Az eredmények hatékonysági megállapításra így nem alkalmasak. A pontosságot a gépi korlátok és mozgási műtermékek korlátozták. A további kutatásokban célszerű lesz a fix pontos regisztációt kiegészíteni dinamikus követéssel, ami anélkül tolerálja a beteg és operator mozgását, hogy ez zavarja a képi minőséget.

A vizsgálatok adott intézményi és regionális keretek, körülmények között zajlottak, így az általános alkalmazhatóság szempontjából ezek megismétlése, és kitérítése szükséges. A további moduloknál az egyes preferenciákat nagyobb mélységben kell kutatni; az AI teljesítményét kritikusan szemlélve a betegeket és a képzésben résztvevőket is be kell vonni az AI alkalmazásáról szóló diskurzusba.

8. Konklúzió, megállapítások

Kutatásaim lényegként arra a megállapításra jutottam, hogy a digitalizált fogászatot az elérhető pontosság mértékén, és a kimeneteli minőségi adatok kiválóságán túlmenően azon lehet és kell megítélni, hogy milyen módon illeszkedik az ellátás humán texturájába. Az immerzív technológiák és az AI hasznosítható az orvos-beteg, azaz a klinikai kapcsolatok erősítésében, de ez további feladatot jelent. Ahhoz, hogy ezt elérjük, az eszközök megfelelő tervezésére, pedagógiára és irányításra van szükség. Az itt bemutatott eredményeket az oktatók, klinikusok és döntéshozók számára segítségül szolgáló anyagnak szánom, a technikailag kitűnő, etikai alapú implantológia jövőjéhez való hozzájárulásként.

A következő új tudományos megfigyeléseket tettem

- 1.) Demonstráltam, hogy az MR integrálható az implantációs sebészetbe, miáltal a sebész és a megfigyelő (oktató) perzisztens, manipulálható 3D közegben van; miközben a steril környezetben megjeleníthetők további szükséges információk is.

- 2.) Validáltam hogy az avatar/indirect részvétel (remote presence) hasznosítható kiterjesztés és alkalmazás a sebészképzésben, illetve a helyszíni konzultációban; utat nyitva a forráskímélő továbbképzésnek és egyidejű tudásmegosztásnak.
- 3.) Az AI-vel kapcsolatos hallgatói attitűdök vizsgálatának eredménye; mely az adatbirtoklásra, célokra és a döntéshozókra vonatkozott, új, lényeges szempontokra világított rá, melyek az intézeti, nemzeti és nemzetközi szabályozásban realizálhatók.
- 4.) A felállított képzési terv a technikai kiválóság mellé helyezi a humanisztikus kompetenciát is, praktikus javaslatot, a mesiodens példáját hozva az empátiára, a beteggel megosztott döntéshozatalra a terjedő digitalizáció idején is.

9. A disszertációval kapcsolatos közlemények listája

Engelschalk M, Al Hamad K, Smeets R, Molnar FT, Bozsonyi K, Bán A. **Ethical and Regulatory Perception of Artificial Intelligence Among Dental Students: A Cross-Sectional Study.** Eur J Dent Educ. 2025 Sep 19. (IF: 1.9)

Engelschalk M, Aknai K, Molnar TF, Bán Á: **Dental asymmetry using the example of the mesiodens and the change in therapeutic approach due to socio-cultural influences.** J Dent Maxillofacial Res. (2024);7(1). (IF: 1.02)

Al Hamad KQ, Said KN, Engelschalk M, Matoug-Elwerfelli M, Gupta N, Eric J, Ali SA, Ali K, Daas H, Abu Alhaija ES. **Taxonomic discordance of immersive realities in dentistry: A systematic scoping review.** J Dent. 2024 Jul. (IF: 4.8)

Engelschalk M, Bán Á, Vinayahalingam Sh, Molnar TF: **Augmented Reality in postgraduate programs for dental implant education.** J Dent. 2024, Vol 147, 105196. (IF: 4.8)

Engelschalk M, Al Hamad KQ, Mangano R, Smeets R, Molnar TF. **Dental implant placement with immersive technologies: A preliminary clinical report of augmented and mixed reality applications.** J Prosthet Dent. 2024 Mar 12. Erratum in: J Prosthet Dent. 2024 Sep;132(3). (IF: 4.3)

Engelschalk M, Bán A, Vinayahalingam S, Smeets R, Molnar TF: **Augmented Reality in postgraduate programs for dental education.** Clinical Oral Implants Research. Vol. 34, Issue S27. Special Issue:30th Annual Scientific Meeting of the European Association for Osseointegration September 28th – 30th 2023. September 2023, 58-60. (IF: 4.8)

Chandran S, Sers L, Picciocchi G, Luongo F, Lerner H, Engelschalk M, Omar S. **Guided implant surgery with R2Gate®: A multicenter retrospective clinical study with 1 year of follow-up.** J Dent. 2022 Dec;127. (IF: 4.8)

10. Egyéb közlemények

Mayinger F, Lankes V, Roos M, Rohr N, Ioannidis A, Elsayed A, Güth JF, Edelhoff D, Passia N, Esmail I, Beuer F, Wolfart S, Spies BC, Schimmel M, Abou-Ayash S, Hahnel S, Schlenz MA, Frankenberger R, Blunck U, Kraus D, Engelschalk M, Huettig F, Kern M, Luehrs AK, Gierthmuehlen PC, Stawarczyk B. **Surface Pretreatment Protocols For Indirect/Semi-Direct Dental Restorations: A Cross-Sectional Survey and Expert Consensus.** J Adhes Dent. 2025 Jun 19;27:123-136. (IF: 3.1)

Hinterwimmer S, Engelschalk M, Sauerland S, Eitel F, Mutschler W. Operative vs. konservative Therapie der vorderen Kreuzbandruptur: eine systematische Literaturübersicht [**Operative or conservative treatment of anterior cruciate ligament rupture: a systematic review of the literature**]. Unfallchirurg. 2003 May;106(5):374-9. (IF: 0.6)

