

Újszerű fém-polimer vállízületi implantátum fejlesztése

The Development of a New Shoulder Joint Prosthesis System

Nemes-Károly István,¹ Kocsis György,² Szébenyi Gábor³

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék. Budapest, Magyarország, nemes-karolyi@pt.bme.hu

² Semmelweis Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Ortopédia Klinika. Budapest, Magyarország, kocsis.gyorgy@med.semmelweis-univ.hu

³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék. Budapest, Magyarország, szebenyi@pt.bme.hu

Abstract

In our work, we designed a new metal-polymer shoulder implant system that fully meets today's requirements - minimal invasive technology, a high degree of modularity - and can be personalized as needed. At the same time, its production does not exceed the currently available production technologies. Also, the data and parameters which are needed to design the tailor-made construction are easily accessible, as we have chosen a device that is widespread and commonplace in medical diagnostics and available in any hospital. Furthermore, we have tried to make our system as easy and fast to authorize as possible because it is challenging to place medical devices on the market, especially implants. We have tried to create the cheapest, most economical system and in addition, we wanted to gain the trust of implant specialists, as we incorporated their insights and experiences into our construction through continuous consultation.

Keywords: *shoulder implant, minimal invasive technology, modularity, tailor made construction, UHMWPE.*

Összefoglalás

Munkánk során igyekeztünk egy olyan újszerű fém-polimer vállízületi implantátumrendszert megtervezni, mely a mai követelményeknek – minimál invazív technológia, nagyfokú modularitás - teljes mértékben megfelel, a lehető legnagyobb mértékben személyre szabott. Ugyanakkor legyártása nem haladja meg a jelenleg elérhető gyártástechnológiákat. Valamint a „Tailor-made”-konstrukció kialakításához szükséges adatok és paraméterek is könnyen hozzáférhetők, mivel olyan – az orvosi diagnosztikában széles körben elterjedt és mindennapos – berendezést választottunk, mely bármely kórházban elérhető. Továbbá törekedtünk arra, hogy rendszerünk minél könnyebben és a lehető leggyorsabban engedélyeztethető legyen, hiszen minden orvostechnikai eszköz forgalomba hozatala nehézkes, különös tekintettel igaz ez az implantátumokra. Törekedtünk a lehető legolcsóbb és leggazdaságosabb rendszer létrehozására, mindezeneken felül pedig igyekeztünk a beültetést végző specialisták bizalmát elnyerni, hiszen folyamatos konzultációval meglátásaikat és tapasztalataikat beépítettük konstrukciónkba.

Kulcsszavak: *vállimplantátum, minimal invasive technológia, modularitás, személyre szabott konstrukció, UHMWPE.*

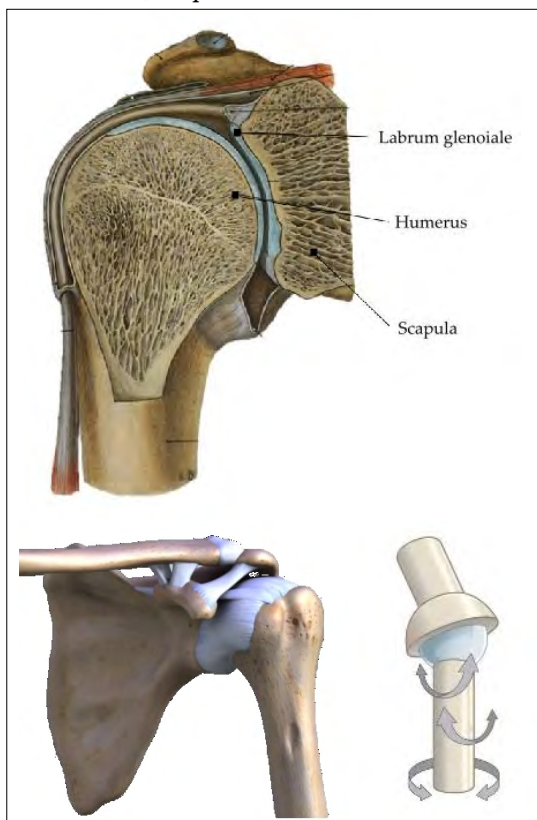
1. Bevezetés

Az emberi felső végtag, a kar, az ember állatvilágból történő kiemelkedésében rendkívüli fontosságú lehetett, hiszen ez tette lehetővé a céltu-

datos és hatékony eszközhasználatot. A kar finom mozgások, precíz munkafolyamatok kivitelezésére is tökéletesen alkalmas, ugyanakkor nagy erőfelfejtésre is képesek vagyunk általa.

A felső végtag a törzshöz a vállövi ízületek segítségével kapcsolódik – három vállövi ízületről beszélhetünk –, ezek biztosítják a váll mozgását. A teljes funkcióhoz nagyfokú mozgékonyaságra, de ugyanakkor stabilitásra is szükség van, melyek bámulatos kompaktsággal és kifinomultsággal párosulnak a vállízületben.

A vállízület rendkívül sérülékeny és bonyolult ízület. A súlyos fokú vállízületi elváltozások vállízületi endoprotézis-műtétet indokolhatnak, mely implantációs műtéti megoldás – a rendkívül elterjedt térd- és csípőízületi protézisműtétek mögött – ma már a harmadik leggyakrabban alkalmazott művi ízület típus. A műtét sikerrátája azonban a térd-, csípő-ízületpótlások mögött marad, sokkal többször jelentkeznek panaszok, kevésbé állítható vissza az eredeti szerkezet hihetetlen mozgásszabadsága, valamint rendszeres panasz a fájdalom a páciensek részéről. Gyakorta alakulnak ki kontraktúrák – az ízület mozgásszabadságának (sokszor fájdalmas) beszűkülése – továbbá az operációt követően jóval gyakrabban indokolt ismételt műtét, reoperáció.



1. ábra. Vállízület (articulatio humeri) – felül [1] – vállízületet körülölelő tok – alul balra [2]- és mérnöki modellje – alul jobb oldalon [3]

2. Szakirodalmi áttekintés

Felépítését és működését tekintve a vállízületet (Articulatio humeri) a gömb- vagy úgynevezett szabadízületek közé soroljuk, amelynek részei a lapocka (Scapula) és a karcsont (Humerus) feje. Mozgástartományát tekintve a legnagyobb mozgásterjedelmű és legbonyolultabb ízületünk [4]. Mérnöki szempontból egy három szabadságfokú csuklóval modellezhető – mely két tengely irányába képes elmozdulni és egy tengely mentén forogni [1]. A lapocka szélén körkörösén található rostporcos gyűrű (Labrum glenoidale) nagyobbítja és mélyíti az ízvpát, melynek felszíne az ízfejhez képest aránytalanul kicsi (1:6), ami jelentősen hozzájárul az ízület mozgásszabadságához, ugyanakkor komoly kihívást okoz mind az operációt végző sebészeknek, mind pedig a mérnököknek [4]. Hiszen a kis munkatér és a csekély teherviselő felület is komoly problémákat vet fel [1]. Az ízület tokja meglehetősen laza, de igen erős – erre azért van szükség –, mivel a szerkezet nem rendelkezik speciális, összetartó szalagkészülékkel, mint mondjuk a csípő- vagy a térdízület. Így ezt az ízesülésünket nem az ízületi tényezők, hanem a vállat küppalászerűen körülölelő izomköpeny – úgynevezett rotátorköpeny – tartja egyben. Ugyanis ennél a rendszernél a stabil szalagkészülék és kötött ízületi tok gátolná – a legnagyobb mozgásterjedelmű – ízületünk szabadságát, ehhez még – a mozgást elősegítendő – hozzájön a korábban már említett aránytalanul kicsi ízvpá [4]. Ebből a két tényezőtől fakad a rendszer – bámulatos kompaktsággal párosul – hihetetlen sérülékenysége. A fentiekben említettek mind részletesen szemügyre vehetők az 1. ábrán.

Az ízületek leggyakoribb betegségeit tekintve – mára szinte népbetegséggé vált – a különböző kopásos eredetű coxarthrosis, mely fájdalmas kontraktúrákhoz – mozgástartomány-szűkülés – és végül a szerkezet teljes funkcióvesztéséhez vezet. Nem szabad megfélemednünk a különböző traumákról – vállnál különösen gyakori – és dagasztos elváltozásokról sem, hiszen ezek is vezethetnek műtéti kezeléshez [5].

Rögzítés szempontjából kétféle protézistípust különböztetünk meg, lehetséges cementes és cement nélküli. Cementes esetben a csontcement (kétkomponensű polimetil-metakrilát – PMMA), mely a polimerizációt követően biztosítja a protézis csontágyban történő fixációját. A csontcement antibiotikummal keverhető, így helyileg, célzottan magas gyógyszer-koncentráció érhető el, mellyel megelőzhető vagy kezelhető a

gyulladások, fertőzések. Cement nélküli esetben a szerkezet a beültetés során ékhatással rögzül – ezt nevezzük primer stabilitásnak –, majd ezt kiegészítendő csontbenövés útján létrejön a másodlagos vagy biológiai stabilitás. A minél jobb oszteointegráció elősegítése érdekében a felületeket gyakran strukturálják, például fémszórással vagy cellás szerkezetekkel. Egy másik módszer a csontbenövés elősegítésére a különböző bevonatok alkalmazása, mint például a hidroxipatit [6, 7]. Nagy általánosságban elmondható, hogy a cementes rögzítést inkább idősebb pácienseken alkalmazzák, míg a fiatalkori implantációk során elsődlegesen cement nélküli rögzítésre törekednek. Ennek eldöntése azonban minden esetben individuális döntést igényel! [1] Ez azzal magyarázható, hogy a cementes rögzítés az operációt követően gyakorlatilag azonnal üzemképessé válik – hiszen nincs szükség csontosodásra –, míg cement nélküli esetben a teljes körű használat csak a – 4–6 hetes – csontosodás után kezdhető meg. Természetesen fiatalabb korban a szervezet csontépítő-képessége és csontminősége jobb, valamint hosszú távon ezek az implantátumok sikeresebbek, mint cementes társaik, valamint revíziós műtét esetén a ragasztott protézisek eltávolítása sokkal nagyobb csontvesztéssel jár, mely megnehezíti a további protetizálást. Fontos megjegyezni, hogy mind a két rögzítéstípus esetén fellép járulékos csontvesztés, ez rezekció esetén elkerülhetetlen.

A vállízületi implantátumokból megkülönböztetünk anatómiai és inverzt. A két megoldás között az a különbség, hogy az anatómiai – ahogyan azt a neve sugallja – felépítését tekintve a természetes váll szerkezetét követi, míg az inverz egy fordított rendszer. Tehát az inverz esetén nem a felkarcsonton található a művi ízületi fej, hanem a lapockán. Anatómiai rendszert általában akkor alkalmaznak, ha a vállat körülvevő izmok épek, sérülésük esetén inverzt implantálnak. Ennek az eldöntése is egy individuális kérdés, mint a rögzítés esetében [1, 8]. Viszont gyakran kerül sor csak azért revíziós műtetre, mert a páciens állapota már nem engedi meg az anatómiai rendszer alkalmazását – holott a szerkezet nem lazult ki, és nem is ment tönkre –, át kell térni inverzre. Ilyenkor az a bevett gyakorlat – néhány igen bonyolult és drága implantátumszettet leszámítva –, hogy a beültetett összes alkatrészt rezekálják.

Kurtz művében összefoglalta a legfőbb komplikációkat anatómiai kivitel esetére, melyből kiderül, hogy a leggyakoribb ok az úgynevezett glenoid vesztes – lapocka ízületi részének sérülése –,

majd ezt követi a kilazulás, ezután foglal helyet a sorban a rotátorköpeny-szakadás és végül az implantátum körüli csonttörés [7]. Elmondható, hogy általában a teljes rendszereket eltávolítják ezekben az esetekben a revíziós műtétek során, holott megfelelően moduláris implantátum esetén lehetőség lenne bizonyos alkatrészek megtartására, igaz ez azokra az esetekre is, amikor az implantátum futófelületei használnának el. Sajnos manapság ezek a rendszerek meglehetősen drágák és bonyolultak, engedélyeztetésük nehézkes. Továbbá azzal is számolnunk kell, hogy az orvostársadalom rendkívül konzervatív – szinte kizárólag a jól bevált kifarortt implantátumokat ültetik be –, emiatt egy teljesen új – a korábbiaktól gyökeresen különböző – rendszer kipróbálása és elfogadtatása gyakorlatilag lehetetlen. Senki nem vállalja a felelősséget és a rizikót egy „zöldmezős beruházásként” megtervezett szerkezet esetén.

Fontosnak tartottuk elemezni a már művi úton eltávolított implantátumok kopását, ezért vizsgálatainkhoz az úgynevezett Hood-féle tematikát alkalmaztuk, melyet térdprotézisek vápáihoz használtak eredetileg. Az UHMWPE kopásának vizsgálatánál a 80-as években megpróbálták a különféle felületi kopásokat – hibákat és eltéréseket – osztályozni, ezért az egyes protéziseken különféle számozott régiókat határoztak meg, majd fénymikroszkóp 10x-szeres nagyítása mellett vizsgálták az implantátumokat – Hood – [9].

7 felszíni károsodásformát különítettek el:

1. Pontkorrózió (pitting): A futófelületeken jelentkező 2–3 mm átmérőjű és 1–2 mm mély kráterek. A belőle keletkező anyagvesztés miatt felszabaduló kopástermékek oszteolízist (csontvesztést) okozhatnak;
2. mállékony törmelék (embedded debris): Okozhatja csontforgács, fémkomponens vagy bármilyen egyéb törmelék, kopástermék. Súlyos oszteolízist okoz, valamint károsítja mind a két dolgozófelületet;
3. karcolódás (scratching): Egydimenziós felületi károsodások – abrazív hibák közé tartozik – valószínűleg a fémfelzíneneken lévő mikroszkopikus egyenetlenségek, vagy a futófelületek közé került törmelékek okozzák;
4. rétegenkénti leválás (delamináció): Az egyik legsúlyosabb károsodási forma, általában azonnali revíziós műtétet igényel, a rendszer gyors, katasztrofális tönkremeneteléhez vezet;
5. felületi deformáció: Nem vezet anyagvesztéshez, ezáltal jelentősen eltér a többi károsodási formától

6. csiszolódás (Burnishing): Csiszolódás esetén a felület kifényesedik, viszont kopástermékek is keletkeznek, melyek oszteolitikus reakciókhoz vezethetnek;

7. ábrázó: A kontaktfelület morzsolódó kopása, igen gyakori jelenség.

A kopások osztályozása régiók és súlyosság szerint történik. A Hood-féle metodika szemikvantitatív, és lehetővé teszi az egyes protézistípusok között az összehasonlítást [7, 9].

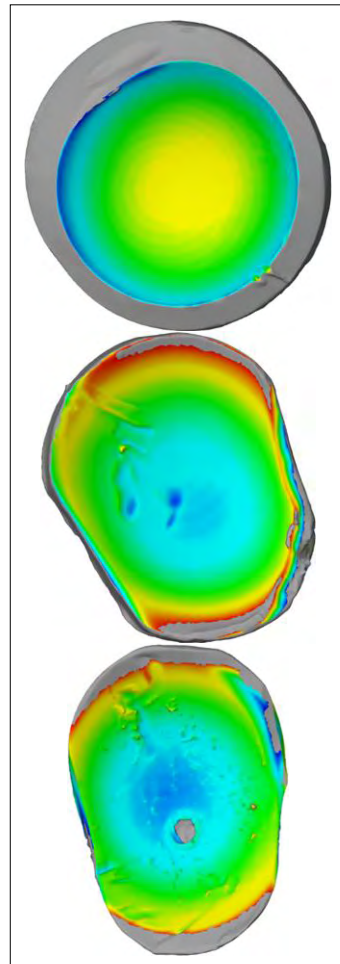
3. Vizsgálatok

Vizsgálataink során 3 vállimplantátumot vetünk részletesen szemügyre, melyhez GOM Atos Core 5M 3 dimenziós optikai mérőrendszert használtunk, a kiértékeléshez pedig egy programot, mely a szkener által generált pontfelhő és az alkatrészek CAD-modelljének eltéréseit a térkép szintvonalaihoz hasonlóan jeleníti meg. Így szemléletesen láthatóvá téve a kopást és a különböző deviációkat. Az ábrákon a meleg színek a viszonyítási felülettől pozitív irányba történő eltéréseket mutatják, ez annyit tesz, hogy a vizsgált felületelem túllóg a referencián. A hideg színek éppen ellenkező jelentéssel rendelkeznek, tehát az eltérés negatív irányú, mely azt jelenti, hogy a vizsgált felület a referenci felületen belül van. Minél erősebb egy szintípus, annál nagyobb a deviancia, a zöld szín jelenti a tökéletes illeszkedést.

A 2. ábrából megállapítható, hogy mindegyik mintának a széle és a futófelületek legalsó pontja károsodott, mivel ezeken a területeken figyelhető meg elszíneződés. Érdekes, hogy egy gyűrűszalag mentén az összes sértetlen, hiszen ott egy zöld sáv található, ami a tökéletes illeszkedésre utal. Az első implantátum esetében nem is annyira a gömbfelület széle, hanem inkább az alja károsodott – sárga terület –, és meleg szín révén a referencia-felszínhez képesti pozitív irányú eltérésről beszélünk, ami a maradó alakváltozás miatti deformációból adódik. A szélein is látható némi eltérés – anyagfogyás –, de az nem jelentős, viszont a másik két vápánál ez éppen fordítva van. Ezek külső pereme sérült jobban, néhol már-már annyira deformálódott, hogy az adott skálázás tartományát meghaladta – szürke régiók – és a belső területeikről fogyott anyag, ellentétben az inverz művi vápával. Ámbár a második és harmadik – anatómiai kivétel – implantátum futófelületeinek alján is több egyenetlenség található, mint az első esetében. Ugyanakkor elmondható, hogy az anatómiai vápák anyagvesztése és deformációi kisebbek voltak összességében, mint az inverzé.

Az érdekes jelenséget mutató, gyűrűs szerkezetű anyagvesztésre magyarázat lehet, hogy a vápák felülete meglehetősen kicsi, erre azért van szükség, hogy a mozgástartományt bővítsük. Így a felépítő terhelések is ezen csekély felszínen oszlanak meg, továbbá bizonyos helyzetekben az implantátum még akár billeghet is a fejen, talán ezért is sérült jobban a második és a harmadik minta széle.

A vápákat tovább vizsgálva, azok mindegyikének felszínén pitting (pontkorrózió), scratching (karcolódás), felületi deformálódás és néhol burnishing (csiszolódás) figyelhető meg. A pitting mértéke a harmadik mintánál a legjelentősebb, mivel ott néhány kráter már olyan mély, hogy a szkener ábráján is megfigyelhető. A második implantátumon is van néhány ezekből a mély



2. ábra. Vállprotézis vápák mérési eredményei (A két területeken kopás, míg a sárga és piros régiókban felgyűrűződés keletkezett, a zöld gyűrűnél ugyanakkor tökéletes volt az illeszkedés.)

gödrökből, de jelentősen kevesebb, viszont ezen pedig súlyos karcoldás figyelhető meg. Az első mintán is megfigyelhető pontkorrózió és karcoldás, viszont ennek mérete annyira kicsi, hogy a mérőrendszer képén nem látható, mint ahogyan a csiszolódás is csak szabad szemmel detektálható.

Az egyik vizsgált implantátum revíziójára azért volt szükség, mivel vápája kifordult a kosárból, és a fej mellett egy oldalsó helyzetet vett fel, miközben a fej a kosáron járva üzemelt tovább – fém a fémen érintkezéssel –, ezzel jelentős kopást generálva.

Megvizsgálva a kosár és a vápa kapcsolatát, egy viszonylag jelentős húzóerő szükséges a kizökkentéshez, ez indikálta megállapításunkat, mely szerint a vállprotézisekre üzem közben jelentős húzóerő hathat.

A fenti tézis viszonylag logikusnak tűnik, hiszen például, amikor a buszon kapaszkodunk, és a busz gyorsít, ennek hatására karunkra húzóerő hat. Továbbá az irodalomkutatásban is megtalálható, hogy a vállat csak a körülvevő izomkúp – rotátorköpeny – tartja össze, mely által rendkívül mozgékony ízület lesz.

Viszont áttekintve az irodalmat, a vápákat nagyrészt csak nyomásra vizsgálják, ezért gondoltuk azt, hogy húzó igénybevételre is biztosítani kellene őket. Továbbá konzultáltunk beültetést végző további orvos specialistaikkal, akik elmondásaiból kiderült, hogy a kiugrás – valamint a protézisre ható húzóerő – valós és megoldatlan problémát jelenthet.

4. Fejlesztés

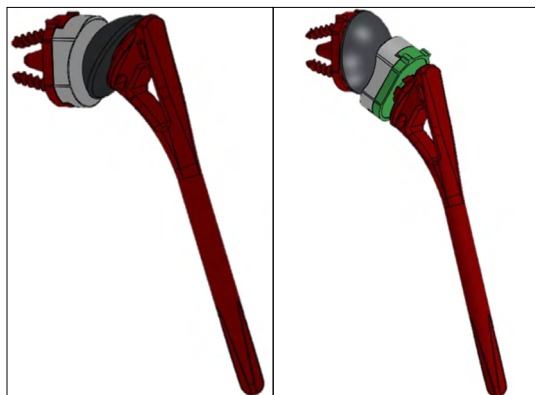
Rendelkezésünkre állt egy ma igen gyakran alkalmazott és jól beváltnak tekinthető modell – **3. ábra**, felső konstrukció –, mely anatómiai kialakítású, nem moduláris és pláne nem személyre szabott, továbbá húzó igénybevételre sincsen biztosítva – tehát belátható, hogy továbbfejlesztése indokolt. Azért választottunk anatómiai kialakítást, mivel a 3 dimenziós mérőrendszeres vizsgálatok alapján anyagvesztés és deformáció szempontjából ez tűnt kedvezőbbnek.

Modulárisnak nevezzük azokat az implantátumokat, ahol a revíziós műtét során – a már rögzült, becsontosodott – alkatrészek eltávolítására nincs szükség. Ez praktikusnak azt jelenti, hogy a művi fej és a vápa a többi alkatrésztől függetlenül cserélhető, tehát nincs szükség rezekción, így nincs járulékos csontvesztés. Jelenleg a piacon található ilyen rendszerek, rendkívül drágák és bonyolultak, így nem igazán elterjedtek, valamint

az eredményességük is igen csekély. Irodalomkutatásunk során nyilvánvalóvá vált, hogy a vállimplantátumok esetében meglehetősen szerény eredmények vannak az élettartamot tekintve, tehát viszonylag rövid az az időszak, melyben jól működik a rendszer. Ez azt jelenti, hogy gyakrabban kell revíziós műtéteket végezni.

Modularitás biztosításával az ilyen jellegű beavatkozásokat szeretnénk megkönnyíteni, mivel így nem szükséges a felkarba beépített szárát, illetve a lapockacsontba becsavart tálcat eltávolítani – a **3. ábrán** pirossal kiemelt alkatrészek eltávolítása nem szükséges. Így ez kisebb terhet jelent a szervezetre is – minimal invasive technológia –, mert kisebb a beavatkozás mértéke –, nincs járulékos csontvesztés – ráadásul a lerövidült műtéti időnek köszönhetően a fertőzésveszély és a komplikációk fellépésének esélye is lecsökken. Az általunk végzett továbbfejlesztés hasznos olyan esetekben is, amikor a beteg izomzata tovább sérül, így már a bent levő protézis nem tudná ellátni a feladatát, hiszen az anatómiai implantátumokat a vállat körülölelő izomzat tartja a helyes pozícióban. Modularitás esetén – az ilyen indikációból végrehajtott revíziós műtéteknél – elegendő megcserélni a két komponenst, hiszen az inverz implantátumok megfelelő stabilitást biztosítanak ezekben az esetekben is.

A felvázolt modularitás eléréséhez a rendszer egyetlen alkotóeleme szorult változtatásra, ami pedig a lapockacsontba kerülő tálca, mivel ezen ki kellett alakítani egy foglalatot, melybe – inverz esetben – a művi fej helyet foglalhat. Továbbá a túloldalra nem kerülhet önmagában a vápa – bárminemű alátámasztás nélkül –, mivel a teherátadás közben a fokozott igénybevételnek, illetve az eltérő anyagpárosításnak köszönhetően a szer-



3. ábra. Az eredeti – anatómiai – protézis modellje és az átalakított – inverz – konstrukció

kezetünk rendkívül gyors tönkremeneteléhez vezetne ez a megoldás. Így inverz kialakítás esetén szükségeltetik egy tálca a vápa alá, az ábrán zölddel kiemelve. A vápa tálcáját az ellenoldali mintájára alkottuk, hogy minél egyszerűbb és olcsóbb legyen a gyártása.

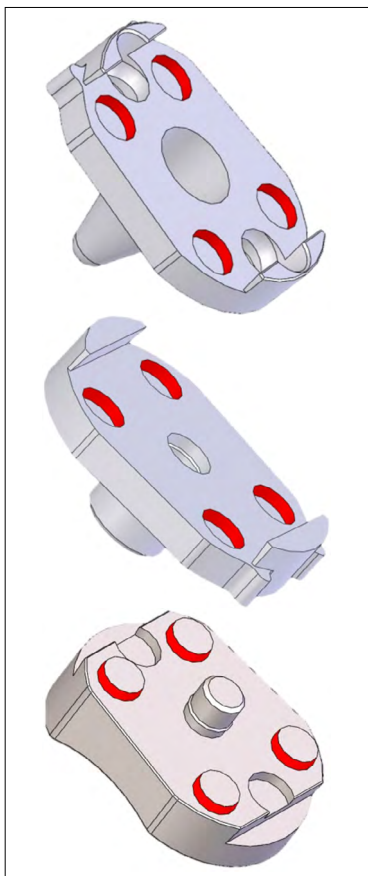
A húzó igénybevételekre történő biztosítást morse-kúppal oldottuk meg – az ábrán pirossal kiemelve – ezen megoldás megtalálása nem volt egyszerű, hiszen a nagyfokú modularitáshoz szükséges az igény szerinti oldhatóság. Ugyanakkor a megfelelő stabilitás és alátámasztás biztosításához elengedhetetlen fix kötés. Mindezek felett a rendszer kompaktsága és kis mérete is komoly problémát okozott. A 4. ábrán megfigyelhető a lapockában lévő tálcára került furat – az alkatrész közepén –, melybe inverz esetben a fej rögzíthető.

Végül pedig elvégeztük az implantátum személyre szabását, melyhez rendelkezésünkre álltak cadaver csontok CT-felvételei, melyekből

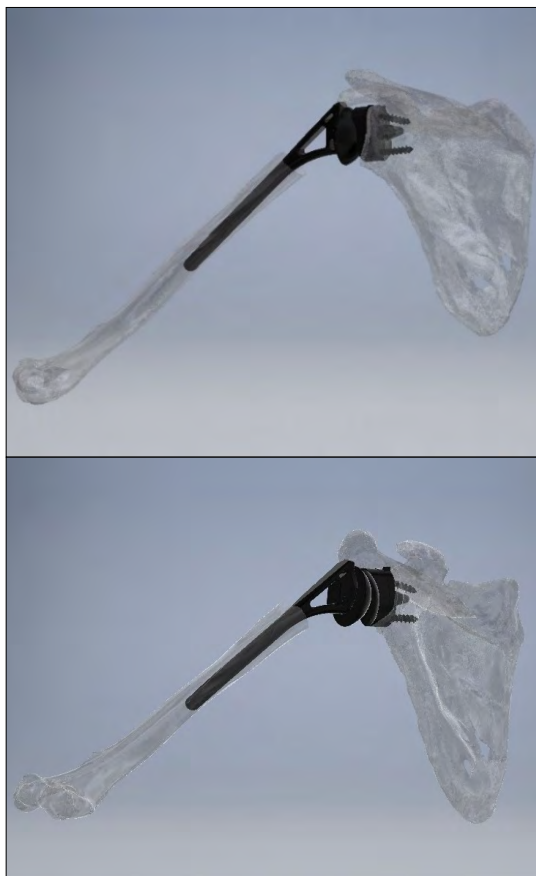
CAD-modellt készítettünk. Ezek alapján elvégeztük a „Tailor made”-konstrukció létrehozását, mely során összegyűjtöttük a módosítandó paramétereket, végül pedig a kész rendszert anatómiai környezetébe illesztve, CAD-programon belül teszteltük. Vizsgáltuk az ütközésmentességet, illeszkedést és a mozgásszabadságot (5. ábra). A módosítandó paraméterek:

- szárhossz;
- száralak (elsősorban vastagság);
- tálcán a befogások szöge;
- tálca felfekvőfelület-alakja;
- fejbefogás szöge.

Itt szeretnénk megjegyezni, hogy az emberek közötti nagyfokú különbségek és variációk miatt azt javasoljuk, hogy a minél jobb integráció miatt az implantátumot az egyén ép ízületéhez állítsák, és ne a tankönyvekben meghatározott – normálisnak ítélt – pozíciókhoz, amennyiben ez lehetséges.



4. ábra. A lapockában lévő tálca, az inverz esetben a száron lévő tálca és a vápa



5. ábra. Anatómiai környezetbe helyezett implantátum

5. Összefoglalás

Vizsgálataink során egy már jól bevált és használt implantátumot módosítottunk. Azért választottuk ezt, mert így a forgalomba hozatal, tesztelés, engedélyeztetés, továbbá elterjedés egyszerűbb, gyorsabb és olcsóbb – a felgyűlt tapasztalatok, valamint bizalom miatt –, továbbá ez alapján bármely hasonló rendszer is alkalmazható a modern kritériumoknak. Így szeretnénk elérni a moduláris rendszerek minél szélesebb körben történő elterjedését, valamint a „Tailor made”-konstrukciók minél populárisabb alkalmazását. Éppen ezért gyűjtöttük össze a személyre szabáshoz szükséges paramétereket, melyeknek a módosítása CT-felvétel alapján – mely az orvosi diagnosztikai gyakorlatban teljesen bevett eljárás – könnyedén elvégezhető az általunk kialakított implantátumon, továbbá még akár bármely más hasonló rendszeren is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az NKFIH alap Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Programja (BME FIKP-BIO) és a Nemzeti Bionikai Program támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vízkelety T.: *Az ortopédia tankönyve*. Semmelweis Kiadó, Budapest (1999).
- [2] Shoulder Joint – Glenohumeral Joint – 3D Anatomy Tutorial (2019.10.23.)
<https://www.youtube.com/watch?v=vG1XQkj3Yx0>
- [3] Anatomy and Physiology, BCcampus
<https://opentextbc.ca/anatomyandphysiology/chapter/9-1-classification-of-joints/>
- [4] Szentágothai J.: *Functional Anatomy – Az ember anatómiája, fejlődéstana, szövettana és tájékozódási anatómiája*. I. kötet. Medicina Kiadó, Budapest, 1975.
- [5] Glauber A.: *Az ortopédia tankönyve*. Medicina Kiadó, Budapest, 1978.
- [6] Sanchez-Sotelo J.: *Total Shoulder Arthroplasty*. Open Orthopedics Journal, 5. (2011) 106–114.
- [7] Kurtz S. M.: *UHMWPE Biomaterials Handbook*. Elsevier, Oxford (2016).
- [8] Neer C. S., Watson K. C., Stanton F. J.: *Recent Experience in Total Shoulder Replacement*. Journal of Bone and Joint Surgery, 64. (1982) 319–337.
- [9] Hood R. W., Wright T. M., Burstein A. H.: *Retrieval Analysis of Total Knee Prostheses: A Method and Its Application to 48 Total Condylar Prostheses*. Journal of Biomedical Materials Research, 17. (1983).