



Válasz Dr. Hermann Péter Professzor Úr opponensi bírálatára

Szeretném kifejezni őszinte köszönetemet Professzor Úrnak az értekezésemről készített gondos, részletekbe menően átgondolt és magas szakmai színvonalú bírálatáért. Nagy megtiszteltetés számomra, hogy értékelésében elismeréssel szólt a dolgozat főbb megállapításairól, és külön hálás vagyok azokért a kérdésekért, amelyek nemcsak megerősítik a kutatás irányvonalát, hanem új szempontokkal is gazdagítják azt. Professzor Úr visszajelzései fontos megerősítést jelentenek számomra a tudományos értekezés megalapozottságát illetően.

Professzor Úr által feltett kérdésekre az alábbiakban válaszolnék:

1. kérdés: A dolgozatban részletesen vizsgálta a különböző polimerizációs paraméterek (fényintenzitás, expozíciós idő, előmelegítés) hatását a konverziós fokra és monomerkiodódásra. Hogyan látja a jövőbeli fejlődési irányokat ebben a témában? Milyen új technológiai megoldások vagy polimerizációs protokollok lehetnek perspektivikusak a klinikai gyakorlatban, amelyek tovább javíthatják a kompozitok tulajdonságait anélkül, hogy jelentősen bonyolítanák a mindennapi alkalmazást?

Köszönöm Professzor Úr jövőbe mutató kérdését.

A közelmúlt kutatásai és a dolgozatban bemutatott eredmények egyaránt azt támasztják alá, hogy a fényre polimerizálódó kompozit anyagok klinikai viselkedése jelentős mértékben függ a polimerizációs protokoll egyes paramétereitől, mint például a fényintenzitás, az expozíciós idő vagy a hőmérsékleti előkezelés. Vizsgálataink ugyanakkor azt is világosan megmutatták, hogy a kompozitanyagok – különösen az új fejlesztésű bulk-fill rendszerek – rendkívül sokfélék összetételükben, optikai és egyéb fizikai tulajdonságaikban, ami megnehezíti egy általánosan érvényes vagy idealizált megvilágítási protokoll alkalmazását. Ugyanaz a polimerizációs paraméter-kombináció eltérő hatékonyságot mutathat különböző anyagtípusok esetén.

Ez a magas fokú diverzitás egyértelműen arra utal, hogy a jövőbeli fejlődési irányokat olyan technológiai és anyagfejlesztési megoldások határozhatják meg, amelyek képesek alkalmazkodni az adott klinikai helyzethez és anyagtípushoz. A cél olyan rendszerek kidolgozása, amelyek finomhangolják a polimerizációs paramétereket a jobb konverzió, alacsonyabb monomerkiodódás és kedvezőbb mechanikai tulajdonságok eléréséhez – mindezt anélkül, hogy ez többletterhet róna a napi klinikai gyakorlatra.

Ígéretes fejlődési irányt jelenthetnek azok a szenzoros visszacsatolással működő polimerizációs lámpák, amelyek képesek érzékelni a tömőanyag fényáterszítő képességét, rétegvastagságát vagy akár az üreg morfológiáját, és ezek alapján automatikusan optimalizálják a kibocsátott fény intenzitását,

spektrumát és expozíciós idejét. Ilyen eszközök segítségével a fotopolimerizáció hatékonysága egyénileg szabályozhatóvá válik, ezáltal csökkentve a nem megfelelő polimerizációból eredő kockázatokat. Forgalomban is vannak már olyan lámpák, melyek hasonló funkciókra képesek, mint a Bluephase PowerCure az Ivoclar-tól, mely a Polyvision technológia révén valós időben érzékeli, ha a lámpa elmozdul a töltőanyagtól a polimerizáció során [https://www.ivoclar.com/en_nordic/products/equipment/bluephase-powercure]. Hasonló funkciókkal bír a Loop LED lámpa a Garrison cégtől, mely az Adaptive Power Delivery funkcióval folyamatosan méri, hogy mennyi fény jut ténylegesen a kezelés célfelületére, és automatikusan korrigálja a LED kimenetet, ha a fénytöltőanyag távolság, vagy a pozíció változik. Automatikus napi fényvezető ellenőrzése biztosítja a stabilan egyenletes fénykibocsátást. Ha a lámpa túl magas hőmérsékletet ér el, vagy ha bizonyos beállítások túl nagy hőfejlődést okoznának, nem engedi elindítani a magasabb intenzitású módot [https://manuals.plus/garrison/clc01-loop-led-curing-light-system-manual?utm_source=chatgpt.com].

Ezen túlmenően új fotoiniciátor-rendszerek fejlesztése is előtérbe kerül – ilyen például az általunk is vizsgált germánium-alapú molekula –, amelyek a kámforkinonnal ellentétben nem csupán egy, hanem akár két-három szabadgyök képzésére is képesek, ezáltal hatékonyabb polimerizációt eredményezve a jelenleg elérhető fényforrásokkal is. Ezek az iniciátorok alkalmassá tehetik a kompozitokat arra, hogy rövid expozíciós idejű, nagy intenzitású polimerizációs technikákkal kombinálva is biztosítsák a megfelelő fizikai-kémiai és biológiai tulajdonságokat, miközben optimalizálják a kezelési időt [Kowalska et al. *The photoinitiators used in resin based dental composite - A review and future perspectives. Polymers (Basel).* 2021; 13:470.].

Előremutató fejlesztési irányt képviselnek azok az új töltőanyag-technológiák is, amelyek célja a fény hatékonyabb bejuttatása a mélyebb rétegekbe. Ezek közé tartoznak a fotonikus adalékanyagok, amelyek nem pusztán töltőanyagként viselkednek, hanem optofunkcionális szerepet is betöltenek a fény terjedésének szabályozásában. Konkrét példa erre a refrakciós indexre hangolt szférikus üvegtöltőanyagok alkalmazása, ahol a töltőanyag és a gyantamátrix fénytörési indexének összehangolása csökkenti a fény szóródását az anyagban. Ez a technológia már megjelent bizonyos bulk-fill kompozitokban, például a Filtek One Bulk Fill Restorative (3M) esetében, amely a mélyebb polimerizációt segíti elő nagyobb rétegvastagság mellett.

Összességében tehát a jövő elsősorban intelligens polimerizációs lámpák és olyan anyagfejlesztési újításokban rejlik, amelyek a fényenergiát hatékonyabban juttatják el a mélyebb rétegekbe, illetve önmagukban is optimalizálják a térhálósodás minőségét. Ezek az új technológiák – ha sikerül őket gazdaságosan és hosszú távon stabilan alkalmazni – alkalmasak lehetnek arra, hogy a mindennapi klinikai gyakorlat követelményeinek megfelelően javítsák a kompozitok biológiai és mechanikai tulajdonságait.

2. A bulk-fill kompozitok vizsgálata során érdekes eredményeket kapott a 4 mm-es rétegvastagságban alkalmazott anyagok esetében. Vannak-e tervei ezeknek az anyagoknak a hosszabb távú (5-10 éves) klinikai teljesítményének követésére? Milyen paramétereket tart a legfontosabbnak monitorozni egy ilyen hosszú távú vizsgálatban, és milyen metodikai kihívásokat lát egy ilyen kutatás megvalósításában?

Köszönöm Professzor Úr fontos részletekre irányuló kérdését.

A bulk-fill kompozitok 4 mm-es rétegvastagságban történő alkalmazásával kapcsolatban kapott in vitro eredményeink felvetik egy hosszabb távú, klinikai vizsgálat sorozat indításának lehetőségét. A vizsgálat tervezésekor meg kell határozni a pontos célkitűzést: véleményem szerint érdemes lenne általános következtetéseket levonni a hagyományos és a bulk-fill anyagok összehasonlítására vonatkozóan, de akár többféle bulk anyagot is (bevonva egy 3s rapid polimerizációjú kompozitot is) hasznos lenne tesztelni.

A jelenlegi ismeretek alapján a kompozit restaurációk túlélési ideje gyakran meghaladja az 5 évet, ezért egy ilyen kutatásnak legalább 5–10 éves utánkövetést kellene biztosítania ahhoz, hogy a különbségek relevánsan és statisztikailag értékelhető módon megjelenjenek. A vizsgálat típusa kulcsfontosságú: bár a randomizált kontrollált klinikai vizsgálat számít arany standardnak, idő- és erőforrásigénye miatt reális alternatívát jelenthet egy prospektív kohorszvizsgálat. Ha rendelkezésre állna megfelelő dokumentáció, retrospektív módszer is szóba jöhet, megfelelően standardizálva jelentős torzítás nélkül.

A hosszú utánkövetési idő egyik fő kihívása a mintanagyság biztosítása. A kezdeti mintaszámot úgy kell megválasztani, hogy a várható lemorzsolódási arány (pl. elköltözés, elvándorlás az ellátórendszerből, tömések cseréje más indikációból) se torzítsa jelentősen az eredményeket – így csoportonként legalább 100–150 restauráció bevonása lehet indokolt.

A klinikai protokoll standardizálása szintén elengedhetetlen: az anyagokat azonos indikációk (például II. osztályú posterior kavitások) mellett kell alkalmazni, és minimalizálni kell a kezelőorvosok közötti variabilitást. Ideális esetben egy-két operátor dolgozik, vagy egységesített oktatás és részletes protokoll biztosítja a beavatkozások konzisztenciáját – ideértve a izolálást, savazást, adhezív rendszert, polimerizációs paramétereket és polírozási lépéseket is. További fontos lépés a páciensek kategorizálása különböző befolyásoló tényezők szerint (szájhigiéne, parafunkciók, dohányzás, stb).

A restaurációk értékeléséhez olyan validált kritériumrendszerek alkalmazása javasolt, mint az FDI World Dental Federation kritériumai vagy a klasszikus United States Public Health Service skála. A legfontosabb monitorozandó paraméterek: a tömések túlélése (időpont és ok szerinti meghibásodás), marginális záródás, elszíneződés, kopás, felszíni simaság, secunder caries előfordulása, posztoperatív érzékenység és anatómiai forma megtartása. Kiegészítő információként a páciens szubjektív elégedettsége is releváns lehet. A klinikai értékelés szubjektivitásának csökkentésére érdemes legalább két vizsgálót alkalmazni, és interrater megbízhatóságot számítani.

A statisztikai elemzésnél a Kaplan–Meier túlélési analízis alkalmas a restaurációk időbeli vizsgálatára, míg a Cox regresszió lehetőséget ad arra, hogy többféle befolyásoló tényezőt (pl. fogtípus, tömés mérete, operátor) is kontrolláljunk. Bináris kimenetek (siker/kudarcc) elemzésére logisztikus regresszió alkalmazható. Mindezek megvalósításához elengedhetetlen a megfelelő bioinformatikai háttér vagy szakértői konzultáció.

Összességében tehát a bulk-fill kompozitok hosszú távú klinikai teljesítményének vizsgálata nemcsak tudományos szempontból releváns, de a mindennapi gyakorlat szempontjából is kiemelkedő jelentőségű lenne. Egy jól megtervezett, következetesen kivitelezett és megfelelő statisztikai módszerekkel elemzett vizsgálat hosszú távon hozzájárulhat a kezelési protokollok finomításához és a bizonyítékalapú anyagválasztás erősítéséhez a modern fogászatban.

Bár kutatási szempontból nyitott vagyok a különböző kompozitanyagok és technikák vizsgálatára, személyes klinikai gyakorlatomban a hagyományos, rétegezett kompozitok alkalmazását részesítem előnyben. Ezt nemcsak az eltelt évek során szerzett tapasztalataim, hanem a saját in vitro és klinikai vizsgálataim eredményei is megerősítik. A bulk-fill kompozitokkal kapcsolatos eddigi laboratóriumi vizsgálatok gyakran ellentmondásos vagy kevésbé biztató eredményeket mutattak, különösen a mélyebb rétegekben történő megfelelő konverzió tekintetében.

Mindezek fényében, ha mégis bulk-fill anyagot használok, azt nem a gyártók által ajánlott maximális (4–5 mm) rétegvastagságban alkalmazom, hanem legfeljebb 3 mm-es rétegekben, szigorúan kontrollált technikai feltételek mellett. Úgy gondolom, hogy egy hosszú távú klinikai vizsgálatnak nemcsak tudományos, hanem etikai alapja is kell hogy legyen: olyan anyagokat és módszereket vizsgálhatunk hitelesen és felelősségteljesen, amelyek alkalmazását a saját klinikai meggyőződésünk is alátámaszt. A páciensek érdeke és a kezelések hosszú távú sikere elsődleges szempont számomra, így kizárólag olyan vizsgálatban tudok részt venni, amelyet szakmailag és etikailag egyaránt megalapozottnak tartok.

3. A monomerkioldódás vizsgálata során különböző kompozit típusok eltérő viselkedését figyelte meg. Hogyan értékeli a jelenlegi biztonságos expozíciós határértékeket a felszabadult monomerek (BisGMA, UDMA, TEGDMA) esetében? Látja-e annak lehetőségét, hogy a jövőben új, kevésbé toxikus monomer rendszerek kerüljenek kifejlesztésre, és milyen irányba tarthat a kompozitok biokompatibilitásának javítása?

Köszönöm a kérdést, amely fontos és aktuális szempontokat vet fel a kompozit alapanyagok biztonságos alkalmazásával kapcsolatban.

A jelenleg alkalmazott kompozitokból felszabaduló monomerek – különösen a BisGMA, UDMA és TEGDMA – mennyisége ugyan jellemzően a nanogramm–mikrogramm tartományban marad egy-egy tömés esetén, mégis fontos kérdés, hogy milyen határértékek mentén tekinthetők ezek az anyagok

klínikailag biztonságosnak. Jelenleg nem léteznek pontos, fogászatra specifikus expozíciós határértékek. A nagy nemzetközi szabályozó szervezetek, mint az FDA, az ISO vagy az ECHA elsősorban általános orvostechikai eszközökre vagy élelmiszeripari expozícióra állapítanak meg limitértékeket, nem pedig lokálisan alkalmazott, foganként néhány milligramm tömegű restauratív anyagokra. Ráadásul a laboratóriumi toxicitási adatok – például a sejtenyészetekben kimutatott citotoxikus koncentrációk – nem mindig fordíthatók le közvetlenül a klinikai gyakorlatra: egyes monomerek (pl. BisGMA) esetében a sejt kultúrákban toxikusnak számító koncentráció (pl. 10–50 μM) a szájüregben mért értékekhez képest (általában $<0,5 \mu\text{M}$) nagyságrendekkel magasabb.

Az ISO 10993 (Biological Evaluation of Medical Devices) és ISO 7405 (Dentistry – Evaluation of Biocompatibility of Medical Devices Used in Dentistry) szabványok ugyan előírják a fogászati anyagok biológiai értékelését (citotoxicitás, nyálkahártya-reakciók, irritáció- és allergia-potenciál, stb), de nem adnak meg konkrét határértékeket az egyes monomerek expozíciójára. Az ISO 10993, eluátumokra vonatkozó, szabványosított feltételeket biztosító előírás szerint 1 ml sejt kultúra-táptalajban 117,8 mm² mintafelületre van szükség. Az ISO-előírás azonban nem írja elő a minták sűrűségét vagy tömegét, pedig kimutatták, hogy a monomer felszabadulása nemcsak a felületről, hanem a vizsgálati minta tömegétől is függ. A szabvány annyit mond ki, hogy a sejtek életképességének 30%-ot meghaladó csökkenése citotoxikus hatásnak minősül. Vizsgálataink eredményei szerint több kompozit meghaladta ezt az értéket. Ezeknél a vizsgálatoknál 3,5-5 nmol/1 mg kompozit kioldódott BisGMA, TEGDMA volt mérhető 75%-os etanolos oldószer használatakor. Azt is fontos megemlíteni, hogy az egyes monomerek toxikus hatása hatványozódhat más monomerek együttes jelenlétével, ami nehezíti a konkrét határértékek megszabását [Jiang et al. Cytotoxicity and reactive oxygen species production induced by different co-monomer eluted from nanohybrid dental composites. BMC Oral Health 2023; 23:55]. Sőt, még tovább gondolva a klinikai szituációt, a kompozitokból felszabaduló monomerek mennyiségéhez hozzáadódik az adhezívekből kioldódó szabad monomer-tartalom, ami szintén szinergista módon fokozhatja a kompozit toxikus hatását [Schedle et al. Cytotoxic effects of dental composites, adhesive substances, compomers and cements. Dent Mater. 1998;14:429-40].

Tehát a jelenlegi gyakorlat a biokompatibilitási vizsgálatok teljesítésén alapul, nem pedig számszerű határértékeken. Ezért a jövőben elengedhetetlen lenne jobban standardizált mérési protokollok és olyan tesztek bevezetése, amelyek a laboratóriumi adatokkal jobban korrelálnak az in vivo környezetben tapasztalható valós koncentrációkkal.

A kérdés második részével kapcsolatban egyértelműen látszik, hogy az anyagkutatás egyik központi iránya éppen a toxikus, ösztrogénhatású, degradációra hajlamos klasszikus monomerek – elsősorban a BisGMA és TEGDMA – kiváltása. Ennek keretében már ma is léteznek alternatív, kevésbé toxikus monomerek, például a BisEMA, amely nagyobb molekulatömege és kisebb vízdékonysága révén alacsonyabb kioldódást mutat, valamint nem mutat ösztrogénhatást. Az UDMA-alapú vagy módosított uretán-dimetakrilát rendszerek szintén alacsonyabb citotoxicitást és jobb konverziós fokot biztosítanak. A már régóta forgalomban lévő ormocerek (organikus-szervetlen hibridek), melyek Si–

O–Si alapú hálózati szerkezete szabad monomer-mentes, klinikailag ígéretesek voltak, de nem terjedtek el széles körben, valamint kiderült, hogy ezekből az anyagokból is oldódhatnak ki kis molekulatömegű monomer-egységek, rontva a biokompatibilitást [Al-Hijyasat et al. *Cytotoxicity evaluation of dental resin composites and their flowable derivatives*. *Clin Oral Investig*. 2005;9:21-5.]. Tesztelnek hidrolízis rezisztens, antibakteriális hatású monomereket is, de ezek, mint adalékok és nem, mint helyettesítő molekulák jönnek szóba a hagyományos monomerek mellett [Saiprasert et al. *Novel hydrolytic resistant antibacterial monomers for dental resin adhesive*. *J Dent*. 2023;135:104597.].

A szájban formázható, majd fény hatására polimerizálódó kompozitok működésének alapja, hogy a kis molekulatömegű egységek egy térhálós polimer struktúrává kapcsolódnak össze. A polimerizáció azonban ritkán megy végbe teljesen, így a kialakuló hálózat nem tekinthető tökéletesnek, különösen a szájúreg változékonny és agresszív környezetében. Ezért az egyik legnagyobb kihívás olyan kompozit anyag kifejlesztése, amely hosszú távon is stabil, jól polimerizálható, és ellenáll ezeknek a komplex, klinikai igénybevételi feltételeknek. Ez gyakorlatilag lehetetlen.

A biokompatibilitás fejlesztése nemcsak a monomerek szintjén, hanem a teljes kompozit rendszer szintjén zajlik. Fontos szerepe lehet a bioinert vagy bioaktív töltőanyagoknak (pl. bioaktív üveg, amorf kalcium-foszfát, fluoridtartalmú rendszerek), melyek nemcsak semlegesek, hanem akár remineralizáló hatással is bírhatnak. Emellett megjelentek az úgynevezett multifunkciós rendszerek is, amelyek antibakteriális, pH-érzékeny vagy akár önjavító tulajdonságokkal is rendelkeznek.

Végül, a biológiai biztonság növelésének ígéretes irányát jelentik az előre polimerizált, szilárd állapotú CAD/CAM kompozitok, amelyekből a szabad monomerek kioldódása jóval kisebb mértékű lehet. Azonban ezek esetén sem hagyható ki a szájban polimerizált műgyanta kompozit, hiszen adhezív cementekkel ragasztjuk az indirekt restaurációkat, melyekből a ragasztást követő pár napban jóval nagyobb kildódás történik egy jelenleg bírálat alatt álló publikációnk szerint [Jordáki D et al. *Comparative analysis of polymerization efficiency and degradation indicators of adhesive resin cements and preheated restorative composites*. *J Prosthet Dent*, bírálat alatt (D1)].

Összefoglalva tehát: miközben jelenleg nem állnak rendelkezésre fogászatra specifikus expozíciós határértékek, a kutatás aktívan halad afelé, hogy olyan új anyagokat fejlesszenek ki, amelyek toxikológiai szempontból kedvezőbb tulajdonságokkal bírnak. A jövőben a kompozitok biokompatibilitásának javítását a monomerstruktúra átalakítása, a töltőanyag-rendszerek fejlesztése és az intelligens anyagtervezés komplex együttműködése fogja meghatározni.

4. A retrospektív és prospektív klinikai vizsgálatok során impozáns adatmennyiséget dolgozott fel. Milyen tapasztalatokat szerzett a különböző értékelési kritériumrendszerek (pl. módosított USPHS)

használata során? Hogyan lehetne tovább standardizálni a kompozit restaurációk klinikai értékelését, és milyen új objektív mérési módszerek bevezetését tartaná hasznosnak a jövőben?

Köszönöm a gondolatébresztő kérdést, amely fontos szempontokat vet fel a kompozit restaurációk klinikai értékelésének egységesítése és objektívizálása kapcsán.

Klinikai vizsgálatainkban a módosított USPHS (U.S. Public Health Service) értékelőrendszert alkalmaztuk, amely lehetővé teszi olyan, a klinikai siker szempontjából kritikus paraméterek vizsgálatát, mint a széli záródás, elszíneződés, színbeli eltérés, kopás, secunder caries, stb. A kritériumrendszer előnye, hogy egyszerű, kategóriákra bontott és nem túlzottan finom, így jobban elkerülhetők a szubjektív eltérések az értékelők között. Ugyanakkor hátránya, hogy eredetileg hagyományos restaurátumokhoz (például amalgámhoz vagy aranyhoz) készült, így a frontfogak restaurátumait értékelő vizsgálatainknál, ahol fontosabbak az esztétikai jellemzők, érzékenyebb, kisebb eltéréseket is kimutató módosított verziók alkalmazása vált szükségessé.

A szakirodalomban gyakori, hogy különböző mértékben módosított USPHS vagy FDI skálát alkalmaznak, ami jelentősen megnehezíti az egyes vizsgálatok eredményeinek összehasonlítását. Ennek kiküszöbölésére célszerű lenne egy egységesített értékelő űrlap kialakítása – lehetőleg digitális platformon, közös terminológiával és részletes pontozási útmutatóval –, amely lehetővé tenné az adatok közvetlen összehasonlítását és aggregálását. Emellett fontos lenne szabványosítani a sikerességet és túlélést befolyásoló egyéb klinikai és kezelési tényezők dokumentálását is, hogy ezek hatása összevethető legyen a különböző publikációkban.

Az egyik legfontosabb tapasztalat, hogy az objektivitás növeléséhez elengedhetetlen az értékelők személyes képzése és kalibrációja akár digitális referenciaképek és értékelési videók alapján, hogy minden vizsgáló hasonló szinten értékeljen. Fontos, hogy az egyezőség (inter- és intra-examiner agreement) statisztikailag is mérhető legyen, és vizsgálatkezdés előtt elérjen egy minimális elfogadható szintet (>85 % egyezés) [Bayne *et al.* Reprinting the classic article on USPHS evaluation methods for measuring the clinical research performance of restorative materials. *Clin Oral Investig.* 2005;9:209-14.].

További standardizálást jelent, ha lehetőség szerint ugyanaz az operátor készíti az összes restaurációt, valamint ha az esetszámot úgy növeljük, hogy az elegendő statisztikai erőt biztosítson – különösen figyelembe véve a hosszú távú vizsgálatok során várható pácienslemorzsolódást.

Jövőbeli vizsgálatokat tervezve dokumentációs szinten is sokat nyerhetünk standardizált intraorális fotók és intraorális szkennelt felvételek készítésével, melyek biztosítják, hogy az értékelés ne csak a vizsgálók benyomásaira támaszkodjon, hanem objektív referenciák álljanak rendelkezésre az utólagos újraértékeléshez is. Emellett az intraorális szkennerek által készített pár μm pontosságú modellek időbeli összehasonlítása számszerű értékelést tesz lehetővé, mint pl. a marginális rések kvantitatív mérése, vagy a restauráció kopásának térfogati elemzése. A digitális spektrofotométerek használata a színstabilitás ΔE -értékének mérésére lehet alkalmas, míg a fluoreszcencia alapú technológiák (pl. QLF,

DIAGNOcam, OCT) korai caries- vagy marginális szivárgás felismerését teszik lehetővé. Az AI-alapú képanalízis pedig képes lehet automatikusan azonosítani eltéréseket a kiindulási állapot és a kontroll felvételek között, mint pl. elszíneződés, marginális rések vagy anatómiai formai változások.

Összességében tapasztalataink azt mutatják, hogy a klinikai vizsgálatokban a módosított USPHS jó alap, de objektív mérési és dokumentációs módszerekkel – illetve egységesített standardokkal – tudna a klinikai értékelés még robusztusabbá, összehasonlíthatóbbá és hosszú távon reprodukálhatóbbá válni.

5. A dolgozatának eredményei számos új kutatási kérdést vetnek fel. Melyek azok a területek, amelyeket a legígéretesebbnek tart a kompozitok kutatásában a következő években? Hogyan látja a digitális fogászat fejlődésének (CAD/CAM, 3D nyomtatás) hatását a kompozit anyagokra és azok alkalmazására? Milyen interdiszciplináris együttműködések tartana hasznosnak a kutatás további fejlesztéséhez?

Nagyon köszönöm Professzor Úr inspiráló és előremutató kérdését, amely rávilágít a dolgozat eredményeinek további kutatási potenciáljára és a digitális fogászat nyújtotta új lehetőségekre.

A dolgozat eredményei megerősítik, hogy a fényre polimerizálódó kompozitok kutatása továbbra is dinamikus fejlődő, ugyanakkor összetett és multidiszciplináris terület, amely számos új tudományos kérdést vet fel.

A következő évek legígéretesebb kutatási irányainak az anyagszerkezet finomhangolását tartom – különösen a fotoiniciátor-rendszerek, a monomerek kémiai szerkezete, valamint a nanoméretű töltőanyagok fejlesztése tekintetében. Ezek célja nemcsak a mechanikai és esztétikai tulajdonságok javítása, hanem a biokompatibilitás növelése, a monomerkioldódás minimalizálása és a klinikai feldolgozhatóság egyszerűsítése.

Kiemelten fontosnak tartom a polimerizációs folyamat valós idejű, adaptív szabályozásának kutatását. A szenzoros visszacsatoláson alapuló fényforrások és a digitális protokollokhoz illeszthető, automatizált rendszerek lehetővé teszik a kompozit anyagok egyedi tulajdonságaihoz való alkalmazkodást, ezzel növelve a polimerizáció hatékonyságát és csökkentve a technikai hibákból eredő kockázatokat.

A digitális fogászat fejlődése – különösen a CAD/CAM technológia és a 3D nyomtatás – már most is jelentős hatást gyakorol a kompozit anyagok fejlesztésére és alkalmazására. A klinikai gyakorlatban is bizonyítottak a műgyanta tartalmú CAD/CAM blokkok, mint a nanokerámia kompozitok vagy a polimer-infiltrált kerámiák [Crins et al. *Prospective Study on CAD/CAM Nano-Ceramic (Composite) Restorations in the Treatment of Severe Tooth Wear*. *J Adhes Dent*. 2022;24:105-116. Yuen et al. *Clinical behavior and survival of CAD-CAM resin*

nanoceramic and polymer interpenetrating ceramic network material restorations on endodontically treated teeth: A systematic review and meta-analysis. J Prosthet Dent. 2025;133:1437.e1-1437.e9.]. A 3D nyomtatott kompozit anyagok ugyanakkor egyelőre főként in vitro vizsgálatokban szerepelnek sikerrel [Tribst et al. *Comparative Strength Study of Indirect Permanent Restorations: 3D-Printed, Milled, and Conventional Dental Composites. Clin Pract. 2024;14:1940-1952.* Daber et al. *Efficiency of 3D printed composite resin restorations compared with subtractive materials: Evaluation of fatigue behavior, cost, and time of production. J Prosthet Dent. 2024;131:943-950.*], míg a kevés rendelkezésre álló in vivo adat [Hobbi et al. *3D-printed resin composite posterior fixed dental prosthesis: a prospective clinical trial up to 1 year. Front Dent Med. 2024;5:1390600.* Hobbi et al. *Assessing the performance of 3D-printed resin composite posterior fixed dental prostheses: A 3-year prospective clinical trial. J Dent. 2025;160:105887.*] fokozott meghibásodási arányokra utal, különösen többtagú restaurációk esetén. Ez világosan jelzi a további anyagfejlesztés szükségességét.

Kiemelt irány a nagy töltőanyag-tartalmú, gyors és mély polimerizációra képes, bioinert, ugyanakkor esztétikailag is meggyőző 3D nyomtatható gyantakompozitok fejlesztése, amelyek alkalmasak lehetnek rövid idő alatt végleges restaurációk készítésére. Ehhez elengedhetetlen az új pigment- és töltőanyag-optikai technológiák integrálása a természetes megjelenés érdekében. Különösen fontos a polimerizációs zsugorodás kontrollja, a rétegvastagság-független konverzió biztosítása, valamint a digitális workflow-ba való zökkenőmentes illeszkedés.

A kutatás további előmozdításához elengedhetetlenek az interdiszciplináris együttműködések. Kiemelten hasznos lehet az anyagtudományi és polimerkémiai laboratóriumokkal való kooperáció a fotoiniciátorok, monomerek és töltőanyagok optimalizálása céljából, valamint az orvostechikai fejlesztőkkel való együttműködés, különösen az intelligens fényforrások és polimerizációs eszközök prototípusainak kialakításához. A digitális rendszerek fejlesztőivel való kapcsolat lehetővé tenné a kompozitok integrációját a jövő CAD/CAM és 3D nyomtatási protokolljaiba.

A hazai együttműködések tekintetében a Semmelweis Egyetem digitális technológiákhoz kapcsolódó kiemelkedő kutatásai, valamint a Debreceni, Szegedi és Pécsi Tudományegyetemek anyagtani és adhezív rendszerekre fókuszáló vizsgálatai kiváló alapot kínálnak egy széles körű, nemzetközi szinten is versenyképes tudományos hálózat kialakításához.

Összességében a kompozit anyagok kutatásának jövője a klasszikus fogászati anyagtan, a digitális technológiák és az intelligens eszközfejlesztés metszéspontjában fog tovább erősödni. Az ehhez szükséges tudományos előrelépés záloga a hatékony, multidiszciplináris együttműködések kialakítása.



Válaszaim lezárásaként szeretném ismételten megköszönni Professzor Úrnak, hogy eredményeimet új tudományos eredményként elfogadta. Köszönöm az alapos bírálatot és a feltett kérdéseket, melyek érdemben hozzájárultak az értekezés további finomításához és egyes részeinek pontosabb kifejtéséhez.

Bízom benne, hogy válaszaim kielégítőek, és tisztelettel kérem azok elfogadását!

Pécs, 2025.09.20.



Lempel Edina