

Háromdimenziós tervezés és nyomtatás az arthroplastica műszerparkjában

Szilágyi Gábor S. dr. ■ Szabó Tamás oh.
Holnapy Gergely dr. ■ Bejek Zoltán dr.

Semmelweis Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Ortopédiai Klinika, Budapest

Az elmúlt évtizedben más szakterületekhez hasonlóan a háromdimenziós tervezés és nyomtatás megjelent az ízületi arthroplastica eszköztárában is. A CT- vagy MR-vizsgálatokon alapuló tervezőszoftverek a korábbi kétdimenziós képalkotást használó technikáknál pontosabb képet adnak az operálandó ízületéről, így precízebben tervezhetők a műtétek. A röntgenalapú szoftverekkel összevetve a különbség mind a csípő-, mind a térd-, mind a vállízületi arthroplastica területén jelentős. A mesterséges intelligencia integrálásával a tervezőszoftverek precizitása szignifikánsan javult, fejlődésük pedig folyamatos. A gondos tervezés jelentősen csökkenti a műtéti időt, ezáltal pedig számos intraoperatív kockázatot is. A háromdimenziós nyomtatás segítségével előállíthatók műtéti modellek, amelyek segítségével az operátor már a műtét előtt a kezébe veheti az arthroplastica szoruló ízület pontos mását, amelyen próbaműtétet is végezhet. Sterilizálható műanyagból nyomtathatunk a páciensek számára egyedileg tervezett műtéti sablonokat vagy instrumentáriumot, ezáltal a precízen megtervezett műtét pontos kivitelezéséhez is segítséget kaphatunk. Speciális nyomtatóval sterilizálható titánimplantátumok is előállíthatók, amelyek súlyos csonthiányos esetekben is személyre szabott, hosszú távú megoldást jelenthetnek. Bár jelenleg a háromdimenziós nyomtatás időtartama és költsége jelentős, használatával az egyébként inoperábilisnak tartott betegek is jelentős várható implantátum-élettartammal kezelhetők, ezáltal későbbi potenciális revíziós műtéteket kerülhetnek el. Mindezek alapján bizonyos páciensek ellátása során a beteg és az ellátórendszer számára egyaránt ez a technika lehet az optimális terápiás választás. Orv Hetil. 2025; 166(44): 1730–1735.

Kulcsszavak: arthroplastica, háromdimenziós tervezés, háromdimenziós nyomtatás, mesterséges intelligencia

Three-dimensional modeling and printing in the instrumentation of arthroplasty

Over the past decade, three-dimensional design and printing have been used in the field of joint arthroplasty. Planning softwares based on CT or MRI scans provide a more accurate representation of the joints than previously used two-dimensional imaging techniques, allowing more precise surgical planning. Compared to radiography-based software, the difference is significant in the fields of hip, knee, and shoulder arthroplasties as well. With the integration of artificial intelligence, the precision of planning softwares has improved significantly, and their development is still ongoing. Accurate planning substantially reduces surgical time, thereby mitigating numerous intraoperative risks. Using three-dimensional printing, surgical models can be created, allowing the surgeon to examine an exact replica of the joint requiring arthroplasty before the operation. Trial surgeries can also be performed on these models. Sterilizable plastic materials can be used to print custom-designed surgical templates or instruments for patients, aiding a precise execution of the well-planned surgery. With specialized printers, sterilizable titanium implants can also be manufactured, offering personalized, long-term solutions even in cases of severe bone deficiency. Although the duration and cost of three-dimensional printing are currently significant, its use enables the treatment of patients who would otherwise be deemed inoperable. The expected implant survival being relatively high, the patient can potentially avoid future revision surgeries. Based on all these factors, in some cases, this technology may represent the optimal therapeutic choice for both the patient and the healthcare system.

Keywords: arthroplasty, three-dimensional modeling, three-dimensional printing, artificial intelligence

Szilágyi GS, Szabó T, Holnapy G, Bejek Z. [Three-dimensional modeling and printing in the instrumentation of arthroplasty]. Orv Hetil. 2025; 166(44): 1730–1735.

(Beérkezett: 2025. június 27.; elfogadva: 2025. szeptember 4.)

Rövidítések

ABS = akrilnitril-butadién-sztirol; CT = (computed tomography) komputertomográfia; DMLS = (direct metal laser sintering) közvetlen fémlézeres szinterezés; EBM = (electron-beam melting) elektronsugaras olvasztás; FDM = (fused deposition modeling) fúziós depozíciós modellezés; MR = mágneses rezonancia; PEEK = (polyether ether ketone) poli(éter-éter-keton); PLA = (polylactic acid) politejsav; SLA = sztereolitográfia

Az utóbbi években a röntgenalapú műtéti tervezők mellett megjelentek a CT-alapú szoftverek, amelyek alaposabb, pontosabb modellezésre alkalmasak, ezáltal jelentős segítséget nyújthatnak az optimális műtéti terv elkészítéséhez. Napjainkra a technológia fejlődése lehetővé tette, hogy a háromdimenziós nyomtatás (más szakterületekhez hasonlóan [1, 2]) a mozgásszervi sebészet eszköztárában is megjelenhessen, így a páciensek részére akár személyre szabott instrumentáriumot vagy egyedi implantátumokat is gyárthatunk.

Háromdimenziós tervezés

A műtéti tervezés jelentősége

Az arthroplastikai műtétek tervezésének 'gold' standardját jelenleg a kétdimenziós, röntgenalapú szoftverek jelentik, amelyek segítségével már a műtét előtt meghatározható a felhasználandó implantátumok optimális mérete és helyzete. A tervezés nélkül végzett műtétek sikerességi rátája alacsonyabb, mint azoké az operációké, amelyeknél ez előzetesen megtörtént [3]. Prospektív vizsgálatok megmutatták azt is, hogy a megtervezett műtéteken átesett páciensek korábban emittálhatók, így a tervezés a páciens mellett az ellátórendszer javát is szolgálja [3].

A precíz tervezés lerövidíti a műtéti időt, ezáltal csökkenti a vérvesztést, valamint minimalizálja az intraoperatív infekciók kialakulásának valószínűségét. A tervezés során meghatározott ideális helyzetben beültetett implantátumok várható élettartama hosszabb [4], ezáltal a páciens későbbi potenciális revíziós műtétektől óvhatjuk meg, ami szintén a beteg és az ellátórendszer együttes érdeke. A műtéti tervezés során a végtaghosszkülönbség korrekciója is elvégezhető, így szintén javítható a páciens posztoperatív életminősége [5]. A mindennapos klinikai gyakorlatban szintén előny, ha előre ismert a beültetendő implantátumok típusa és mérete, hiszen így a műtét előtt ellenőrizhető azok rendelkezésre állása, szükség esetén pedig beszerzésük is megtörténhet. A kevesebb feleslegesen felhasznált steril műszertálca szintén az ellátó anyagi érdekét szolgálja [6].

A háromdimenziós tervezés előnyei

Bár a kétdimenziós tervezőszoftverek használata széles körben elterjedt, működésük korántsem pontos: a páciensek obesitása [7] vagy akár a méretezéshez szükséges

1. táblázat

Primer térdprotézisműtétek tervezésének pontossága két-, illetve háromdimenziós tervezőszoftverek használata esetén [10–13]. Az idézett kutatások azokat a tervezéseket tekintették pontosnak, amelyek a beültetett implantátummal teljesen megegyező méretű komponenszt határoztak meg. A háromdimenziós tervezőszoftverek egy kutatás kivételével minden esetben szignifikánsan pontosabbnak bizonyultak, ugyanakkor az eredmények között jelentős szórás figyelhetünk meg

A 2D tervező pontossága (femorális)	A 3D tervező pontossága (femorális)	A 2D tervező pontossága (tibialis)	A 3D tervező pontossága (tibialis)	Eset-szám	Forrás
52,9%	96,6%	28,7%	93,1%	31	[10]
43,6–59,5%	100%	52,1–68%	100%	94	[11]
Nem vizsgálták	100%	Nem vizsgálták	96%	107	[12]
Nem vizsgálták	100%	Nem vizsgálták	96,7%	30	[13]

2D = kétdimenziós; 3D = háromdimenziós

2. táblázat

Primer csípőprotézis-műtétek tervezésének pontossága két-, illetve háromdimenziós tervezőszoftverek használata esetén [14–20]. Az idézett kutatások azokat a tervezéseket tekintették pontosnak, amelyek a beültetett implantátummal teljesen megegyező méretű komponenszt határoztak meg. A háromdimenziós tervezőszoftverek egy kutatás kivételével minden esetben szignifikánsan pontosabbnak bizonyultak, ugyanakkor az eredmények között jelentős szórás figyelhetünk meg

A 2D tervező pontossága (vápa)	A 3D tervező pontossága (vápa)	A 2D tervező pontossága (szár)	A 3D tervező pontossága (szár)	Esetszám	Forrás
69%	88%	56%	96%	100	[14]
40,7%	71,2%	49,2%	76,3%	59	[15]
43%	96%	43%	100%	30	[16]
44,8%	56,9%	45,7%	58,6%	116	[17]
41,7%	75%	31,7%	43,4%	60	[18]
60,7%	43,5%	35,7%	43,8%	23 (2D), 28 (3D)	[19]
39%	99,7%	52,9%	63,1%	290	[20]

2D = kétdimenziós; 3D = háromdimenziós

kalibrációs eszköz pontatlan elhelyezése jelentősen torzíthat a műtéti terven. A háromdimenziós szoftverek ezzel szemben CT- vagy MR-felvételek alapján képesek térben rekonstruálni a vizsgált ízületet, ezáltal arról (a kétdimenziós szoftverekkel összevetve) pontosabb képet kaphatunk. Metaanalízisek [8, 9] megmutatták, hogy a beültetett implantátumok méretét nagyobb arányban képesek pontosan meghatározni a háromdimenziós technikán alapuló szoftverek: a primer térd-ízületi műtéteket vizsgáló cikkeket az 1. táblázatban [10–13], a primer csípőprotézis-műtétekkel foglalkozó tanulmányokat pedig a 2. táblázatban gyűjtöttük össze [14–20]. Emellett a beültetendő implantátumok pozicionálása is pontosabb háromdimenziós tervezéssel, ami a

csípő-, térd- és vállprotézisműtéteknél egyaránt kulcsfontosságú.

A primer műtétek mellett a revíziók során is sokszor elengedhetetlen a háromdimenziós tervezés. Csípőízületi revíziós műtéteknél például az acetabularis csontiány pontos megítéléséhez szükséges a térbeli virtuális modellezés [21]. A háromdimenziós tervező ugyanakkor revíziós műtétek előtt az implantátumok méretének meghatározásában (ahogy azt a primer műtétek vizsgálata során is tapasztaltuk) pontosabb, mint a röntgenalapú szoftverek [22].

A háromdimenziós tervezés hátrányai

A háromdimenziós tervezés természetesen hátrányokkal is jár. A CT-vizsgálatok jelentős sugárterhelést jelentenek a páciensnek [23], az MR-vizsgálatok pedig relatíve magas árú és korlátozott elérhetőségük miatt a napi gyakorlatban nem végezhetők el tisztán tervezési indikációval. A képalkotó vizsgálatok elvégzésének idejét is szigorú szabályok határozzák meg: amennyiben túl sok idő telik el a CT és a műtét között, az intraoperatív kép már nem teljesen felel meg a műtési tervben meghatározottnak. A gyakorlatban ez azonban minimális eltérést okoz, a felhasznált implantátumok általában legfeljebb egy mérettel térnek el a tervezettől.

Az idézett metaanalízisek is megmutatták, hogy a háromdimenziós tervezés használata során jelentős szórás figyelhető meg a pontosság tekintetében [8, 9]. Ennek magyarázata főként az emberi tényező, hiszen minden esetben a szoftvert használó orvos határozza meg a műtési tervet. Az utóbbi időben megjelentek ugyanakkor mesterséges intelligenciát használó szoftverek, amelyek képesek lehetnek a háromdimenziós tervezés precizitásának további növelésére [24]. Minden egyes manuálisan megtervezett műtettel a mesterséges intelligencia is fejlődik, így a későbbiekben az ilyen algoritmusokon alapuló technikák alkalmazhatósága biztosan fejlődni fog.

Revíziós műtétek tervezése során CT-, illetve MR-felvételek esetén is gondot okozhatnak a beültetett implantátumok miatt keletkezett műtermékek, amelyek mind a manuális, mind a mesterséges intelligencián alapuló tervezést nehezítik. A műtermékek kiszűrésére fejlesztett radiológiai technikák ugrásszerű fejlődése [25] alapján a későbbiekben valószínűleg ez a limitáció is csökkenni fog.

Háromdimenziós tervezés a robotika eszköztárában

Az elmúlt évtizedben megjelent sebészeti robotok lehetőséget biztosítanak a csípő- és térdarthroplastikai műtétek optimális tervezésére és precíz kivitelezésére [26, 27], a jövőben pedig minden bizonnyal a vállsebészet eszköztárába is bekerülnek [28]. Ezek az eszközök általában szintén háromdimenziós tervezést használnak, ugyanakkor a műtési tervezés nem a preoperatív időszak-

ban, hanem a műtét részeként valósul meg, ezáltal nem kell attól tartani, hogy a tervezéshez használt virtuális modelltől már jelentősen eltér a páciens anatómiája. Az operáció elején a sebész segít a robotnak feltérképezni az operálandó ízületet, ez a folyamat azonban manuális „letapogatás” útján történik, így a beteget nem éri sugárterhelés [29]. Bár a mesterséges intelligencia alkalmazásával (mely minden elvégzett műtettel fejlődik) a robot szoftvere automatikusan javaslatot tesz az optimális műtési megoldásra, a sebésznek természetesen lehetősége van azon manuálisan változtatni. A robot képes modellezni a megtervezett műtétet, predikciót alkotva számtalan kimeneti értékre, mint például lágyrész-egyensúly, stabilitás, mozgástartomány vagy éppen végtaghosszkülönbség [27, 30]. Bár az intraoperatív tervezés folyamata időigényes, a tényleges műtét kivitelezését a robot oly mértékben gyorsítja, hogy a nettó műtési idő tekintetében a robotasszisztált műtétek nem jelentősen hosszabbak, mint a manuális műtétek [31]. Ezáltal az intraoperatív idő megnövekedéséből adódó szövődmények előfordulása nem jelentős. Hosszú távon, a tanulási folyamatot jelentő „learning curve” végén pedig ez a különbség is kiegyenlítődik [31].

Háromdimenziós nyomtatás

A nyomtatás folyamata

A háromdimenziós nyomtatás megjelenése óta számos különböző metódus fejlődött ki. Az elsőként bevezetett módszer a sztereolitográfia volt (SLA), mely során fény hatására térhálósodás, polimerizáció jön létre, ezáltal készül a nyomtatott szilárd test. A folyamat során főleg gyantákat használnak, amelyek hátrányos tulajdonságai miatt nem terjedtek el a mozgásszervi sebészetben.

Jelenleg a leginkább használt módszer a 'fused deposition modeling' (FDM-) nyomtatás. A technika egy additív gyártási folyamat, ugyanis a nyomtatás során rétegről rétegre készül el a nyomtatott test. Az FDM képes ugyan fémek nyomtatására is, mégis főleg műanyagok, például egyedi vágósablonok előállítására alkalmazzák [32].

Az egyik legfejlettebb eljárás az 'electron-beam melting' (EBM), amelyet fémek, főleg titánium(ötvözetek) nyomtatására használhatunk. Nagy energiájú elektronsugarakat felhasználva a technika során felhasznált fémporok megolvadnak, majd egy vákuumban rétegről rétegre létrejön a nyomtatni kívánt test. Így készíthetők azok a fémimplantátumok, amelyek a műtét folyamán permanensen beültethetők [33]. A technika alkalmas ötvözetek nyomtatására, illetve porózus felszínek előállítására is [34], így szinte bármilyen, az arthroplastikában használt implantátum előállítható vele. Az EBM-nyomtatás ugyanakkor rendkívül költséges [35]: a felhasznált alapanyag magas ára mellett a nyomtató üzemeltetésének, karbantartásának költsége is igen jelentős.

Nyomtatható anyagok

Napjainkra a háromdimenziós nyomtatás során felhasználható anyagok köre folyamatosan bővül. Modellezésre, próbaműtétekre a leginkább politejsavat (PLA) használnak, ugyanis az elérhető módszerek közül ez a legegyszerűbb, legkisebb költséggel járó opció [36]. Mivel az intraoperatív felhasználás alapvető feltétele a sterilizálhatóság, alkalmazhatóságuk alapján két nagy csoportra oszthatjuk ezeket az anyagokat:

1. sterilizálható, de nem tartós anyagok,
2. sterilizálható, permanensen beültethető anyagok.

Az első csoportba tartozik például a poliamid (nylon), a poli(éter-éter-kezon) (PEEK), valamint az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS). Ezek az anyagok magas szintű biokompatibilitással rendelkeznek [37], felületük pedig sterilizálható, így személyre szabott műtéti sablonok vagy épp próbakomponensek nyomtatására használhatók. Bár a PLA etilén-oxiddal vagy plazmával sterilizálható, alacsony hőtüró képessége miatt az autoklávos sterilizálás során megolvad, így ez az anyag főleg preoperatív modellezésre terjedt el.

A permanensen beültethető anyagok közé főleg fémek, fémtövezetek tartoznak. Ilyen például a titán, az acél vagy a kobalt-króm ötvözet, amelyek mind általánosan elterjedt anyagok a mozgásszervi sebészetben, ezáltal magas szintű biokompatibilitásuk és hosszú várható élettartamuk régóta ismert. Ezeket az anyagokat általában DMLS-technikával nyomtatják, majd szükség esetén további felületkezelési eljárások során vonják be. Szintén hosszú távra beültethetők a szilikonszármazékok, ezekből például a szeptikus esetek kezelésére végzett kétületes revíziók során használt 'spacer' nyomtatható [38].

Van ugyan lehetőség lebomló, felszívódó anyagok (például poliglikolsav vagy polikaprolakton) nyomtatására, ezek előnyei a nagyízületi endoprotetikában nem hasznosíthatók. Ígéretesnek bizonyultak azonban kisízületek, például interphalangealis ízületek pótlására [39].

Nyomtatható modellek

A háromdimenziós nyomtatás sebészeti alkalmazásának legkézenfekvőbb módja az, ha az operálandó területről készült modellt nyomtatjuk ki, ezáltal kézzel megfoghatóvá, szabad szemmel is vizsgálhatóvá válik az operátor számára [40]. A módszer segítségével a műtét tervezése, illetve kivitelezése is egyszerűbbé válik. A kinyomtatható modellen „próbaműtétek” végezhetők, amelyek segíthetnek kiválasztani az optimális műtéti megoldást. A valódi operáció során a modell segíthet a tájékozódásban is, ami főleg speciális anatómiával rendelkező páciensek vagy tumoros betegek esetén elengedhetetlen [41]. A modelleken kipróbált, begyakorolt műtétek segítségével csökkenthető a műtéti idő, ezáltal pedig a szövődmények kialakulásának kockázata is [42].

Műtéti sablonok

Ahogy említettük, a nyomtatás során felhasznált anyagok egy része sterilizálható, ezáltal a műtét során is felhasználható eszközöket, személyre szabott műtéti sablonokat kaphatunk. Ezek a sablonok főleg a térdprotézisműtétek vonatkozásában terjedtek el [43], ugyanakkor csípő-, valamint vállprotézis-beültetéshez is nyomtathatók [44, 45]. Előnyük, hogy alkalmazásukkal egyedi, komplex anatómiával rendelkező páciensek is operálissá válnak. A műtét során a manuális pozicionálásból adódó hiba valószínűsége jelentősen csökken [46], ezáltal az implantátumok várható élettartama nő. A műtéti idő, illetve a vérvesztés vonatkozásában azonban a személyre szabott sablonokkal végzett operációk nem térnek el a hagyományos instrumentáriummal végzett műtétektől [47].

A műtéti sablonok alkalmazásának hátránya a képalkotás esetleges sugárterhelése mellett a nyomtatással járó többletköltség [48]. Ehhez hozzájárul az is, hogy mivel minden sablon személyre szabott, csupán egyetlen műtétre használható. Fontos kiemelni azt is, hogy egy műtéti sablon megtervezéséhez és legyártásához minimum 3 hét szükséges [49], így a műtéti időpont előtt legalább egy hónappal el kell készülnie a képalkotó vizsgálatoknak. Ugyanakkor amennyiben túl korán, hónapokkal a műtét előtt kezdődik el a sablon tervezése, akkor a virtuális modellen látott, illetve a tényleges intraoperatív status között lehetnek eltérések, ezért kulcsfontosságú a képalkotó vizsgálatok megfelelő ütemezése.

Egyedi implantátumok

Sterilizálható műanyagok mellett sterilizálható fémek is nyomtathatók, ezáltal nemcsak intraoperatív felhasználható műtéti sablonokat, de beültethető implantátumokat is előállíthatunk. Ezek lehetnek különböző augmentációk [50], de akár a protézis komponensei is [51]. Fontos, hogy mivel a nyomtatott implantátumok minden esetben cement nélküli technikára készülnek, felületük vagy eleve porózus, vagy valamilyen felületkezelésre van szükség. Mivel előállításuk ára igen magas [52], egyedi implantátum használatára akkor kerülhet sor, ha a páciens speciális anatómiája (például a csípőrevíziós műtétek során észlelt jelentős acetabularis csonthiány esetén) megköveteli azt [53]. Mivel az egyedi implantátumok csak az utóbbi évtizedben jelentek meg, hosszú távú eredmények még nem érhetők el a szövődmények, illetve az implantátumok várható élettartamának vonatkozásában. A közvetlen posztoperatív adatok mellett azonban a rövid és középtávú eredmények is igen pozitívnak bizonyultak: az egyedi implantátumok alkalmazása során csökken a műtéti idő, a vérvesztés, illetve a szövődmények száma is [53]. Magas árak mellett hátrányt jelent az is, hogy (a sablonokhoz hasonlóan) gondosan kell megválasztani a képalkotó vizsgálat időpontját, hiszen bár az előállítás időigényes, a modellezett kép nem térhet el nagyban az intraoperatív észlelt anatómiai helyzettől.

Következtetés

A háromdimenziós képalkotáson alapuló szoftverek a korábbi technikáknál pontosabb módon képesek a komplex mozgásszervi műtétek megtervezésére, ezáltal optimális helyzetben rögzíthetjük a megfelelően megválasztott implantátumokat, ami jó funkciót, megnövekedett protézis-élettartamot eredményez. A gondos tervezés emellett a műteti idő lerövidítésével a szövődmények kialakulásának kockázatát is csökkenti. A mesterséges intelligencia és a robotika integrálásával a manualitásból eredő hibalehetőség is folyamatosan csökken. A háromdimenziós nyomtatás technikájának fejlődésével a felhasználható anyagok listája folyamatosan bővül.

A kinyomtatott modellek jelentős szerepet töltenek be az oktatásban, az azokon végzett próbaműtétek pedig segítenek az operatőrnek olyan döntések meghozásában, amelyekre korábban csak intraoperatív volt lehetőség. A gondos tervezés eredményeként létrehozott, személyre szabott egyedi instrumentárium biztosítja a páciens számára az implantátumok optimális pozicionálását, valamint szintén csökkenti a műteti időt. A háromdimenziós nyomtatással előállított egyedi implantátumok segítségével korábban inoperábilis esetek is kezelhetők, komplex anatómiai viszonyok helyreállítása vagy súlyos csonthiányos páciensek rekonstrukciós műtetei is kivitelezhetők. A rövid távú eredmények ígéretesek, az egyedi implantátumokkal végzett műtétek szövődmenyrátája igen alacsony.

Bár a technológia ára igen magas, hosszú távon kifizetődő is lehet, hiszen a páciens akár későbbi potenciális revíziós műtététől óvja meg, ezzel csökkentve a beteg és az ellátórendszer terheit.

Anyagi támogatás: A szerzők nem részesültek anyagi támogatásban.

Szerzői munkamegosztás: Sz. G. S.: Konceptualizálás, irodalomkutatás, a kézirat elkészítése. Sz. T.: Irodalomkutatás, adatgyűjtés. H. G.: Irodalomkutatás, a tervezéssel foglalkozó fejezet szerkesztése. B. Z.: Konceptualizálás, irodalomkutatás, a robotikával és a nyomtatással foglalkozó fejezetek szerkesztése. A közlemény végleges változatát a cikk valamennyi szerzője elolvasta és jóváhagyta.

Érdekltségek: A szerzőknek nincsenek érdekltségeik.

Irodalom

- [1] Csóky G, Würsching T, Szentpéteri S, et al. The use of patient-specific implants in maxillofacial reconstruction. [Páciensspecifikus implantátumok használata arckoponya-rekonstrukció során.] Orv Hetil. 2024; 165: 1594–1600. [Hungarian]
- [2] Barabás JI, Palkovics D, Bognár V, et al. The role of 3D technology in the support of mechanical circulation therapy. Semmelweis Patent. [A 3D technológia szerepe a műszívtérapiában. Semmelweis Szabadalom.] Orv Hetil. 2023; 164: 1026–1033. [Hungarian]
- [3] Kamath AF, Austin DC, Derman PB, et al. Unplanned hip arthroplasty imposes clinical and cost burdens on treating institutions. Clin Orthop Relat Res. 2013; 471: 4012–4019.
- [4] Sai Sathikumar A, Jacob G, Thomas AB, et al. Acetabular cup positioning in primary routine total hip arthroplasty – a review of current concepts and technologies. Arthroplasty 2023; 5: 59.
- [5] Benjamin B, Haddad FS. Management of limb length problems during total hip arthroplasty for patients with developmental dysplasia of the hip. Br J Hosp Med (Lond). 2020; 81: 1–7.
- [6] Sheth B, Lavin AC, Martinez C, et al. The use of preoperative planning to decrease costs and increase efficiency in the OR. JSES Int. 2022; 6: 454–458.
- [7] Holzer LA, Scholler G, Wagner S, et al. The accuracy of digital templating in uncemented total hip arthroplasty. Arch Orthop Trauma Surg. 2019; 139: 263–268.
- [8] Bishi H, Smith JB, Asopa V, et al. Comparison of the accuracy of 2D and 3D templating methods for planning primary total hip replacement: a systematic review and meta-analysis. EFORT Open Rev. 2022; 7: 70–83.
- [9] Parisi FR, Zampogna B, Zampoli A, et al. Planning accuracy and stem offset assessment in digital two-dimensional versus three-dimensional planning in cementless hip arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. J Clin Med. 2024; 13: 6566.
- [10] Pietrzak JR, Rowan FE, Kayani B, et al. Preoperative CT-based three-dimensional templating in robot-assisted total knee arthroplasty more accurately predicts implant sizes than two-dimensional templating. J Knee Surg. 2019; 32: 642–648.
- [11] Ettinger M, Claassen L, Paes P, et al. 2D versus 3D templating in total knee arthroplasty. Knee 2016; 23: 149–151.
- [12] Franceschi JB, Sbihi A. 3D templating and patient-specific cutting guides (Knee-Plan®) in total knee arthroplasty: postoperative CT-based assessment of implant positioning. Orthop Traumatol Surg Res. 2014; 100(Suppl): S281–S286.
- [13] Londhe SB, Shetty S, Vora NL, et al. Efficacy of the pre-operative three-dimensional (3D) CT scan templating in predicting accurate implant size and alignment in robot-assisted total knee arthroplasty. Indian J Orthop. 2022; 56: 2093–2100.
- [14] Aubert T, Galanzino G, Gerard P, et al. Accuracy of preoperative 3D vs 2D digital templating for cementless total hip arthroplasty using a direct anterior approach. Arthroplas Today 2023; 24: 101260.
- [15] Huo J, Huang G, Han D, et al. Value of 3D preoperative planning for primary total hip arthroplasty based on artificial intelligence technology. J Orthop Surg Res. 2021; 16: 156.
- [16] Soriali E, Mauprivez R, Khiami F, et al. Accuracy of the preoperative planning for cementless hip arthroplasty. A randomised comparison between three-dimensional computerised planning and conventional templating. Orthop Traumatol Surg Res. 2012; 98: 151–158.
- [17] Schiffner E, Latz D, Jungbluth P, et al. Is computerised 3D templating more accurate than 2D templating to predict size of components in primary total hip arthroplasty? Hip Int. 2019; 29: 270–275.
- [18] Fontalis A, Yassen AT, Kayani B, et al. Two-dimensional versus three-dimensional preoperative planning in total hip arthroplasty. J Arthroplasty 2024; 39(Suppl 1): S80–S87.
- [19] Brenneis M, Braun S, van Drongelen S, et al. Accuracy of preoperative templating in total hip arthroplasty with special focus on stem morphology: a randomized comparison between common digital and three-dimensional planning using biplanar radiographs. J Arthroplasty 2021; 36: 1149–1155.
- [20] Crutcher JP, Hameed D, Dubin J, et al. Comparison of three-versus two-dimensional pre-operative planning for total hip arthroplasty. J Orthop. 2024; 47: 100–105.
- [21] Horas K, Arnholdt J, Steinert AE, et al. Acetabular defect classification in times of 3D imaging and patient-specific treatment

- protocols. [Periazetabuläre Defektklassifikation in Zeiten von 3D-Bildgebung und patientenspezifischer Therapieprotokolle.] Orthopäde 2017; 46: 168–178. [German]
- [22] Kavalerskiy GM, Murylev VY, Rukin YA, et al. Three-dimensional models in planning of revision hip arthroplasty with complex acetabular defects. Indian J Orthop. 2018; 52: 625–630.
- [23] Huppertz A, Lembcke A, Sariali el-H, et al. Low dose computed tomography for 3D planning of total hip arthroplasty: evaluation of radiation exposure and image quality. J Comput Assist Tomogr. 2015; 39: 649–656.
- [24] Velasquez Garcia A, Bukowiec LG, Yang L, et al. Artificial intelligence-based three-dimensional templating for total joint arthroplasty planning: a scoping review. Int Orthop. 2024; 48: 997–1010.
- [25] Amadita K, Gray F, Gee E, et al. CT metal artefact reduction for hip and shoulder implants using novel algorithms and machine learning: a systematic review with pairwise and network meta-analyses. Radiography (Lond). 2025; 31: 36–52.
- [26] Yasen Z, Woffenden H, Robinson AP. Robotic-assisted knee arthroplasty: insights and implications from current literature. Cureus 2023; 15: e50852.
- [27] Lu H, Xiao Q, Xu H, et al. Robotic arm-assisted total hip arthroplasty for preoperative planning and intraoperative decision-making. J Orthop Surg Res. 2023; 18: 608.
- [28] Twomey-Kozak J, Hurley E, Levin J, et al. Technological innovations in shoulder replacement: current concepts and the future of robotics in total shoulder arthroplasty. J Shoulder Elb Surg. 2023; 32: 2161–2171.
- [29] Cochrane NH, Kim BI, Stauffer TP, et al. Revision total knee arthroplasty with an imageless, second-generation robotic system. J Arthroplasty 2024; 39(Suppl 1): S280–S284.
- [30] MacAskill M, Peluso R, Lash J, et al. A Three-dimensional comparison of pre- and post-component position in a series of off-label robotic-assisted revision total knee arthroplasties. Arthroplast Today 2024; 25: 101310.
- [31] Tay ML, Carter M, Zeng N, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of 16 cases and increased operative time of 12 min. ANZ J Surg. 2022; 92: 2974–2979.
- [32] Hooper J, Schwarzkopf R, Fernandez E, et al. Feasibility of single-use 3D-printed instruments for total knee arthroplasty. Bone Joint J. 2019; 101(Suppl_C): 115–120.
- [33] Huang Y, Zhou YX, Tian H, et al. Minimum 7-year follow-up of a porous coated trabecular titanium cup manufactured with electron beam melting technique in primary total hip arthroplasty. Orthop Surg. 2021; 13: 817–824.
- [34] Wu Y, Liu J, Kang L, et al. An overview of 3D printed metal implants in orthopedic applications: present and future perspectives. Heliyon 2023; 9: e17718.
- [35] Meng M, Wang J, Huang H, et al. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: methods, applications and future prospects. J Orthop Translat. 2023; 42: 94–112.
- [36] Chen JV, Dang AB, Dang A. Comparing cost and print time estimates for six commercially – available 3D printers obtained through slicing software for clinically relevant anatomical models. 3D Print Med. 2021; 7: 1.
- [37] Tan KH, Chua CK, Leong KF, et al. Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone-hydroxyapatite biocomposite blends. Biomaterials 2003; 24: 3115–3123.
- [38] Zhang H, Zheng S, Liu Q, et al. 3D-printed antibiotic-loaded bone cement spacers as adjunctive therapy for hip periprosthetic infection after arthroplasty: a clinical assessment. Int J Antimicrob Agents 2024; 63: 107080.
- [39] Hsu YH, Chou YC, Chen CL, et al. Development of novel hybrid 3D-printed degradable artificial joints incorporating electrospun pharmaceutical- and growth factor-loaded nanofibers for small joint reconstruction. Biomater Adv. 2024; 159: 213821.
- [40] Mendonça CJ, da Rocha Guimarães RM, Pontim CE, et al. An overview of 3D anatomical model printing in orthopedic trauma surgery. J Multidiscip Healthc. 2023; 16: 875–887.
- [41] Punyaratabandhu T, Liacouras PC, Pairojboriboon S. Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advances in surgical planning and intraoperative outcomes. 3D Print Med. 2018; 4: 12.
- [42] Dos Santos-Vaquinhas A, López-Torres II, Matas-Diez JA, et al. Improvement of surgical time and functional results after do-it-yourself 3D-printed model preoperative planning in acetabular defects Paprosky IIA-IIIB. Orthop Traumatol Surg Res. 2022; 108: 103277.
- [43] León-Muñoz VJ, Martínez-Martínez F, López-López M, et al. Patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty. Expert Rev Med Devices 2019; 16: 555–567.
- [44] Villatte G, Muller AS, Pereira B, et al. Use of patient-specific instrumentation (PSI) for glenoid component positioning in shoulder arthroplasty. A systematic review and meta-analysis. PLOS ONE 2018; 13: e0201759.
- [45] Constantinescu DS, Costello JP 2nd, Dalling AD, et al. The efficacy of patient specific instrumentation (PSI) in total hip arthroplasty (THA): a systematic review and meta-analysis. J Orthop. 2022; 34: 404–413.
- [46] Inoue D, Kabata T, Kimura H, et al. A prospective clinical trial to assess the accuracy of an MRI-based patient-specific acetabular instrument guide in total hip arthroplasty. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2019; 29: 65–71.
- [47] Chen X, Li S, Wang Y, et al. Artificially intelligent three-dimensionally-printed patient-specific instrument improves total hip arthroplasty accuracy. J Arthroplasty 2023; 38: 2060–2067.e1.
- [48] DeHaan AM, Adams JR, DeHart ML, et al. Patient-specific versus conventional instrumentation for total knee arthroplasty: peri-operative and cost differences. J Arthroplasty 2014; 29: 2065–2069.
- [49] Keskinis A, Paraskevopoulos K, Diamantidis DE, et al. The role of 3D-printed patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty: a literature review. Cureus 2023; 15: e43321.
- [50] Tikhilov RM, Dzhavadov AA, Demin AS, et al. Early outcomes of using custom-made augments in revision total hip arthroplasty. Int Orthop. 2022; 46: 2229–2235.
- [51] De Martino I, Strigelli V, Cacciola G, et al. Survivorship and clinical outcomes of custom triflange acetabular components in revision total hip arthroplasty: a systematic review. J Arthroplasty 2019; 34: 2511–2518.
- [52] Levesque JN, Shah A, Ekhtiari S, et al. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: a scoping review. EFORT Open Rev. 2020; 5: 430–441.
- [53] Chiarlone F, Zanirato A, Cavagnaro L, et al. Acetabular custom-made implants for severe acetabular bone defect in revision total hip arthroplasty: a systematic review of the literature. Arch Orthop Trauma Surg. 2020; 140: 415–424.

(Bejek Zoltán dr.,
Budapest, Üllői út 78/b, 1082
e-mail: bejek.zoltan@semmelweis.hu)