



FOGPÓTLÁSOK NAGY PONTOSSÁGÚ MODELLEZÉSE ÉS SZILÁRDSÁGTANI ANALÍZISE

HIGH PRECISION MODELLING AND STRENGTH ANALYSIS OF TOOTH IMPLANTS

Papp Klaudia,¹ Piros István Attila,¹ Deák Bálint²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, papp.klaudia@nje.hu

² Szegedi Tudományegyetem, Fogorvostudományi Kar. Szeged, Magyarország, deakbalint7@gmail.com

Abstract

The design and mechanical analysis of patient-specific dental prostheses play a crucial role in modern dentistry and biomechanical research. With the advancement of digital design and simulation tools, it has become possible to create customized dental prostheses tailored to individual patients, ensuring not only anatomical compatibility but also optimal mechanical stability.

In our study, we present the design and finite element analysis of a bridge-type dental prosthesis, which was created based on the reconstruction of a real mandible. Our goal was to examine the behavior of the dental prosthesis and mandible under load, with a particular focus on stress distribution and deformations.

Keywords: Tooth implants, NURBS modeling, Finite element analysis, von Mises stress distribution.

Összefoglalás

A betegspecifikus fogpótlások tervezése és mechanikai vizsgálata kulcsfontosságú a modern fogászatban és biomechanikai kutatásokban. A digitális tervezési és szimulációs eszközök fejlődésével lehetőség nyílik arra, hogy egyedi páciensek számára optimalizált fogpótlásokat hozzunk létre, amelyek nemcsak anatómiailag illeszkednek, hanem mechanikai szempontból is megfelelő stabilitást biztosítanak.

Tanulmányunkban egy hídtípusú fogpótlás tervezését és végeselemes analízisét mutatjuk be, amelyet egy valódi állkapocs rekonstrukciójára alapozva készítettünk el. A célunk az volt, hogy megvizsgáljuk a fogpótlás és az állkapocs terhelés alatti viselkedését, különös tekintettel a feszültségeloszlásra és a deformációkra.

Kulcsszavak: fogpótlás, NURBS-modellezés, végeselem-analízis, Von Mises-feszültségeloszlás.

1. A fogak és az alsó állkapocs rekonstrukciója

Kutatásunk célja egy nagy pontosságú, részletes geometriai rekonstrukció létrehozása volt az alsó állkapocsról és a fogakról, CT-felvételek alapján. Az elkészült modell alapot szolgáltatott további biomechanikai és szilárdságtani vizsgálatokhoz, amelyek segítenek a fogpótlások optimális kialakításában, valamint a fog-állkapocs rendszer mechanikai viselkedésének pontosabb megértésében. Első lépésként az állkapocs rekonstrukcióját végeztük el. Ehhez a CT-felvételeket három fő síkban – axiális, szagittális és kortikális – készített metszetek segítségével szegmentáltuk a 3D Slicer programban [1]. Ez a folyamat lehetővé tette a csontos és lágy szövetek hatékonyabb elkülönítését, amely elősegítette a pontosabb modellezést [2]. A szegmentált metszeteket ezt követően a PTC Creo 11 tervezőszoftverbe importáltuk, ahol a rekonstrukció során NURBS-görbéket hoztunk létre, majd ezekre NURBS felületeket feszítettünk. Külön figyelmet fordítottunk arra, hogy a görbék tangenciálisan érintkezzenek egymással, valamint arra, hogy a felületek száma a lehető legkevesebb legyen, hiszen a túlzottan bonyolult geometria megnehezítheti a későbbi szimulációs vizsgálatokat [3]. Az alsó állkapocs rekonstrukcióját követően annak szerkezetét két rétegre bontottuk: spongiosa és kortikális csontállományra, hogy jobban modellezni tudjuk az eltérő mechanikai tulajdonságaikat [4].

A következő lépésben a fogak rekonstrukcióját végeztük el, hasonló elvek alapján, mint az állkapocs esetében. Egyenként modelleztük vissza a fogakat a CT-felvételek alapján, kezdetben tömör szerkezetként. Elsődleges célunk ebben a fázisban a fogak pontos geometriai visszaállítása volt, valamint azoknak a hibáknak és pontatlanságoknak a korrigálása, amelyek a nyers CT-adatokban előfordulhattak. Ezek közé tartoztak például az indokolatlan üregek, kisebb topológiai egyenetlenségek vagy a zajos felületek [5]. Ebben a kezdeti állapotban a fogakat még nem bontottuk rétegekre, mivel először a külső alakjuk pontos visszaállítására fókuszáltunk.

Az elkészült, visszamodellezett alsó állkapocs az 1. ábrán látható.

A teljes modell létrehozása lehetőséget biztosított arra, hogy későbbi biomechanikai és szilárdságtani vizsgálatokkal elemezzük a fog-állkapocs rendszer mechanikai terhelhetőségét, valamint a fogpótlások és implantátumok viselkedését különböző terhelési körülmények között. Az alkalmazott rekonstrukciós módszerek biztosították a modell nagy felbontását és sima topológiáját, amelyek elengedhetetlenek a precíz szimulációs vizsgálatokhoz és az orvosi alkalmazásokhoz.

2. Fogpótlás tervezése és modellezése

2.1. Fogpótlás nagy pontosságú modellezése

Kutatásunk során az alsó állkapocs és a fogak precíz visszamodellezését követően célunk egy betegspecifikus fogpótlás létrehozása volt, amely pontosan illeszkedik az eredeti anatómiai struktúrához. Az elkészült fogpótlás egy hídtípusú restauráció, amelyet két lecsiszolt fogra terveztünk. A híd ragasztással kapcsolódik a lecsiszolt fogakra. Ez a megoldás rögzített fogpótlásnak minősül, amely hídként orvosolja a foghiányt, valamint tartós, funkcionálisan terhelhető pótlást biztosít a páciens számára. A meglévő fogakra tervezett híd a **2. ábrá**n látható.

A híd geometriáját az eredeti fogak felületeitől geometriai eltolással hoztuk létre, ezáltal biztosít-



1. ábra. A CT-felvételek alapján visszamodellezett alsó állkapocs



2. ábra. A hídtípusú fogpótlás



3. ábra. A fogpótlás illeszkedése és kapcsolódása a lecsiszolt fogakkal

va a fogpótlás megfelelő illeszkedését a lecsiszolt fogak felszínére [6].

Az elkészült fogpótlás illeszkedése a lecsiszolt fogakra a **3. ábrá**n látható.

A képen a rózsaszínnel jelölt terület az állkapocs spongiosa-rétege, amely a fogak tartószerkezetének részét képezi, valamint a két lecsiszolt fog, amelyekre a híd támaszkodik. Ezen részek egymással kötött módon kapcsolódnak egymáshoz, ezzel megakadályozva az elmozdulást [7]. A fogpótlás geometriája pontosan követi a páciens egyéni anatómiai adottságait, hogy biztosítsa a megfelelő illeszkedést és stabilitást. A híd szerkezeti kialakítása olyan módon történt, hogy a rágóerők megfelelően oszoljanak el a pillérfogakon, minimalizálva a túlterhelés kockázatát.

Az így létrehozott hídtípusú fogpótlás lehetőséget biztosít a további mechanikai elemzésekre, amelyek segíthetnek optimalizálni a végleges kialakítást, és elősegíthetik a klinikai alkalmazásra való felkészítést.

2.2. A fogpótlás szilárdságtani analízise

A betegspecifikus, hídtípusú fogpótlás tervezését követően szilárdságtani elemzést végeztünk a PTC Creo 11 szoftverben, az integrált Ansys szimulációs modul segítségével. Célunk az volt, hogy megvizsgáljuk a fogpótlás mechanikai viselkedését és ellenálló képességét egy statikus terhelési környezetben.

A végeselemes analízis során az alábbi peremfeltételeket és terheléseket alkalmaztuk:

- Peremfeltételek: Az állkapocs ízületi, és koronanyúlványát rögzítettük, hogy a fogpótlás terhelési viselkedését valósághű körülmények között vizsgálhassuk, ezenkívül, mivel a szimulációk gyorsabb lefuttatása érdekében csak a féloldali alsó állkapcsot vizsgáltuk, az állnál, ahol elvágtuk ezt az alsó állkapcsot, megadtunk még egy szimmetriafeltételt is, ezáltal csak az elvágott felület tengelyén engedett meg az elmozdulás.
- Terhelés: A híd középső fogának rágófelületére 100 N nagyságú, függőleges irányú statikus erőt alkalmaztunk, amely egy átlagos rágóerőnek felel meg [8].

A felvett peremfeltételek és terhelések a 4. ábrán láthatók.

A fogpótlás modellezése során ügyeltünk arra, hogy a rágófelületek külön, jól elhatárolt felületként legyenek definiálva [9]. Ahogy az 5. ábra is mutatja, ez lehetővé tette a terhelés pontos kijelölését és a fogpótlás tényleges mechanikai igénybevételének precíz meghatározását.

A szilárdságtani analízis elvégzése előtt az egész modellt végeselemes hálózással láttuk el, hogy biztosítsuk a numerikus számítások pontosságát [10]. Ez a hálózás látható a 6. ábrán.

A hálózás során tetraéderes végeselemhálót alkalmaztunk, amely különösen alkalmas a bonyolult, szerves geometriák pontos leképezésére, mint amilyen az állkapocs és a fogpótlás alakja is [11].

A tetraéderes hálózás az állkapocs és a fogpótlás ívelt, összetett formájához kiválóan illeszkedik, mivel a tetraéderes elemek hatékonyabban töltik



4. ábra. Terhelések és peremfeltételek



5. ábra. A terhelés felvétele a rágófelületre



6. ábra. Hálózás az állkapcson

ki a rendelkezésre álló térfogatot, mint a hagyományos hexaéderes elemek. Egy másik jelentős előnye, hogy automatikusan generálható, így kevesebb manuális beavatkozást igényel, ami gyorsabbá és egyszerűbbé teszi az alkalmazását az organikus formájú modellek esetében. Emellett a pontos feszültségeloszlási eredmények elérése érdekében lehetőség van az elemméret változtatására, így a kritikus területeken sűrűbb háló hozható létre, ami javítja az analízis pontosságát és megbízhatóságát. A tetraéderes elemek képesek kezelni az összetettebb peremfeltételeket és terhelési helyzeteket, ami a fogpótlás modellezése során különösen fontos szempont volt. A hálózás elkészítésével biztosítottuk, hogy az állkapocs, a fogpótlás és a rögzített fogak megfelelő felbontásban jelenjenek meg a végeselemes analízis során, így pontosabb és részletesebb eredményeket kaptunk a terhelési viselkedésükről.

A végeselemes szimulációk során elsőként a teljes deformációt vizsgáltuk, amely megmutatta, hogy a statikus terhelés hatására a modell egyes részei milyen mértékben mozdulnak el az eredeti helyzetükhöz képest. Az eredmények a 7. ábrán láthatók, amelyek alapján a legnagyobb deformáció az állkapocs alsó részén, az állcsúcson jelentkezett, ahol a maximális elmozdulás 0,1706 mm volt.

Ez az eredmény arra utal, hogy az állkapocs az alkalmazott 100 N-os rágóterhelés hatására minimális mértékben rugalmasan deformálódik, ami természetes jelenség. Az állkapocs alsó részén bekövetkező nagyobb elmozdulás azzal magyarázható, hogy ez a terület a legtávolabb helyezkedik el az egyik rögzített peremfeltételtől (állkapocsízület- és koronanyúlvány), így nagyobb szabadságfokkal képes elmozdulni [12].

A végeselemes szimuláció következő lépéseként Von Mises-feszültségvizsgálatot végeztünk, amely a fogpótlás és az állkapocs anyagában kialakuló feszültségeloszlást elemezte a statikus terhelés hatására. A feszültségvizsgálat eredménye a **8. ábrá**n látható.

Az állkapocs esetében a legnagyobb feszültség a ramus-régióban keletkezett, ahol a maximális érték meghaladta a 10 MPa-t. Ez az eredmény összhangban van azzal, hogy a rágóerő hatására a ramus a terhelés átvitelében kulcsszerepet játszik, így ezen a területen koncentrálódik a legnagyobb mechanikai igénybevétel [13].

A fogpótlás esetében a legnagyobb feszültség a hidat alkotó szerkezeten jelentkezett, amely a két csiszolt fog között helyezkedik el. Itt a feszültség elérte a 33,9 MPa-t, ami azt jelzi, hogy a fogpótlás ezen része kiemelten terhelt zóna. Ez az érték azért is jelentős, mert a hidak fő terhelési pontja a középső rész, ahol a rágóerő hatására hajlító- és nyírófeszültségek keletkeznek [13].

A hídon ébredő csúcsfeszültségek a 9. és 10. ábrákon láthatók.

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy mind az állkapocs, mind a fogpótlás szerkezete megfelelő mechanikai ellenállást mutat, hiszen az ébredő feszültségek a várható tartományon belül maradnak [14]. További finomhangolásként a fogpótlás geometriájának optimalizálása segíthet a feszültségcsúcsok csökkentésében és az erőhatások egyenletesebb eloszlásában.



7. ábra. Teljes deformáció



8. ábra. Von Mises-feszültségvizsgálat



9. ábra. Csúcsfeszültség a hídon felülnézetben



10. ábra. Csúcsfeszültség a hídon alulnézetben

3. Következtetések

Kutatásunk célja egy betegspecifikus fogpótlás tervezése és mechanikai vizsgálata volt, amelyet egy valódi állkapocs geometriai rekonstrukciója alapján készítettünk el. A tervezett fogpótlás egy hídtípusú restauráció, amelyet két lecsiszolt fogra illesztettünk. A teljes modell létrehozása és a szimulációs vizsgálatok elvégzése a PTC Creo 11 szoftverben történt, az Ansys végeselemes moduljának segítségével.

A szimulációs folyamat során első lépésként a teljes szerkezetet tetraéderes, végeselemes hálózattal láttuk el, amely a komplex geometria pontosabb lekövetésére kiválóan alkalmas. Ezt követően mechanikai analíziseket végeztünk, amelyek során az állkapocs ízületi és koronanyúlványát peremfeltételként, valamint az állcsontnál elvágott felületen szimmetriafeltételként kezeltük, míg a fogpótlás terhelését egy 100 N nagyságú, függőleges irányú statikus erővel modelleztük, amelyet a híd középső fogának rágófelületére helyeztünk.

Az eredmények alapján a teljes deformáció legnagyobb értéke 0,1706 mm volt, amely az állkapocs alsó részén, az állnál jelentkezett. A feszültségeloszlás vizsgálatakor a legnagyobb Von Mises-feszültség az állkapocs ramus-részén alakult ki, meghaladva a 10 MPa értéket. A fogpótlás esetében a legterheltebb zóna a híd középső szakasza volt, ahol a feszültség 33,9 MPa-ra emelkedett.

A kapott eredmények segítenek a fogpótlás mechanikai viselkedésének megértésében, és iránymutatást adnak a további optimalizálás lehetőségeire, például a szerkezeti geometriák módosításával a feszültségcsúcsok csökkentése érdekében.

Szakirodalmi hivatkozások

 Wang C.-S., Lin M.-C., Wang C.-C., Chen C.-F., Hsieh J.-C.: Feature Reconstruction for 3D Medical Images Processing. In: Gao J.X., Xu D., Sun X., Wu Y. (eds.) Proceedings of the 2013 6th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2013), Vol. 1 and 2, 69–74. IEEE, New York (2013).

```
https://doi.org/10.1109/BMEI.2013.6746909
```

[2] Nguyen, V.S., Tran, M.H., Le, S.T.: Visualization of Medical Images Data Based on Geometric Modeling. In: Dang, T.K., Kng, J., Ta-kizawa, M., Bui, S.H. (eds.) Future Data and Security Engineering. Lecture Notes in Computer Science, pp. 560–576. Springer, Cham (2019).

https://doi.org/10.1007/978-3-030-35653-8 36

- [3] Aubin, C.-., Dansereau, J., Parent, F., Labelle, H., Guise, J.A.: Morphometric Evaluations of Personalised 3D Reconstructions and Geometric Models of the Human Spine. Medical and Biological Engineering and Computing, 35/6. (1997) 611–618. https://doi.org/10.1007/BF02510968
- [4] AlZubi, S., Jararweh, Y., Al-Zoubi, H., Elbes, M., Kanan, T., Gupta, B.: Multiorientation Geometric Medical Volumes Segmentation Using 3D Multi-

resolution Analysis. Multimedia Tools and Applications, 78/17. 24223–24248 (2019) https://doi.org/10.1007/s11042-018-7003-4

- [5] He, J., Chen, S., Zhang, H., Tao, X., Lin, W., Zhang, S., Zeng, D., Ma, J.: Downsampled Imaging Geometric Modeling for Accurate CT Reconstruction via Deep Learning. IEEE Transactions on Medical Imaging, 40/11. (2021) 2976–2985 https://doi.org/10.1109/TMI.2021.3074783
- [6] Liu, C.-C., Hsu, C.-H., Hsiao, I.-T., Lin, K.M.: Effect of Geometric Models on Convergence Rate in Iterative PET Image Reconstructions. Journal of Instrumentation, 4(05), 05010 (2009) https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/05/P05010
- [7] Garrido, A.H., Cerra, P.P., Zapico, A.O., Lopez, M.D.G.: Geometric Data Collection in Medical Imaging. DYNA, 86/2. (2011) 222–231. https://doi.org/10.6036/3868
- [8] Pemmada, R., Telang, V.S., Tandon, P., Thomas, V.: Patient-Specific Mechanical Analysis of PCL Periodontal Membrane: Modeling and Simulation. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 151. (2024) 106397 https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106397
- [9] Franchini, S., Gentile, A., Vassallo, G., Vitabile, S.: Implementation and Evaluation of Medical Imaging Techniques Based on Conformal Geometric Algebra. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 30/3. (2020) 415– 433.
- [10] Abdel-Aziz, H.S., Zanaty, E.A., Ali, H.A., Saad, M.K.: Generating Bezier Curves for Medical Image Reconstruction. Results in Physics, 23. (2021) 103996

https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.103996

[11] Majeed, A., Mt Piah, A.R., Rafique, M., Ab-dullah, J.Y., Rajion, Z.A.: NURBS Curves with the Application of Multiple Bones Fracture Reconstruction. Applied Mathematics and Computation, 315. (2017) 70–84.

https://doi.org/10.1016/j.amc. 2017.05.061

[12] Lv, X., Fu, D.: Research on Rapid Imitation of Human Tibia and Five-Axis CNC Machining Based on Computer-aided. Journal of Physics: Conference Series, 1648(3), 032130 (2020) https://doi.org/10.1088/17426596/1648/3/032130

[13] Yao, Q., Zhuang, Y., Aji, Y., Zhang, Q., Luo, Y., Li, S.: Biomechanical Impact of Different Isthmus Positions in Mandibular First Molar Root Canals: a Finite Element Analysis. Clinical Oral Investigations, 28/6. (2024) 311

https://doi.org/10.1007/s00784-024-05715-1

[14] Demir, O., Uslan, I., Buyuk, M., Salamci, M.U.: Development and Validation of a Digital Twin of the Human Lower Jaw under Impact Loading by Using Non-Linear Finite Element Analyses. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 148, (2023) 106207.

https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106207