

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

FOGORVOSTUDOMÁNYI KAR

KLINIKAI ORVOSTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

# **Fejlett digitális technológiák a fogsabályozásban**

Ph.D. értekezés tézisei

Dr. Zsoldos Márton

Kijelölt témavezető:

Dr. Kárpáti Krisztina Ph.D.

Szeged

2025

## A dolgozat témakörébe tartozó közlemények:

- I. Tomášik, J., **Zsoldos, M.**, Majdáková, K., Fleischmann, A., Oravcová, L., Sónak Ballová, D., & Thurzo, A. (2024). The Potential of AI-Powered Face Enhancement Technologies in Face-Driven Orthodontic Treatment Planning. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17).  
<https://doi.org/10.3390/app14177837>  
**Társ elsőszerzők: J. Tomášik, M. Zsoldos**  
IF:2,5; SJR: Q2
- II. Tomášik, J., **Zsoldos, M.**, Oravcová, L., Lifková, M., Pavleová, G., Strunga, M., & Thurzo, A. (2024). AI and Face-Driven Orthodontics: A Scoping Review of Digital Advances in Diagnosis and Treatment Planning. In *AI (Switzerland)* (Vol. 5, Issue 1, pp. 158–176). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).  
<https://doi.org/10.3390/ai5010009>  
IF:3,1; SJR: Q2
- III. Paľovčík M, Tomášik J, **Zsoldos M**, Thurzo A. 3D-Printed Accessories and Auxiliaries in Orthodontic Treatment. *Applied Sciences*. 2025; 15(1):78.  
<https://doi.org/10.3390/app15010078>  
**Társ elsőszerzők: Paľovčík, Tomášik, Zsoldos**  
IF:2,5; SJR: Q2

**Kumulatív impakt faktor: 8,1**

### **Egyéb közlemények:**

Major Á.; Simon G.; **Zsoldos M.**; Nagy A. I.; Hermann P.;  
Merkely B.; Joób-Fancsaly Á.

[New guidelines in infective endocarditis and its dental and  
surgical aspects]

Orv Hetil. 2025 Feb 2;166(5):163-174. Hungarian. doi:  
10.1556/650.2025.33219. PMID: 39893607.

**Zsoldos, M.**; Major, Á.; Kárpáti, K. Gyakorlati posztoperatív  
fájdalomcsillapítás a fogászatban KONZÍLIUM 2023: május pp.  
15-17., 3 p. (2023)

**Zsoldos M.**; Major Á. A láthatatlan diszbiózis MEDICAL  
TRIBUNE (1589-1283): 2023 június pp 1-5 (2023)

**Zsoldos M.**; Varga I. A 2019-nCoV transzmissziós útvonalai és  
ennek kontrollálása a fogászati praxisban  
Magyar Fogorvos: (1216-2213): 29 1 pp 6-9 (2020)

## **Bevezetés**

A digitális technológiák a mindennapok részei manapság. Nemcsak rendkívül széles körben elterjedtek, de egyre inkább nélkülözhetetlenek. Bár a számos fejlesztés széleskörben hatott a fogászat és orvostudomány egészére, néhány kulcs technológia, mint a mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence- AI) és 3 dimenziós (3D) nyomtatás különösen nagy hatással volt a fogszabályozásra.

A mesterséges intelligencia számos területen hozott forradalmi változást, köztük az egészségügyben és a fogszabályozásban is. Bár a koncepció 1955-ből származik, az AI jelentős fejlődést ért el a gépi tanulás, mély tanulás és a neurális hálózatokon keresztül. Ezeknek kulcsa a nagy adatbázisok alkalmazása (Big Data). Az AI integrációja egyre elterjedtebb az orvosi képalkotás, diagnosztika területén, valamint a kezeléstervezésben is, hiszen jelentősen megkönnyítheti a klinikus munkáját és növelheti a hatékonyságot, precizitást. Olyan eszközök váltak elérhetővé, amelyről korábban nem is álmodhattunk: automata teleröntgen elemzés, prediktív modellek készítése pillanatok alatt, csak hogy néhányat említsek.

Emellett a fogszabályozás is fejlődött. Ennek a tudományág fókusza eltolódott a kizárólag okklúzió centrikus szemléletről az archarmónia irányába, ahol a funkció mellett az esztétika is szerepet kap

A szépség az emberiség történetében kiemelt szerepet játszik több tízezer éve, integráns részeként az emberi kultúrának. Az arcesztétika a harmóniára, arányokra és szimmetriára fókuszálva egyre jelentősebb szerepet tölt be a fogszabályozási kezeléstervezésben. Számos szabály és arány próbálja leírni mi számít szépnek, ám a szépség koncepciója továbbra is szubjektív és nehezen definiálható.

A 3D nyomtatás és a kapcsolódó technológiák lehetővé teszik, hogy személyre szabott orthodonciai kiegészítőket tervezzünk és gyártsunk a korábbinál nagyobb precizitással és hatékonysággal. Különbféle 3D nyomtatási technológia áll rendelkezésre, így lehetőségünk van az elkészítendő készülék legyártásához a legjobban illőt kiválasztani. Például a direkt nyomtatott alignerek (directly printed aligners, DPA) számos előnyt biztosítanak a hagyományos eljárásokkal összehasonlítva, csökkentve a környezeti terhelést, javítva a személyre szabhatóságot és a precizitást. Ezen a területen továbbra is számottevő kihívásokkal

szembesülünk, például magas indulási költségek (gépek és szoftverek beszerzése, tanfolyamok), anyagtani korlátok és gyakran komoly idő és energiaráfordítást igénylő betanulási időszak.

### **Célok**

Ennek a Ph.D. disszertációnak a célja a fogszabályozásban kiemelt szerepet játszó modern digitális technológiák vizsgálata. Egy széleskörű irodalmi áttekintést végeztünk, melynek részeként beazonosítottuk a tudományos szempontból legjelentősebb kutatásokat ezen a területen. Ez a kutatómunka egy úgynevezett scoping review formájában történt meg, amellyel lehetővé vált a kortárs szakirodalom szisztematikus, átfogó és minősítésen alapuló elemzése. A módszer lehetővé tette, hogy a tudományos szempontból legjelentősebb technológiákra fókuszáljunk.

További kutatásaink alapját ez az irodalmi áttekintés képezte. Erre építkezve a következő célunk a mesterséges intelligencia és az arcesztétika kapcsolatának mélyebb megértése volt. Célunk ebben a kutatási projektben az volt, hogy megvizsgáljuk mély tanulást alkalmazó algoritmus sikeresen képes-e kezelni a

szépség koncepcióját. Emellett érdekelt, hogy milyen módosításokat hajt végre az algoritmus, melynek következménye, hogy az arc esztétikai javulása. Következésképpen a kutatásunk első célja az volt, hogy megvizsgáljuk a mesterséges intelligencia eredményesen javítja-e az emberi arcok esztétikáját, a feljavított képeket az emberi szem szebbnek találja-e? Ezen felül a kiindulási és módosított képek különbségeit kielemeztük mesterséges intelligenciával.

Az irodalmi áttekintés készítése közben egy másik terület is felkeltette az érdeklődésünket, a 3D nyomtatás. A növekvő jelentőségét felismerve további munkánk során ezt a területet is tovább vizsgáltuk. Áttanulmányoztuk a tudományos publikációkat a témában, elemeztük a tartalmukat és egy átfogó összefoglalót készítettünk. Ennek a publikációnak a célja az volt, hogy ismertesse az innovatív megoldásokat a területen és áttekintést nyújtson a témában.

### **Fő kutatási célok:**

1. Megvizsgálni a kortárs szakirodalom legjelentősebb publikációit a fogszabályozás területén lévő digitális technológiákat illetően, az arcesztétikára fókuszálva.

Tanulmányozni az uralkodó trendeket, különösen a diagnosztika és a kezelés tervezés területén.

2. Megvizsgálni, hogy specializált neurális hálózat képes-e 50 arcképet az emberi szépség ítéletnek megfelelően megváltoztatni, ezen keresztül azt vizsgálva, hogy a mesterséges intelligencia képes-e kezelni a szépség koncepcióját.
3. Megvizsgálni a szakirodalom tükrében a 3D nyomtatás alapú technológiák alkalmazását a modern digitális fogszabályozás területén belül, a kiegészítő eszközökre fókuszálva.

### Alkalmazott anyagok és módszerek

Az AI és arcesztétika fókuszú fogszabályozás tudományos áttekintése

Egy átfogó szakirodalmi áttekintést végeztünk a Scopus tudományos adatbázisban, hogy megtaláljuk a legnagyobb hatású publikációkat. Ehhez az úgynevezett Field-weighted citation indexet (FWCI) használtuk. Kutatásunk fókuszában a 2018 és 2023 között megjelent angol nyelvű publikációk voltak, melyek

témája AI, arcanalízis, Cone-beam computer tomogorapy (CBCT, 3D képalkotásról és kezeléstervezésről volt. A 20 legmagasabb FWCI mérőszámú publikációt elemeztük tovább, hogy megállapítsuk a formálódó trendeket és azonosítsuk azokat az innovatív technológiákat, amelyek az AI alapú diagnosztika és kezeléstervezést érintik a fogsabályozásban.

#### AI alapú arcesztétikai analízis

25 férfi és nő standardizált arcképét vizsgáltuk. Mesterséges intelligenciát alkalmazva megkíséreltük megszépíteni a képeket, a Faceapp algoritmust használva. (ver. 11.10, FaceApp Technology Limited, Cyprus) A válaszadók az eredeti és a feljavított képeket értékelték arcesztétikai szempontból egy online felmérés keretein belül. Arra kértük a kutatásban részt vevő válaszadókat, hogy jelöljék meg a szebb arcképet és értékeljék az arckép szépségét egy 1-10-ig terjedő skálán.

További antropometriai analízist végeztünk 5 arcképpáron, a GIMP szoftvert alkalmazva GIMP (ver. 2.10.36, Free Software Foundation, Inc.) megmértük a kulcsfontosságú arcarányokat az arcképeken a módosításokat megelőzően és azt követően. Emellett mesterséges intelligenciával (ChatGPT-4 (OpenAI, USA)) elemeztük a képeket, hogy meghatározzuk a

legjelentősebb változtatásokat. Vizsgáltuk, hogy orthodinciával ezek a változások mennyire megvalósíthatók.

Irodalmi áttekintés a 3D nyomtatott orthodonciai kiegészítők területén

Tudományos munkánk során a PubMed és a Google Scholar adatbázisokat használtuk, hogy felkutassuk a 3D nyomtatott orthodonciai kiegészítőkkel kapcsolatos publikációkat 2020 és 2024 között. A témából adódóan kiszűrtük az elsődlegesen brekettekre, alignerekre és a nem orthodoncia területére fókuszáló publikációkat. Kiemelendő, hogy a találatok között számos esetbemutató is van, melyek segítenek újszerű alkalmazási módokat is azonosítani és vizsgálni. Vizsgálatunkban kitértünk az adott publikáció módszertani helyességére és a kivitelezés/megvalósítás pontosságára, valamint a klinikai jelentőségére. Figyelembe véve a célt, hogy szakirodalmi áttekintést adhassunk miként befolyásolja az AI és az additív gyártási eljárások a modern orthodonciai kiegészítők tervezését és előállítását.

## **Eredmények**

Az AI és az arcesztétika fókuszú fogszabályozás: digitális innovációk a diagnózisban és a kezeléstervezésben

Összesen 147 publikációt gyűjtöttünk ki a Scopus adatbázisból, amely közül első körben 133 felelt meg a kritériumainknak. A legtöbb publikáció 2022-ben született (n=36). A publikációk a téma interdiszciplináris jellegét tükrözve több területet érintettek: a legprominensebb a fogászat volt (25.5%), általános orvoslás (18.8%) és biokémia/genetika (9.6%). A publikációk főleg eredeti kutatást írtak le (64,7%) és részben szakirodalmi áttekintések voltak (31,6%). A további szűrések után 101 releváns publikációt azonosítottunk, amelyek közül 69 rendelkezett FWCI indexszel.

A 20 legmagasabb FWCI indexszel rendelkező kutatást vizsgáltuk tovább. Ezek között a legdominánsabb terület az AI volt (55%), ezt követte a 3D nyomtatás (15%), arcszkennelés (10%), kiterjesztett valóság (10%) és digitális tervezés/ CBCT integráció (10%). Az eredményeink azt mutatják, hogy a 3 legnagyobb hatású terület az AI, 3D nyomtatás és arcszkennelés volt.

## AI-alapú arcesztétikai elemzés

Az esztétikai értékelő kérdőíveket 441 esetben töltötték ki. Ebből 159 értékelést kaptunk a férfi arcképekre és 282-t a női arcképekre. 50 képből 49 alkalommal a mesterséges intelligencia által feljavított arcképfotót találták esztétikusabbnak a válaszadók, az átlagos értékelés (1-10) 1 ponttal volt jobb. A válaszadók kora és neme nem befolyásolta az eredményeket.

A legjelentősebb módosítások az ajak teltsége, szem mérete és alsó arcmagasság területén voltak. A férfi arcképeket illetően jellemzően nagyobb ajkak, megváltozott szem méret, orr szélesség és ajak forma voltak a módosított képeken. A női arcképeknél jelentősebb módosítások történtek az ajkak, szeme területén és a középarc dimenzióiban. Emellett világosabb arcbőr, simább textúrák és jobban definiált arckontúrok voltak megfigyelhetők a mesterséges intelligencia alapú vizsgálatokban.

AI-t alkalmaztunk a kiindulási és befejező képek közti különbségek elemzésére. Kiemelt változások voltak még a korábbiakon felül a következő területek: haj textúrája, állcsont szélessége, és arcforma, de orthodoncia szempontjából jelentős a mosoly és alsó archarmad területe is.

### 3D nyomtatott orthodonciai kiegészítők

A Pubmed és Google Scholar adatbázisok módszeres átvizsgálása 582 publikációt eredményezett, melyek közül 75 felelt meg a beválogatási kritériumoknak. A publikációk között találtunk eredeti kutatásokat (például klinikai kutatásokat, esetbemutatókat), irodalmi összefoglalókat és technical note-okat is.

A legtöbbször alkalmazott 3D nyomtatási technológia a fogszabályozás területén belül a sztereolitográfia volt (stereolithography SLA),  $n=11$ ) és a digital light processing (DLP,  $n=9$ ), főleg műgyanta alapú anyagokat alkalmazva ( $n=27$ ), kisebb részben fémmel dolgozva ( $n=12$ ).

A legfontosabb előnyei a 3D nyomtatásnak a tudományos kutatások szerint a magas precizitás (60%), jobb páciens biztonság (49%), nagyobb hatékonyság (21%) és csökkentett székidő (23%). Azonban a magas költségek (61%), betanulási nehézségek (45%), és elnyújtott gyártási idő (33%) voltak a legjelentősebb árnyoldalai a technológiának. Emellett potenciális problémaforrásként felmerültek anyagtani korlátok (20%) és a limitált hosszútávú klinikai eredmények.

## **Diszkusszió**

Egyértelmű, hogy a digitális technológiák számos előnyt hozhatnak a fogszabályozásban. A mesterséges intelligencia az orthodoncia számos területét megváltoztathatja. Ezek az algoritmusok különösen tündökölnék egyrészt azokon a területeken, ahol nagy mennyiségű és jó minőségű adat áll rendelkezésre a modellek betanításhoz, másrészt ahol repetitív vagy nagy mennyiségű változón alapuló munkafolyamatok vannak. Ilyen terület az emberi arcok elemzése. A kutatásban vizsgált algoritmus sikerei az ember arcok esztétikai javításában egy olyan technológia alapját képezheti a jövőben, amely lehetőséget nyújt a fogszabályozó szakorvosnak, hogy esztétikai elemzéseket és tervezés egy részéhez hatható automatizált támogatást kapjon.

A radiológia területén szintén jelentős hozadéka lehet az AI alkalmazásának (pl. teleröntgen elemzés, CBCT elemzés). Emellett még az arcszkennelést, mint potenciális ionizáló sugármentes 3D adatforrást emelném ki a digitális technológiák közül.

A gépi tanulás hatékonynak bizonyult a szkeletális osztályozásban, mandibuláris aszimmetria analízisben és légút

analízisben. Az AI segíthet megjósolni a kezelés hosszát, monitorozni a pácienseket és extrakciós/non-extrakciós illetve orthognáth sebészeti döntéshozatalban. A mesterséges intelligencia sikeresen tud javítani a fotókon szereplő arcok esztétikájáán. Az AI sikeresen tükrözi az általános esztétikai preferenciákat.

Az előnyei mellett a mesterséges intelligencia és alkalmazói számos kihívással szembesülnek a megbízható adatokat illetően, az algoritmusok és a döntéshozatal transzparenciájának szempontjából, az elfogultság kérdéskörében és az adatbiztonság és klinikai validitás területén.

Az additív gyártástechnológiák megváltoztatták az orthodonciát, implantológiát, fogpótlástant és a maxillofaciális sebészetet is, azáltal, hogy személyre szabott eszközöket, sebészi sablonokat, alignereket és akár személyre szabott breketteket is előállíthatunk.

A mesterséges intelligenciával 3D technológia egy ígéretes út a tervezés, anyagválasztás és gyártási munkafolyamtok optimalizálására. Későbbi kutatásoknak érdemes lenne a

költségek csökkentésére és a nyomtatott anyagok biztonságosságára fókuszálni.

Bár az AI értékes eszközt kínál egyes változások, sőt akár potenciális kezelési eredmények prediktív vizualizációjára, fontos megemlékeznünk a limitációkról. Egyrészt nem biztos, hogy az AI által elkészített vizualizáció biológiailag megvalósítható. Etikai szempontból fontos kiemelni a potenciális elfogultságot, adatvédelmet és a nem realiztikus szépségstenderdek propagációját.

Az orvosi terület specialitásából adódóan jelenleg, és várhatóan jövőben is, elengedhetetlen a megfelelően képzett specialista orvos felügyelete (és szükség esetén beavatkozása) az AI alapú támogató szoftverek esetén. Ennek kulcsa a transzparens modellek használata és visszakövethető döntési folyamat.

Szakirodalmi áttekintésünk eredményeképp számos alkalmazási területét tártuk fel a 3D nyomtatásnak.

- személyre szabott orthodonciai készülékek, (pl. diszalizálók, power arm, retainerek)
- csonton elhorgonyzott maxilla protrakciós készülékek

- palatinális tágító készülékek és helyfenntartók
- sebészi sablonok mini implantátumok behelyezésére és brekett pozícionálására

A 3D nyomtatás javítja a precíziót, páciens komfortot és a munkafolyamatok hatékonyságát, habár a magas költségek, nehéz betanulás és biokompatibilitási aggodalmak továbbra is korlátozó tényezők. A további kutatásoknak érdemes lehet a tervezés automatizálásával, anyagok biztonságával és hosszútávó klinikai alkalmazásra fókuszálnia.

### Összefoglalás

A mesterséges intelligencia és 3D nyomtatás integrálásása egy paradigmaváltáshoz vezet az orthodonciában, javítva a diagnosztikai precizitást, a kezelési hatékonyságot, és a páciens orientált ellátást. Az AI asszisztencia ígéretesnek mutatkozik a kezeléstervezésben és a kezelési eredmény predikciójában, azonban etikai és technikai kihívások jelentősek, ezért specialista felügyelete, és szükség esetén beavatkozása elengedhetetlen. Az arcesztétika alapú fogszabályozás kiemeli az AI jelentőségét a megjósolt kezelési eredmény vizualizálásában, a páciens

kommunikáció javításában, habár ennek az irreális elvárások korlátozásával kell párosulnia.

A mesterséges intelligencia sikeresen alkalmazható emberi arcok érdemleges esztétikai korrekciós tervezéséhez, amelyeket ezután felhasználhatunk az orthodonciai kezeléstervezésben is.

Hasonlóan forradalmi hatású a 3D nyomtatás, amely megváltoztatta a fogszabályozó készülékek gyártását. A meglévő limitációk legyőzése további kutatásokat és fejlesztéseket kíván. Az AI alapú automatizálás és emelt biokompatibilitás a klinikai alkalmazhatóságot javíthatja.

Habár ezek a technológiák átalakíthatják az orthodonciát, a sikeres integrációjukhoz meg kell találni az egyensúlyt az innováció, etikai szempontok és szabályozás között. További kutatások optimalizálhatják az AI modelleket, továbbfejleszthetik az 3D nyomtatás klinikai alkalmazhatóságát. Szem előtt tartandó, hogy ezen fejlesztések hasznosan támogassák és ne lecserélni próbálják a megfelelő klinikai szakértelmet, ezáltal fejlesztve a személyre szabott, adat alapú orthodonciát.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönetemet szeretném kifejezni számos embernek, lehetetlen lenne itt mindenkit felsorolni, akinek hálás vagyok. Ennek ellenére szeretnék néhány embert kiemelni, akik kiemelt szerepet játszottak. Először is hálás vagyok megbízott témavezetőmnek, Dr. Kárpáti Krisztinának. Nagyra értékelem ezen kívül Prof. Dr. Baráth Zoltán Dékán Úr és Prof. Dr. Kemény Lajos értékes támogatását és bölcs iránymutatásait, és végül, de nem utolsósorban Dr. Tomášik Juraj munkáját. Bár többen voltak, akik támogattak az utamon, kiemelném Dr. Major Ábelt, Dr. Menyhárt Tímeát, Dr. Paľovčík Marcellt és Prof. Dr. Rózsa Noémi Katinkát. A fent említett emberek sokszor nem csak szakmai, de emberi oldalról is támogattak és hálás vagyok mindannyiótoknak ezért.