

ALSÓ ÁLLKAPCSI HÍDPÓTLÁS STATIKUS TERHELÉSI VIZSGÁLATA ÉS NUMERIKUS SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

STATIC LOAD TESTING OF MANDIBULAR BRIDGE REPLACEMENT AND COMPARISON OF NUMERICAL SIMULATION METHODS

Papp Klaudia⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁷⁵⁰⁵⁻⁶⁹⁴⁴ ^{1*}, Dr. habil. Piros István Attila⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁰⁸²⁹⁻⁸⁰⁶² ²

¹ Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

² Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.013>

Kulcsszavak:

Hídpótlás
Biomechanikai szimuláció
Végeselemes szimuláció (FEA)
Hálóérzékenység

Keywords:

Dental bridge
Biomechanical simulation
Finite element analysis (FEA)
Mesh sensitivity

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 25.
Átdolgozva 2026. február 13.
Elfogadva 2026. február 25.

Összefoglalás

A kutatás célja egy alsó állkapocsra illesztett hídpótlás biomechanikai viselkedésének vizsgálata volt két végeselemes környezetben: a PTC Creo 11 Ansys Simulate és az Ansys 2024 R2 rendszerben. Azonos feltételek mellett a deformációk gyakorlatilag megegyeztek, míg a maximális feszültségekben kisebb eltérések jelentkeztek. A hálóérzékenységi vizsgálatok mindkét rendszer numerikus stabilitását igazolták. Összességében a Creo gyors koncepcionális elemzésekhez, az Ansys 2024 R2 pedig nagy pontosságú kutatási szimulációkhoz bizonyult alkalmasabbnak.

Abstract

The aim of this research was to analyze the biomechanical behavior of a mandibular three-unit dental bridge in two finite element environments: PTC Creo 11 Ansys Simulate and Ansys 2024 R2. Under identical conditions, displacement results were nearly identical, while the maximum stress values showed moderate differences. Mesh sensitivity tests confirmed numerical stability in both systems. Overall, Creo is suitable for rapid conceptual analyses, whereas Ansys 2024 R2 provides the accuracy and flexibility required for high-level research simulations.

1. Bevezetés

A biomechanikai rendszerek numerikus vizsgálata napjainkban kiemelt szerepet tölt be az orvostechikai eszközök és fogpótlások fejlesztésében. A számítógépes modellezés és a végeselemes analízis (FEA) lehetővé teszi az implantátumok és fogászati pótlások mechanikai viselkedésének vizsgálatát valósághű terhelési körülmények között, fizikai prototípus készítése nélkül. Ez különösen fontos az egyénre szabott megoldások tervezésében, ahol a páciens-specifikus anatómiai modellek elemzése elengedhetetlen.

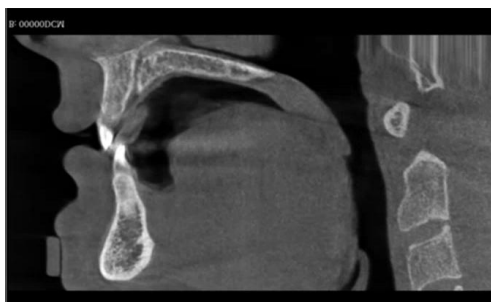
* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: papp.klaudia@nje.hu

Jelen kutatás célja egy alsó állkapcszon elhelyezkedő, híd típusú fogpótlás statikus mechanikai vizsgálata egy valós CT-felvétel alapján készített 3D-modell felhasználásával. A pótlás a jobb oldali 4., 5. és 6. fogak helyére készült, mechanikai viselkedését pedig két különböző végelelemes környezetben hasonlítjuk össze: a PTC Creo 11 integrált Ansys Simulate moduljában és a különálló Ansys 2024 R2 szoftverben.

A kutatás fő célja a két rendszer eredményeinek és modellezési lehetőségeinek összevetése, különös tekintettel a feszültségeloszlásra, elmozdulási értékekre, hálózási megoldásokra és a szimulációs beállítások testreszabhatóságára. A vizsgálat bemutatja a modellezési folyamat fő lépéseit, a terhelési és peremfeltételeket, majd az összehasonlítást követően következtetéseket von le az alkalmazhatóság, pontosság és kutatási célra való alkalmasság szempontjából.

2. A vizsgált biomechanikai modell bemutatása

A numerikus szimulációkhoz egy valós CT-felvételek alapján rekonstruált alsó állkapocs és fogazat 3D-s szilárdtest-modell szolgált alapul (1. ábra). A reverse engineering eljárással előállított geometria nagy pontossággal írja le az anatómiai struktúrákat, és lehetővé teszi az eltérő anyagtulajdonságok régiókénti hozzárendelését [4]. A rekonstrukció során kiemelt figyelmet kapott a fogak és az állkapocs közötti kapcsolódás geometriai megfelelése, különösen a foggyökerek környezetében, mivel ez alapvetően befolyásolja a biomechanikai szimulációk pontosságát [1].



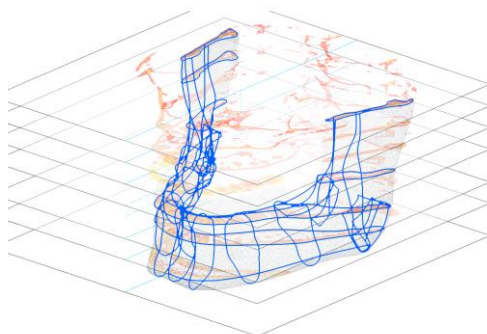
1. ábra. Az állkapocs szagittális metszete a CT felvételen

A jelen kutatásban a modellhez egy, a jobb oldali 4., 5. és 6. fogak helyére tervezett híd típusú fogpótlás került illesztésre. A pótlás beépítésével egy komplex biomechanikai rendszer jött létre, amely alkalmas a feszültség- és elmozduláseloszlások vizsgálatára statikus terhelés mellett.

A vizsgálat célja a fogpótlás viselkedésének elemzése egy 100 N nagyságú statikus terhelés hatására, valamint a PTC Creo 11 integrált Ansys Simulate modulja és az önálló Ansys 2024 R2 végelelemes szoftver által szolgáltatott eredmények összehasonlítása. Az összevetés lehetőséget ad a két numerikus környezet közötti eltérések bemutatására a modellezés és a számítási beállítások szintjén [3].

2.1. Az alsó állkapocsmodell felépítése

A modell alapját a Szegedi Tudományegyetem Fogorvostudományi Karán, Gendex GXDP-800 rendszerrel készült valós CT-felvételek adták. A DICOM formátumú adatokat a 3D Slicer szoftverrel dolgoztuk fel, ahol a zajsökkentés és kontrasztjavítás biztosította a csont- és fogstruktúrák pontos elkülönítését. A szegmentálást követően a voxeladatokból háromszöghálós felületmodell (STL) készült, amelyet a PTC Creo 11 CAD-rendszerben alakítottuk át sima, NURBS-alapú, paraméterezhető felületmodellekké (2. ábra).



2. ábra. Axialis CT metszetek illeszkedése a görbékkel leírt állkapcsan

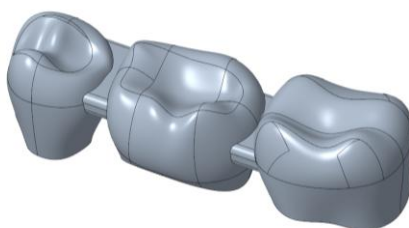
A rekonstrukció során elkülönítettük a kortikális és spongiosa csontállományt, valamint a fogak fő szövettani rétegeit (zománc, dentin, cementum), hogy a későbbi szimulációkhoz anyagtulajdonságok régiónkénti hozzárendelése is biztosított legyen [5] (3. ábra). A végső, topológiailag zárt térfogati modell közvetlenül alkalmas végeselemes hálózásra, és ez szolgál a statikus terhelési vizsgálatok alapjául mindkét numerikus környezetben.



3. ábra. A spongiosa állomány elhelyezkedése a kortikális rétegben

2.2. A fogpótlás kialakítása

A jobb oldali 4., 5. és 6. fogak helyére egy híd típusú fogpótlás került kialakításra, amely a 4. és 6. pillérfogakra támaszkodik, a hiányzó 5. fogat pedig a középső hídelem pótolja. A pótlás geometriája a preparált fogfelszínekhez igazodva készült, biztosítva a megfelelő anatómiai illeszkedést és a stabil rögzítést (4. ábra).



4. ábra. A híd típusú fogpótlás

A híd speciális, a pótfogak között összekötő szakaszokat is tartalmazó kialakítása nem esztétikai, hanem biomechanikai szempontok alapján történt. Az összekötő elemek célja a szerkezet merevségének növelése és a terhelés egyenletesebb továbbítása a pillérfogak irányába, ezáltal a lokális feszültségkoncentrációk csökkentése [6]. A geometriai kialakítás elsődlegesen a numerikus vizsgálatokhoz szükséges kedvező mechanikai viselkedést szolgálja, és nem egy klinikai alkalmazásra optimalizált végleges restaurációt reprezentál.

A létrehozott fogpótlásmodell képezi a további végeselemes vizsgálatok alapját, amelyek során a pótlás viselkedését statikus terhelés hatására elemezzük.

2.3. Anyagtulajdonságok hozzárendelése a szimulációhoz

A geometriai modell rétegzett felépítése lehetővé tette, hogy az egyes régiókhoz a szakirodalomban közölt rugalmassági modulusokat és Poisson-tényezőket rendeljük hozzá (1. táblázat), figyelembe véve az állcsont és a fogazat eltérő mechanikai viselkedését. Az egyes komponensek külön szilárdtestként történő kezelése biztosítja az anyagtulajdonságok egyértelmű és reprodukálható definiálását a végeselemes analízis során.

1. táblázat. Az állkapocs és a fogak rétegeinek anyagi tulajdonságai [2]

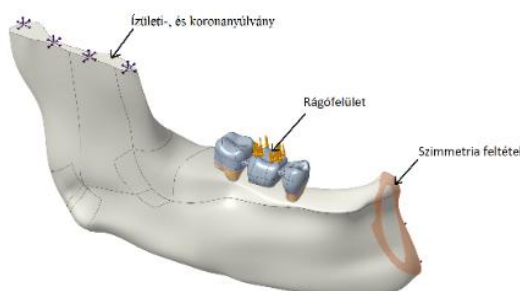
Anyagi tulajdonságok/ Rétegek	Kortikális csont	Spongiosa	Zománc	Dentin	Cementum
Sűrűség	$1,8 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	$1,87 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	$2,65 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	$1,9 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	1560 t/mm^3
Young- modulusz	14500 MPa	1370MPa	80000MPa	29300MPa	0,16MPa
Poisson-tényező	0,323	0,3	0,25	0,3	0,49
Nyírási modulusz	5480 MPa	527 MPa	32000 MPa	11153MPa	0,0537MPa
Kompressziós modulusz	13650 MPa	1140 MPa	53333 MPa	24166MPa	2,666MPa
Húzó szakítószilárdság	60 MPa	2,22 MPa	42,2 MPa	48,7MPa	2,4MPa
Húzó folyáshatár	55 MPa	2,12 MPa	37,2 MPa	70MPa	2,3MPa
Nyomószilárdság	130 MPa	2,44 MPa	150 MPa	250MPa	-
Nyomó folyáshatár	117 MPa	2,54 MPa	100 MPa	130MPa	-

A fogpótlás elemeihez egységes szerkezeti acél anyagtulajdonságok kerültek alkalmazásra. Ennek célja nem egy konkrét klinikai restauráció anyagának modellezése volt, hanem egy homogén, jól ismert mechanikai paraméterekkel rendelkező referenciaanyag alkalmazása, amely lehetővé teszi a geometriai kialakítás és a terhelési viszonyok hatásának elkülönített vizsgálatát. Ez a megközelítés csökkenti az anyagmodellezésből eredő bizonytalanságokat, és elősegíti a numerikus környezetek közötti összehasonlíthatóságot.

3. Numerikus vizsgálatok módszertana

A biomechanikai szimulációkat két végeselemes környezetben végeztük el: a PTC Creo 11 Ansys Simulate moduljában és az Ansys 2024 R2 szoftverben. A geometria, az anyagtulajdonságok, a peremfeltételek és a terhelés mindkét esetben azonos volt, a cél a két számítási környezet eredményeinek összehasonlíthatósága.

A vizsgálatok során az alsó állkapocs jobb oldali szakaszát modelleztük, a középvonal mentén szimmetriafeltétel alkalmazásával. A 4. és 6. fog pillérfogként funkcionált, mereven kapcsolódva az állkapocshoz, továbbá az ízületi és koronanyúlványi régiók rögzítésre kerültek [7-8] (5. ábra).



5. ábra. Terhelések és peremfeltételek a PTC Creo 11 Ansys Simulate környezetben

A terhelést a hídpótlás középső tagjára helyeztük el, 100 N nagyságú, függőleges irányú statikus erő formájában [7]. Ez a beállítás a híd legkedvezőtlenebb hajlító igénybevételét reprezentálja, és lehetővé teszi a geometriai kialakítás hatásának elkülönített vizsgálatát. A modell idealizált terhelési állapotot ír le, amely nem a teljes rágási folyamatot, hanem a fogpótlás mechanikai viselkedésének összehasonlítható elemzését célozza.

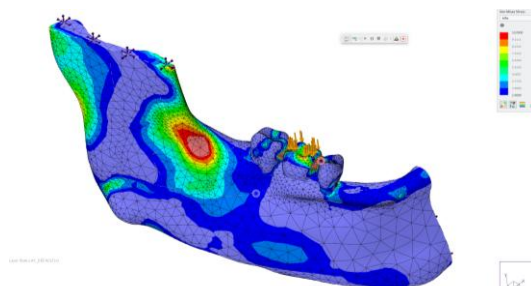
A modell nem tartalmazta a periodontális ligamentumot és a lágyszöveteket. Ezek mechanikai viselkedése alacsony merevségű és erősen nemlineáris, ezért lineáris rugalmas anyagmodellel nem írható le megfelelően [7]. Mivel a vizsgálat célja elsősorban a fogpótlásban kialakuló feszültségeloszlás vizsgálata volt, ezen szövetek elhagyása elfogadható egyszerűsítésnek tekinthető, mivel nem elsődleges teherhordó elemek.

A hálózás másodrendű tetraéderes elemekkel történt, lokális sűrítéssel a fogpótlás és a csatlakozó régiók környezetében. Mindkét környezetben hálóérzékenységi vizsgálatot végeztünk három különböző hálósűrűségi szinten.

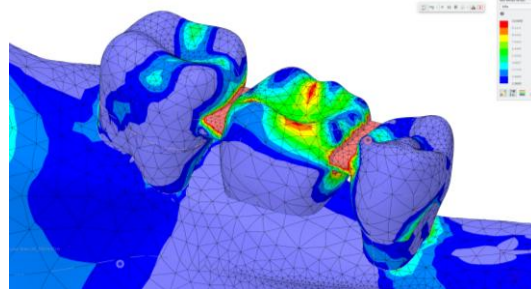
4. Eredmények és hálóérzékenység

A szimulációk során a teljes deformációt és a von Mises feszültségeloszlást elemeztük.

A PTC Creo 11 Ansys Simulate környezetben a legnagyobb elmozdulás az állcsúcs közelében jelentkezett, 0,1706 mm értékkel. A maximális von Mises feszültség az állkapocs ramus régiójában meghaladta a 10 MPa-t, míg a fogpótlásban a legnagyobb feszültség a hídelem középső szakaszán alakult ki, 34,39 MPa értékkel (6. és 7. ábra).

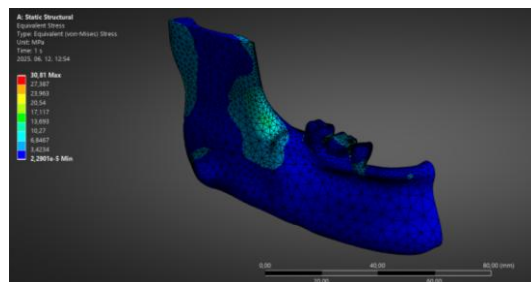


6. ábra. Von Mises feszültségeloszlás a PTC Creo 11 Ansys Simulate környezetben

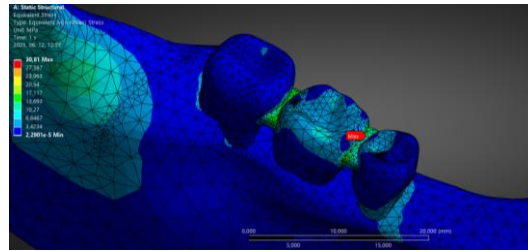


7. ábra. Csúcsfeszültség a hídon felülnézetben a PTC Creo 11 Ansys Simulate környezetben

Az Ansys 2024 R2 környezetben a maximális elmozdulás 0,17016 mm volt, szintén az állcsúcs közelében. Az állkapocsban a legnagyobb feszültség közel 18 MPa értéket ért el a ramus régióban. A fogpótlásban a maximális feszültség a híd alsó, középső zónájában jelentkezett, 30,81 MPa értékkel, ami a két pillérfog közötti hajlító igénybevétel következménye (8. és 9. ábra).

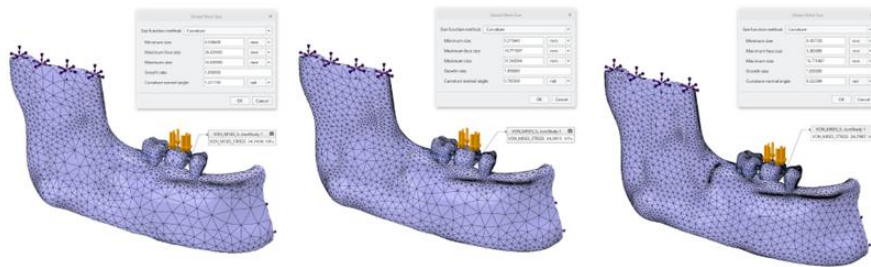


8. ábra. Von Mises feszültségeloszlás az Ansys 2024 R2 környezetben



9. ábra. Csúcsfeszültség a hídon felülnézetben az Ansys 2024 R2 környezetben

A hálózérzékenységi vizsgálatok alapján a PTC Creo környezetben a maximális feszültség alacsony hálósűrűség mellett 34,75 MPa, automatikus hálózás esetén 34,39 MPa, míg finom háló mellett 34,79 MPa volt (10. ábra).



10. ábra. Hálózérzékenység vizsgálat alacsony – automatikus - magas sűrűségű beállítással a Creo Ansys Simulate környezetben

Az Ansys környezetben automatikus hálózással 30,81 MPa, durva hálóval 32,10 MPa, míg finom hálóval 31,62 MPa maximális feszültség adódott (11. ábra).



11. ábra. Alacsony – automatikus - sűrű háló az Ansys 2024 R2 környezetben

Mindkét környezetben a maximális feszültségek eltérése a hálósűrűség módosításával 1–4% tartományon belül maradt, és a feszültségcsúcs helye minden esetben azonos geometriai régióban jelentkezett. Ez igazolja a modell numerikus stabilitását és a hálózás megfelelőségét.

Az eredmények alapján a fogpótlás–állkapocs rendszer mechanikailag stabil, a kialakuló feszültségek nem lépik túl az alkalmazott anyagmodellek szilárdsági tartományát. A numerikus vizsgálat alkalmas a különböző szimulációs környezetek eredményeinek összehasonlítására, valamint a geometriai kialakítás hatásának kvalitatív értékelésére.

5. Eredmények összehasonlítása és értékelése

A vizsgálat során azonos geometria, anyagtulajdonságok, peremfeltételek és terhelés mellett hasonlítottuk össze a PTC Creo 11 Ansys Simulate és az Ansys 2024 R2 környezetben kapott eredményeket.

Az automatikus hálózással végzett számítások alapján a főbb numerikus eredmények a 2. táblázatban láthatóak.

2. Táblázat. Numerikus különbségek a két szimulációs szoftverben

Vizsgálati paraméter	PTC Creo 11 Ansys Simulate	Ansys 2024 R2
Max. von Mises feszültség (MPa)	34,3915	30,81
Max. elmozdulás (mm)	0,1706	0,17016

Mindkét környezetben a maximális feszültség a hídpótlás alsó, középső zónájában jelentkezett, míg a legnagyobb elmozdulás az állkapocs elülső részén alakult ki. A deformációértékek gyakorlatilag megegyeztek, míg a feszültségekben mérsékelt eltérés mutatkozott, amely a különböző numerikus megoldási eljárások és alapértelmezett beállítások következménye lehet.

A hálózékonysági vizsgálatok során három különböző hálósűrűséget alkalmaztunk mindkét környezetben. A hídpótlás maximális feszültségére kapott értékek a következők voltak:

PTC Creo 11 Ansys Simulate:

- alacsony hálósűrűség: 34,75 MPa
- automatikus hálózás: 34,39 MPa
- nagy hálósűrűség: 34,79 MPa

Ansys 2024 R2:

- alacsony hálósűrűség: 32,10 MPa
- automatikus hálózás: 30,81 MPa
- nagy hálósűrűség: 31,62 MPa

A hálózékonyság csökkentésével a maximális feszültségértékek mindkét környezetben egy adott tartományon belül maradtak ($\approx 1\text{--}4\%$ eltérés), és a feszültségmaximum helye nem változott. Ez konvergenciaszerű viselkedésre utal, amely igazolja, hogy a választott hálósűrűség megfelelő a vizsgált mechanikai mennyiségek értékeléséhez.

6. Konklúzió

A tanulmány célja egy alsó állkapocsra illesztett híd típusú fogpótlás statikus terhelés alatti viselkedésének numerikus vizsgálata volt két különböző végeselemes környezetben. Azonos modellezési feltételek mellett a számított maximális elmozdulások gyakorlatilag megegyeztek (0,1706 mm és 0,17016 mm), míg a maximális feszültségértékek 34,39 MPa és 30,81 MPa nagyságrendűek voltak.

A hálózékonysági vizsgálatok alapján a számított feszültségek a hálózékonyság változtatásával csak kismértékben módosultak, és a kritikus helyek minden esetben azonos geometriai régióban jelentkeztek. Ez azt mutatja, hogy a modell alkalmas a fogpótlás mechanikai viselkedésének összehasonlító, kvalitatív értékelésére.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált hídpótlás–állkapocs rendszer a választott terhelési esetben mechanikailag megfelelően viselkedik. A bemutatott módszertan elsősorban geometriai kialakítások és szimulációs környezetek összehasonlítására alkalmas, és alapot nyújthat további, részletesebb biomechanikai modellek kialakításához.

Irodalomjegyzék

- [1] 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), VOLS 1 AND 2, pp. 69–74. IEEE, New York (2013). ISSN: 1948-2914 Num Pages: 6 Series Title: International Conference on Biomedical Engineering and Informatics Web of Science ID: WOS:000351608200014. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000351608200014> Accessed 2024-02-06
- [2] 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), 611–618 (1997) <https://doi.org/10.1007/BF02510968>. Accessed 2024-02-06

- [3] 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> . Acces-sed 2024-02-06
- [4] Liu, C.-C., Hsu, C.-H., Hsiao, I.-T., Lin, K.M.: Effect of geometric models on convergence rate in iterative PET image re-constructions. *Journal of Instrumentation* 4(05), 05010 (2009) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/05/P05010> . Accessed 2024-02-06
- [5] Garrido, A.H., Cerra, P.P., Zapico, A.O., Lopez, M.D.G.: GEOMETRIC DATA COLLECTION IN MEDICAL IMAGING. *DYNA* 86(2), 222–231 (2011) <https://doi.org/10.6036/3868> . Publisher: Publica-cio-nes DYNA SL. Accessed 2024-02-06
- [6] 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> . Publisher: IOP Publishing. Acces-sed 2024-11-04
- [7] 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), 311 (2024) <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05715-1> . Ac-cessed 2024-11-04