

## 3D NYOMTATÁSSAL KÉSZÜLŐ CRANIOPLASTICA ÖNTŐFORMA TOVÁBBFEJLESZTÉSE

Csámer Loránd<sup>1\*</sup>, Kovács Ágnes Éva<sup>1</sup>, Méhes Nándor<sup>2</sup>, Horváth Hajnalka<sup>1</sup>, Manó Sándor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Debreceni Egyetem, Innovációs Ökoszisztéma Központ, Biomechanikai Laboratórium

<sup>2</sup>Debreceni Egyetem, Informatikai Kar



DOI: 10.17489/biohun/2024/2/609

### Absztrakt

A koponyacsont veleszületett, vagy szerzett hiányainak pótlása a védendő szerv kiemelt szerepe és sérülékenysége folytán igen fontos. Az intézetünkben kidolgozott cranioplasztikai eljárással előállítható a defektus pótlására alkalmas alak-és méretpontos 3D modell. A beültetésre kerülő csontcement implantátumot egy szilikon öntőforma segítségével formázzuk, ami anyag- és időigényes, valamint további hibalehetőségeket rejt magában.

Azt a célkitűzést fogalmaztuk meg, hogy 3D nyomtatással közvetlenül előállítható öntőformát tudjunk készíteni a PMMA csontpótlás formázásához, amivel a folyamat lerövidülhet és a szilikon öntőforma gyártásával felmerülő hibalehetőségeket csökkenteni tudjuk. Az előzetes tesztek alapján azonban világossá vált, hogy a térhálósodás során a csontcement a legtöbb esetben összetapad az öntőforma anyagával és a továbbiakban már nem távolítható el sérülésmentesen.

8 különböző típusú 3D nyomtatási alapanyagból (MED610, TPU 98A, PLA Antibacterial, ABS, Prusa Flex, TangoPlus, BioMED 50A, Nylon PA12) elkészítettük egy koponyapótlás öntőforma 1:2 méretarányú modelljeit, amelyekbe csontcementet öntöttünk, majd teszteltük, hogy eltávolítható-e a pótlás a megszilárdulást követően. 6 esetben nem sikerült elválasztani az öntőformát a csontcementtől, ezek a MED610, TPU 98A, PLA Antibacterial, ABS, Prusa Flex, ellenben a TangoPlus és a BioMED 50A esetében sikerült.

Az eddigi vizsgálataink alapján, csontcement öntőforma közvetlen nyomtatásához a BioMed 50A és a TangoPlus műgyanták megfelelőnek bizonyulnak.

**Kulcsszavak:** koponyapótlás, PMMA, 3D nyomtatás, csontcement

**\*Levelező szerző elérhetősége:** Debreceni Egyetem, Innovációs Ökoszisztéma Központ, Biomechanikai Laboratórium, H-4032 Debrecen, Vezér u. 37.

**E-mail:** [csamer.lorand@med.unideb.hu](mailto:csamer.lorand@med.unideb.hu) **Tel.:** +36 52 411-717/53698

**Citáció:** Csámer L, Kovács ÁÉ, Méhes N, Horváth H, Manó S. Koponyapótlás öntőforma továbbfejlesztése. *Biomech Hung.* 2024;17(2):40-6.

**Beérkezés ideje:** 2024.11.12. **Elfogadás ideje:** 2024.12.22.

## FURTHER DEVELOPMENT OF OUR CRANIOPLASTY MOULD TECHNIQUE

## Abstract

Replacement of congenital or acquired defects of the skull bone is particularly important due to the special role and vulnerability of the organ to be protected. The cranioplasty procedure developed in our institute can produce a 3D model of the shape and size of the defect. The bone-cement implant to be placed is currently moulded using a silicone mould, which is, however, material- and time-intensive and involves additional potential for error.

As a further development of the process, we set the objective of producing a mould for moulding PMMA bone graft directly by 3D printing, which would shorten the process and reduce the potential for errors associated with the silicone mould. However, from preliminary tests it has become clear that during crosslinking, the bone cement will in most cases adhere to the mould material and can no longer be removed without damage.

For our investigations, we prepared M 1:2 scale models of a skull replacement mould from 8 different types of 3D printing materials (MED610, TPU 98A, PLA Antibacterial, ABS, Prusa Flex, Tango Plus, BioMED 50A, Nylon PA12), into which bone cement was cast, and tested whether the replacement could be removed after solidification. In six cases the mould could not be separated from the bone cement, these were MED610, TPU 98A, PLA Antibacterial, ABS, Prusa Flex, whereas in Tango Plus and BioMED 50A the bone cement did not adhere to the mould. The sticky surface, which was another problem, was eliminated by appropriate post-treatment.

On the basis of our tests so far, BioMed 50A and Tango Plus resins have proved to be suitable for direct printing of bone cement moulds.

**Keywords:** cranioplasty, PMMA, 3D printing, bone cement

## BEVEZETÉS

Világszerte elterjedt gyakorlat a koponyadeфекtusok helyreállítására és pontos rekonstrukciójára a CT-felvétel alapján, 3D-nyomatás alkalmazásával készített minták használata.<sup>1-3</sup> Intézetünkben az elmúlt két évtizedben több mint száz esetben készítettünk az általunk kidolgozott és publikált módszerrel PMMA-csontpótlást, amely során jelentős tapasztalatra tettünk szert valamennyi részfolyamattal, így a szilikon öntéssel kapcsolatban is.<sup>4,5</sup>

A pozitív minta nyomtatásához Objet 260 (Stratasys, Eden Prairie, MN, USA) berendezést használunk, MED 610 biokompatibilis fotopolimer alapanyaggal, míg a szilikon öntőforma készítéséhez a korábbi gyakorlatunk szerint ProtoSil RTV 245 (Antropol GmbH,

Stockelsdorf, Németország) kétkomponensű szilikonanyagot, amelyről az elmúlt esztendőben áttértünk a NEUKASIL RTV 230 használatára. Mindkét típus a megszilárdulást követően egy biológiailag inert, áttetsző anyag, amely 200 °C-ig hőálló, könnyen sterilizálható, ráadásul a megszilárdult PMMA nem tapad hozzá. Gyakorlatunk szerint a formázást követően a szilikon 24 órán át 50 °C-on tartjuk a teljes megszilárduláshoz.<sup>6,7</sup>

A szilikon elkészítése költség- és erőforrásigényes folyamat, továbbá esetenként a kétkomponensű szilikon alapanyagban a fotopolimer pozitív mintával érintkező határfelület mentén térhálósodási zavar alakult ki, amelyet az esetek döntő többségében önmagában a megszilárdításra fordított idő megtöbbszörözésével nem, csak további

A149 Crosslinker felvitelével, illetve ismételt hőntartással sikerült érdemben kezelni.

Hosszútávú célkitűzésünk a koponyacsont pótlás gyártási folyamatának egyszerűsítése 3D nyomtatással közvetlenül előállítható öntőforma készítésével, illetve ezzel együtt a szilikon öntőforma elhagyásával. A változtatástól az elkészítési folyamat egyszerűsödését, anyag-, illetve időmegtakarítást, valamint az ismertett komplikációk elmaradását várjuk. Irodalomkutatásunk alapján azt találtuk, hogy nem példa nélküli 3D nyomtatott öntőforma alkalmazása a PMMA formázása során<sup>8,9</sup>, így a folyamat kidolgozása mellett határoztunk.

Előzetes kísérleteink során azonban azt tapasztaltuk, hogy a csontcement végzetesen összeragad a megszilárdulási folyamata során a vele érintkező számos – több a 3D nyomtatás területén is használt – anyag típussal, ezzel gyakorlatilag ellehetetleníti az öntőforma maradéktalan leválasztását az elkészült öntvényről. Jelen közleményben ismertetjük az intézetünk által elérhető, releváns 3D nyomtatási technológiákkal és alapanyagokkal készített kísérleti öntőformák használatával kapcsolatban szerzett tapasztalatainkat. A tesztek során a kikeményedett csontcementet próbáltuk meg eltávolítani kézzel, illetve szükség esetén kézi eszközök igénybevételével, illetve az öntőforma feleket igyekeztünk leválasztani az öntvényről. Tettük ezt annak érdekében, hogy a szilikon öntési eljárás elhagyásához szükséges egyszerű és megbízható eljárásunk kidolgozásához megfelelő öntőforma alapanyagot találjunk.

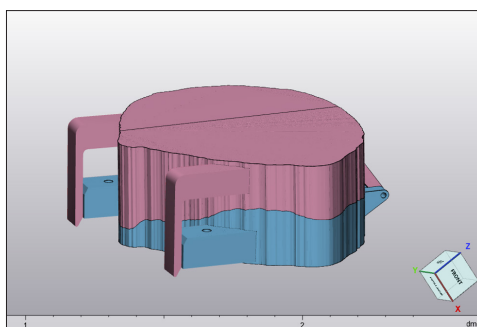
## ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A tesztek során egy kiválasztott, korábbi koponyapótlás eset terveit vettük alapul és készítettük el az öntőforma 3D modelljeit a 3-matic v.18 (Materialise NV, Leuven, Belgium) ana-

tómiiai tervező programban. A modellek tervezése során egy zsanér mentén elforduló, alakzáró kapcsokkal rögzülő formapárt alakítottunk ki, hogy biztosítani tudjuk a felek megfelelő illeszkedésével a csontpótlás ideális geometriáját (1. ábra).

Az elkészült tervek alapján 3D nyomtatással készítettük el M 1:2 méretarányban a kísérleti öntőformákat, amelyhez a Bio-Compatible Clear™ MED610 (Stratasys, Objet 260 Connex), PLA Antibacterial (Ultimaker S5), Flexfill TPU 98A (Ultimaker S5), Stratasys ABS Ivory (Stratasys F270), Prusa Flex Transparent (Prusa SL1), Tango Plus (Stratasys, Objet 260 Connex), Formlabs BioMed 50A (Formlabs, Forms 3+) és Formlabs Nylon PA12 (Formlabs Fuse 1) típusú alapanyagokat választottuk a zárójelben feltüntetett 3D nyomtatók használata mellett (2. ábra). A nyomtatások elkészültével a gyártó által előírt utókezelési eljárásokat elvégeztük.

A csontpótlás elkészítéséhez az eddigi gyakorlatunkban is használt CMW3 Gentamicin (DePuy Synthes, Solothurn, Svájc) csontcement típust választottuk. A cementhez mellékelt kezelési utasítás alapján elvégeztük a komponensek elegyítését, majd betöltöttük a homogén csontcementet a formákba, végül összerártuk az öntőforma feleket. A szilárdulási idő leletével megkíséreltük kézi erővel el-



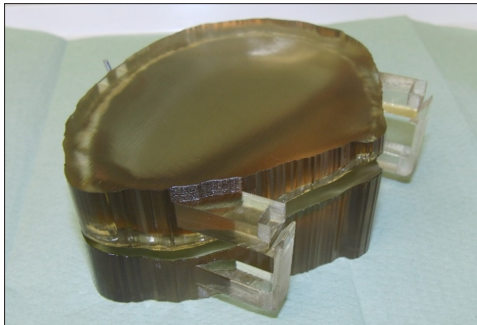
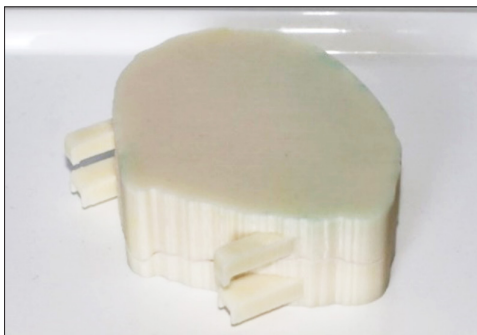
1. ábra. A 3D nyomtatott öntőforma számítógépes modellje

távolítani a feleket, ahol nem sikerült, ott kézi eszközöket (egyenes- és hajlított csőrös fogókat, műanyag fejes- és sebészeti kalapácsokat és sebészi vésőt) is igénybe vettünk (3. ábra).

## EREDMÉNYEK

A nyolc különböző anyagú formából hat esetben nem sikerült az öntvény PMMA repedése, vagy törése nélkül eltávolítani azt a nyomtatott formából (4. ábra), azonban a Stratasys Tango Plus és a Formlabs Biomed Elastic 50A esetén kézi erővel széthajtható volt az öntőforma és levált a csontcement a formáról (5. ábra). Ennél a két típusnál a forma is sértetlen maradt, amely lehetővé teszi, hogy szükség esetén az öntés később megismételhető legyen. Az öntések során szerzett tapasztalatainkat az 1. táblázat foglalja össze.

*Stratasys ABS Ivory:* Az öntőforma kipróbálása sikertelen volt, mivel csak nagy erőbe-



2. ábra. A 3D nyomtatással készült öntőformák

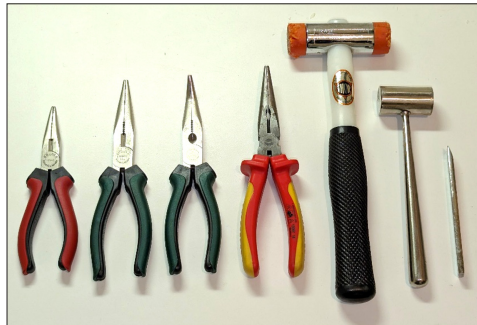
fektetéssel, különféle eszközök használatával (kalapács, csavarhúzó), valamint időigényes művelet során sikerült szétválasztani a feleket. Az implantátum nem vált el az öntőforma belső felületétől, hanem kettétört, egyik fele az egyik oldalhoz, másik fele a másik oldalhoz ragadt.

*Philament Antibacterial PLA Natural:* A csontcement hozzátapadt az öntőformához és csak nagymértékű mechanikai behatás során lehetett szétválasztani az egyik felét. Ebből kifolyólag a tesztek sikertelenek voltak.

*Formlabs Nylon PA12 Grey:* Az anyag nagymértékű mechanikai behatás során tört darabokra. Kisebb Nylon szemcsék ragadtak a csontcement felületére. Ebből kifolyólag a tesztek sikertelenek voltak.

*Stratasys MED610 Biocompatible:* Az öntőforma mechanikai hatásokra sem nyílt szét, végül csak darabokra törve sikerült az öntőforma egyik felét eltávolítani, de maga az implantátum így sem lett hozzáférhető.

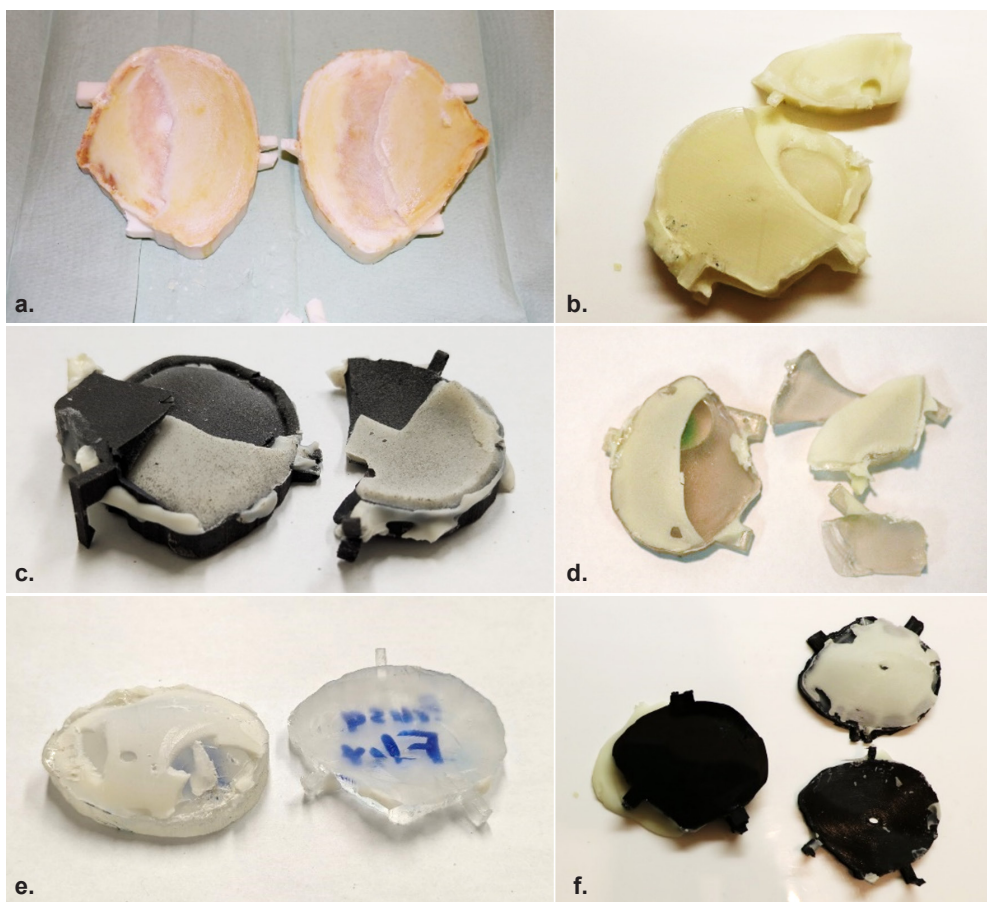
*Fillamentum Flexfill 98A Traffic Black:* Az öntvényhez tapadó csontcement eltávolítása nagy mechanikai erő és csontpótlás rongálódása okán sikertelen. A fóliás kísérlet sikeres leválást biztosított, de a térhálósodás bekövetkezte folyamán összegyűrte és redőssé tette az implantátumot.



3. ábra. A szétválasztás során felhasznált kéziszerszámok

1. táblázat. A 3D nyomtatott PMMA öntőforma kísérlet összefoglaló táblázata

Alapanyag megnevezése	Nyomtatási eljárás	Alapanyag merevsége	Levált a csontcement sérülésmentesen?	A forma sérült-e?	Ragadós-e a felülete?
Stratasys ABS Ivory	FDM	Merev	Nem	Igen	Nem
Philament Antibacterial PLA Natural	FDM	Merev	Nem	Igen	Nem
Formlabs Nylon PA12 Grey	FDM	Merev	Nem	Igen	Nem
Stratasys MED610 Biocompatible Transparent	Polyjet	Merev	Nem	Igen	Nem
Fillamentum Flexfill 98A Traffic Black	FDM	Puha	Nem	Igen	Nem
Prusa Flex Transparent	LCD	Puha	Nem	Igen	Igen
Stratasys Tango Plus	Polyjet	Puha	Igen	Nem	Igen
Formlabs BioMed Elastic 50A Clear	SLA	Puha	Igen	Nem	Igen



4. ábra. Öntőformák sikertelen PMMA leválasztási kísérletet követően a.) ABS b.) PLA c.) PA12 Nylon d.) MED610 e.) Prusa Flex f.) TPU

*Prusa Flex Transparent:* Az öntvény eltávolítható volt kézieszköz (véső és fogó) segítségével, azonban körülményes és időigényes volt a procedura, továbbá sérült is a műgyanta forma az eszközök használata következtében.

*Stratasys Tango Plus:* A puha műgyanta kézi erővel, illetve kézieszköz rásegítésével kinyílt, abból a modellt sikerült épségben eltávolítani. Az alapanyag az utókezelési munkautasítás betartása ellenére is ragadós felületű maradt.

*Formlabs BioMed Elastic 50A Clear:* Rendkívül könnyen szétnyíltak a felek, szinte magától kiesett a kísérleti csontpótlás az öntőformából. Kifogás az alapanyaggal szemben, hogy a gyártó utasításának maradéktalan betartása ellenére sem sikerült teljesen megszüntetni a felületi ragadóságot.

A kísérletünk alapján a tesztelt anyagok közül tehát a BioMed 50A és a Tango Plus azok az öntőforma alapanyagok, amelyekről könnyedén leválasztható volt a megszilárdult csontcement úgy, hogy a forma is sértetlenül maradt.

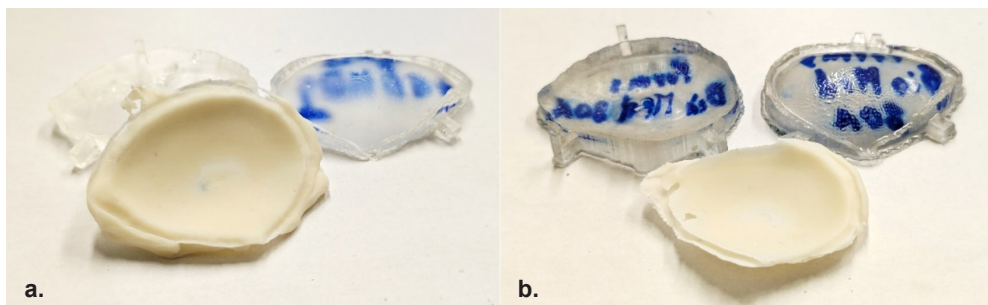
A ragadós felület megszüntetésére egy extra utókezelő lépést kellett elvégeznünk, amely során a glicerinnel bekent modellt további 60 percre UV fényben tartottuk.

## MEGBESZÉLÉS

A tesztek során szerzett tapasztalataink szerint az alapanyagoknak rugalmasnak, vagy puhának, de legalább könnyen deformálhatónak kell lennie ahhoz, hogy eltávolítható legyen a PMMA belőle. Az anyag kiválasztáskor fontos szempont volt továbbá, hogy az öntés után a forma visszanyerje eredeti alakját és újra felhasználható legyen, hogy az esetleges öntési hibák, vagy a földre eső implantátum esetére meg lehessen ismételni az öntést. Az értékelésnél figyelembe vettük a sterilizálhatóságot is, ami a későbbi klinikai felhasználásnak alapfeltétele. Az öntőformaként történő felhasználásig azonban még további feladatok is adódnak. Ilyen a leválasztási teszten sikeres eredménnyel zárt Tango Plus és Biomed 50A resinek utókezelést követően is maradó ragadósága. Ez többek között a levegőben szálló idegen anyagok esetleges megtapadása miatt is aggályos. A jelenség megszüntetésére azonban már reagált a műszaki közösség, léteznek elfogadható eredményt nyújtó megoldások, de mindenképpen további figyelmet kíván a probléma.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A PMMA leválási teszt pozitív eredménnyel zárult, találtunk ugyanis olyan 3D nyomtatható alapanyagokat, amelyek leválaszthatóak



5. ábra. A csontpótlás és az öntőforma, sikeres eltávolítást követően a.) Tango Plus b.) Biomed 50A

a csontcementről kézi erővel, a PMMA és az öntőforma károsodása nélkül. Ezek az anyagok puha fotopolimer műgyanták, amelyekre jellemző az utókezelés után is fennmaradó tapadás. A tapadó felület ugyan magában rejti az idegtestet megtapadásának kockázatát a levegőből, vagy érintés hatására, azonban a fotopolimer nyomtatás gyakorlatából ismeretes olyan eljárás, amely a tapadást minimálisra csökkenti, ezzel a további ilyen célú felhasználásra alkalmassá teszi ezeket az anyagokat. Ennek tudatában megállapítható, hogy a Stratasys Tango Plus és a Formlabs Biomed 50A alkal-

masak a PMMA öntőformájának anyagául és a továbbiakban ezen típusok felhasználásával folytatódhat a szilikon öntészeti eljárás továbbfejlesztésének, illetve leváltásának a folyamata.

### Limitációk

A próba során nem törekedtünk a piacon fellelhető valamennyi nyomtatási eljárás és a hozzájuk tartozó széles alapanyag-paletta vizsgálatára, így megállapításaink a Biomechanikai Laboratórium számára elérhető nyomtatási módszerekre és alapanyagfélésekre korlátozódnak.

**A szerzők részvétele:** CS.L.: kísérletek végrehajtása, kiértékelése, kézirat írása, K.Á.É.: előkísérletek, M.N.: részvétel a kísérletekben, adminisztráció, H.H.: előkísérletek, M.S.: koncepció, módszerek

**Köszönetnyilvánítás:** -

**Támogatás:** A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „2021-1.2.4-TÉT-2021-00046” és „2021-1.2.4-TÉT-2021-00002” azonosító jelű pályázatainak támogatásával valósult meg.

**Összeférhetlenség:** Nincs.

## IRODALOM

- Kochan D, Kai CC, Zhaohui D. Rapid prototyping issues in the 21st century. *Computers in Industry*. 1999;39:3–10.
- Seitz H, Tille C, Irsen S, Bermes G, Sader R, Zeilhofer HF. Rapid Prototyping models for surgical planning with hard and soft tissue representation. *International Congress Series*. 2004;1268:567-72.
- Wurm G, Tomancoğ B, Holl K, Trenkler J. Prospective study on cranioplasty with individual carbon fiber reinforced polymer (CFRP) implants produced by means of stereolithography. *Surg Neurol*. 2004;62(6):510-21.
- Csámer L, Csernátóy Z, Novák L, Kővári VZ, Kovács ÁÉ, Horváth H, Manó S. Custom-made 3D printing-based cranioplasty using a silicone mould and PMMA. *Sci Rep*. 2023;13:11985.
- Csernátóy Z, Novák L, Bognár L, Ruszthi P, Manó S. Számítógépes tervezésű cranioplastica. Első hazai eredmények a térbeli nyomtatás orvosi alkalmazásával. *Magyar Traumat Ortop*. 2007;50(3): 238-43.
- Manó S, Kővári V, Szabó J, Csámer L, Kovács ÁÉ, Horváth H, Csernátóy Z. 3D nyomtatás alapú cranioplasztika szilikon öntészeti módszerek és csontcement alkalmazásával. *Biomech Hung*. 2020;13(1): 49-56.
- Manó S, Novák L, Csernátóy Z. A 3D nyomtatás technológiájának alkalmazása a cranioplasticában. *Biomech Hung*. 2008;1(1):15-20.
- Katalenic M, Stratasys. A better mould for cranioplasties: 3D printing enables faster, cheaper, more predictable outcomes. [Internet] Available from: <https://www.stratasys.com/uk/resources/case-studies/>
- Splavski B, Lakicevic G, Kovacevic M, Godec D. Customized alloplastic cranioplasty of large bone defects by 3D-printed prefabricated mold template after posttraumatic decompressive craniectomy: A technical note. 22-Apr-2022;13:169. Available from: <https://surgicalneurologyint.com/surgicalint-articles/>