



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tomas Žagrakalis

PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ
GŪŽDUOBĖS IMPLANTO POZICIONAVIMUI TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Marius Rimašauskas

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
GAMYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. dr. Kazimieras Juzėnas

(data)

PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ
GŪŽDUOBĖS IMPLANTO POZICIONAVIMUI TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Gamybos inžinerija (kodas 621H70004)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Marius Rimašauskas

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Paulius Griškevičius

(data)

Projektą atliko

(parašas) Tomas Žagrakalis

(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Tomas Žagrakalis

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (kodas 621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Personalizuotų chirurginių instrumentų gūžduobės implanto pozicionavimui tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. Sausio 03 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Tomo Žagrakalio**, baigiamasis projektas, tema „Personalizuotų chirurginių instrumentų gūžduobės implanto pozicionavimui tyrimas“, yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Gamybos inžinerijos

(parašas, data)

katedros vedėjas

Doc. Dr. Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema Personalizuotų chirurginių instrumentų gūžduobės implanto pozicionavimui tyrimas. Research of personal surgical instruments for hip implant positioning.

Patvirtinta 2017 m. gruodžio mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-12

2. Darbo tikslas: atlikti gūžduobės implanto pozicionavimui skirtų personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos ir kokybės tyrimą.

3. Darbo struktūra: atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų gamybą ir kokybės matavimus. Atlikti matavimų analizę.

4. Reikalavimai ir sąlygos: projektavimas privalo būti atliktas naudojant neparimetrinę programinę įrangą. Gamyba turi būti atlikta sparčiųjų prototipų gamybos technologija. Kokybės analizė turi būti atlikta pramoniniu kompiuteriniu tomografu.

5. Darbo pateikimo terminas 20_18_ m. _____ Sausio _____ mėn. ___02___ d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

Išduota studentui _____ Tomui Žagrakaliui _____

Užduotį gavau _____ Tomas Žagrakalis _____

(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____ Doc. Dr. Marius Rimašauskas _____

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

Tomas Žagrakalis. Personalizuotų chirurginių instrumentų gūžduobės implanto pozicionavimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas vadovas doc. dr. Marius Rimašauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: personalizuoti chirurginiai instrumentai, implanto pozicionavimas, sparčiųjų prototipų gamyba, bandinių skenavimas.

Kaunas, 2018.

SANTRAUKA

Šiame darbe atlikta mokslinės literatūros analizė, išskirti personalizuotų chirurginių instrumentų tipai, panaudojimo sritis, atliekamos funkcijos. Atlikta personalizuotų chirurginių instrumentų projektavimo apžvalga ir projektavimas naudojant neparimetrinę projektavimo programinę įrangą. Instrumentai pagaminti naudojant adityvinę gamybos technologiją. Atlikta kokybės kontrolė pramoniniu kompiuteriniu tomografu. Aprašyti rezultatai gauti po pirminės ir antrinės personaliuotų chirurginių instrumentų kokybės tyrimų.

Tomas Žagrakalis. Research of personal surgical instruments for hip implant positioning Master thesis supervisor doc. dr. Marius Rimašauskas; The faculty of Mechanical engineering and design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.

Key words: personal surgical guides, implant positionning, 3D printing, sample scan.

Kaunas, 2018.

SUMMARY

In this work, was performed the analysis of scientific literature, describes the types of personalized surgical instruments were, fields of application, functions performed. A review of the design of personalized surgical instruments was performed using non-parametric design software. Instruments are manufactured using additive production technology. Quality control was performed by industrial computer tomography. Described results are obtained after primary and secondary research on the quality of personalized surgical instruments.

TURINYS

ĮVADAS	7
PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ MOKSLINĖS LITERATŪROS ANALIZĖ	9
Personalizuotų chirurginių instrumentų klasifikavimas pagal operacijos tipą	16
Personalizuotų chirurginių instrumentų klasifikavimas pagal atliekamą funkciją	19
Personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos problematika	23
PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ TYRIMAS	25
Personalizuotų chirurginių instrumentų modelių projektavimas	26
Personalizuotų chirurginių instrumentų modelių paruošimas gamybai	27
Personalizuotų chirurginių instrumentų gamyba	29
Personalizuotų chirurginių instrumentų bandinių analizė	30
Analizės organizavimas	30
Palyginamosios analizės tikslai	31
Palyginamosios analizės metodas	31
Palyginamosios analizės sąlyga	31
Palyginamosios analizės eiga	31
Palyginamosios analizės bandiniai	33
PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ ANALIZĖS REZULTATAI	36
Pirminės analizės rezultatai	36
Pakartotinės analizės rezultatai	40
Personalizuotų chirurginių instrumentų bandinių skylių skersmens matavimų rezultatai	40
Personalizuotų chirurginių instrumentų cilindriškumo matavimų rezultatai	42
Personalizuotų chirurginių instrumentų teorinių ir pagamintų bandinių palyginimas	44
IŠVADOS	46
NAUDOTA LITERATURA	48
Priedas A bandinių gamybos ataskaita	56
Priedas B Bandinių matavimo rezultatai	59

IVADAS

Operacijos, kuriose šalinamas kaulas, yra sudėtingos dėl komplikotos geometrijos, riboto matomumo ir ribotos darbo zonos [1]. Klubo sąnario rezekcija ir rekonstrukcija yra viena iš sudėtingiausių operacijų ortopedijos - traumatologijos srityje [2]. Dubens srityje yra daugybė kraujagyslių ir nervų, kuriuos kliudant sraigtais, paciento būklė būtų pažeista nepagydomai [3]. Darbui su standartiniais chirurginiais instrumentais reikia ilgos chirurgo darbo praktikos [4]. Tokių operacijų metu vidutiniškai atsirandančios klaidos – 0,8 mm [5]. Dėl dubens kaulų naviko rezekcijos buvo sukurtos kompiuterizuotos technologijos, pavyzdžiui, operacinė navigacija [4]. Tačiau šios operacinės navigacijos yra ypač brangios, lyginant su standartiniais chirurginiais instrumentais, dėl to tik pažangios gydymo įstaigos gali įsigyti tokią įrangą. Pradėta ieškoti pigesnių sprendimų.

„3D spausdinimo“ technologija sukėlė revoliuciją ir pamažu pakeitė gamybą įvairiose pramonės šakose, įskaitant sveikatos priežiūrą. Sparčiai daugėja chirurgų, kurie 3D modeliavimo ir virtualių procedūrų aspektus įtraukia į įprastą klinikinę praktiką [6]. Sparčioji prototipų gamyba vis dažniau naudojama medicininių prietaisų gamyboje [7]. Plačiausiai naudojama gaminant pacientų anatominius modelius, implantų modelius ir personalizuotus chirurginius instrumentus [7]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai projektuojami naudojant kompiuterinę programinę įrangą pagal pageidaujamą rezekcijos strategiją ir pagamintą naudojant sparčiąją prototipų gamybos technologiją [3]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai supaprastina operaciją [8] ir sutrumpina operavimo laiką [9].

Operacijos metu, prieš tvirtinant implantą prie kaulo, naudojami personalizuoti chirurginiai instrumentai, kurie užtikrina tikslią sraigto įvedimo trajektoriją, kuri nustatoma priešoperacinio planavimo metu [6]. Naudojant personalizuotus chirurginius instrumentus kaulo rezekciją ir pozicionavimą operacijos metu galima atlikti per 5 minutes [3]. Personalizuotas chirurginis instrumentas turi būti itin tiksliai suprojektuotas ir pagamintas. Sraigto įvedimo tikslumas priklauso nuo kreipiančiosios ilgio, skersmens, cilindriškumo, taip pat paklaida atsiranda, jeigu pagamintas instrumentas yra didesnis arba mažesnis už suprojektuotą modelį.

Darbo tikslas:

Atlikti gūžduobės implanto pozicionavimui skirtų personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos ir kokybės tyrimą.

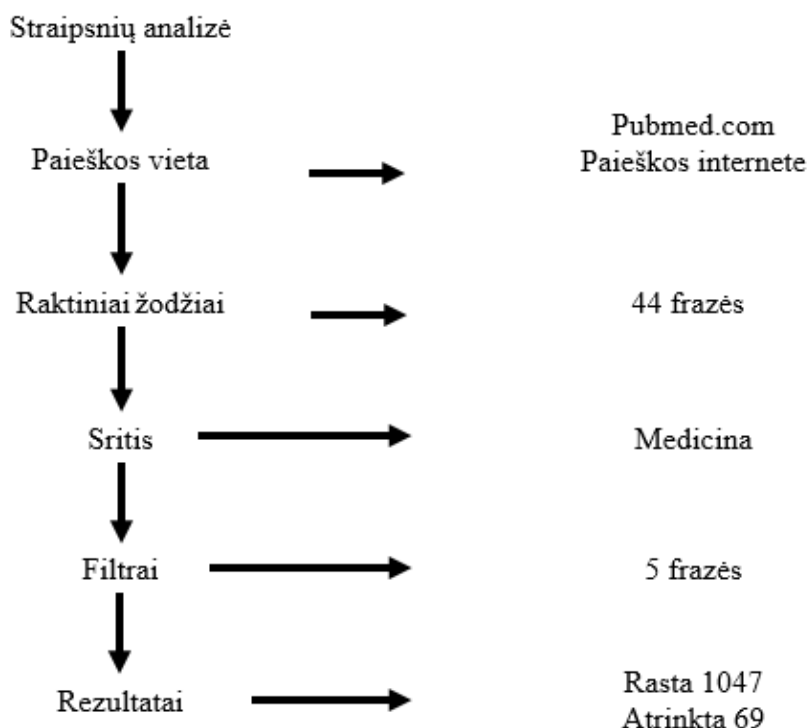
Darbo uždaviniai:

1 Atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų mokslinės literatūros analizę.

- 2 Atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų projektavimą su neparimetrine programine įranga.
- 3 Atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų bandinių gamybą sparčiųjų prototipų gamybos metodu.
- 4 Atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų kokybės su pramoniniu kompiuteriniu tomografu tyrimą.
- 5 Atlikti personalizuotų chirurginių instrumentų kokybės rezultatų analizę.

1. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ MOKSLINĖS LITERATŪROS ANALIZĖ

Mokslinių straipsnių analizė skirta nustatyti personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos metodui, paskirčiai ir naudojimo sričiai. Analizei atlikti sudarytas planas [10] (žr. 1.1 pav.). Mokslinių straipsnių paieška atlikta naudojant nacionalinę US medicinos ir sveikatos instituto biblioteką¹ bei internete, naudojant keturiasdešimt keturias paieškos frazes (žr. 1.1 lentelę). Paieškos metu surasti 1047 moksliniai straipsniai. Straipsniai, kurie publikuoti prieš dešimt metų ir seniau, kuriuose atliekamos operacijos su gyvūnais, besikartojantys straipsniai, gamintojų katalogai, operacijos atliekamos standartiniais chirurginiais instrumentais atmesti. Atlikus mokslinių straipsnių atranką, liko 69 mokslinės publikacijos, kuriose publikuojama personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos būdas ir panaudojimas operacijos metu.



1.1 pav. Mokslinių straipsnių analizės planas

Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami (žr. 1.1 lentelę): kelio sąnario operacijose, kaukolės operacijose, ilgujų kaulų operacijose, klubo sąnario operacijose, alkūnės sąnario operacijose, peties sąnario operacijose, veido srities operacijose, žandikaulio sąnario

¹ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>

operacijose (neprilausomai nuo veido), stuburo operacijose, kitų plokščiųjų kaulų operacijose. Šios analizės metu išskirti du pagrindiniai personalizuotų chirurginių instrumentų tipai: pagrindiniai ir pagalbiniai. Taip pat instrumentai skirstomi pagal jų atliekamą funkciją: gręžimo, rezekcijos ir pozicionavimo (žr. Personalizuotų chirurginių instrumentų klasifikavimo skyrių).

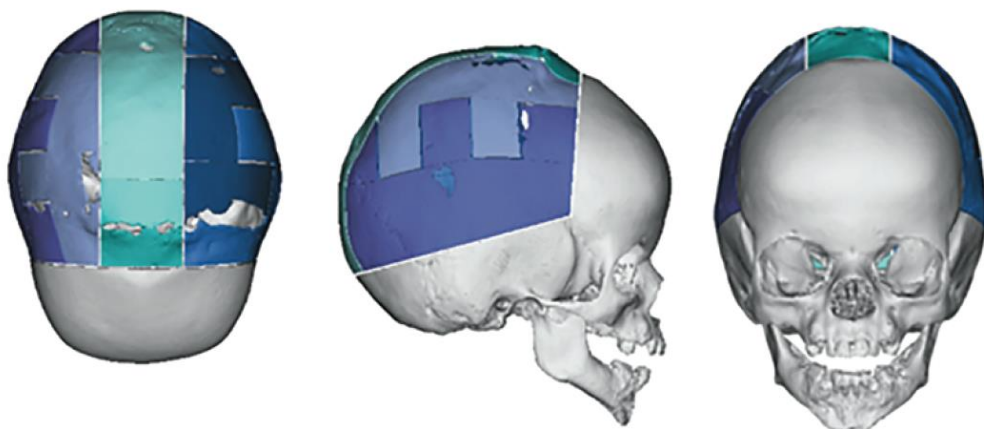
1.1 lentelė Mokslinių straipsnių analizės etapai

Paieškos frazės	Patient-specific guides; Alignment; Rapid prototyping; Surgical navigation; Cranioplasty; Craniotomy; Reconstruction; computer-aided design; 3-dimensional model; forearm; Tumor resection; Safe margin; Patient-specific; cutting guides; Quantitative surgery; resection-reconstruction surgery; pelvis; 3D printing; Fibrous Dysplasia; computer assisted surgery; Contouring; Spine surgery; Custom implants; Orthopaedic surgery; Patient-specific implants; Three-dimensional printing; surgical specialties; surgery; customized guiding block; transarticular screw; 3 D DICOM; Craniofacial tumors; Virtual surgical planning; Positioning guides; total knee arthroplasty; surgical technique; orthopaedic instrumentation; computer-aided surgery;
Filtrai	Nesenesni nei 10 metų, gyvūnai, besikartojantys, gamintojų brošiūros, tradiciniai gamybos būdai, tradiciniai instrumentai
Rezultatai	Rasta 1047 publikacijos Atlikus filtravimą, liko 69 publikacijos 11 kelio sąnario operacijos 3 kaukolės operacijos 3 ilgųjų kaulų operacijos 5 klubo sąnario operacijos 3 alkūnės sąnario operacijos 1 peties sąnario operacija 12 veido srities operacijos 9 žandikaulio sąnario operacijos (atskirai nuo veido) 7 stuburo operacijos 5 kitų plokščiųjų kaulų operacijos 4 publikacijos, kuriose lyginami su tradiciniais instrumentais 3 publikacijos, nurodančios operacijų tikslumą 4 publikacijos, kuriose lyginamas operacijos laikas 69 sparčiosios prototipų gamybos panaudojimas medicinoje

Chirurgo instrumentai - tai kelias į sėkmingą operaciją [11]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai projektuojami specialiomis planavimo programinėmis įrangomis [11]. Pastebimas reikšmingas skirtumas tarp kelio operacijų rezultatų, kuomet naudojami tradiciniai chirurginiai instrumentai ir personalizuoti chirurginiai instrumentai [12]. Naudojant personalizuotus chirurginius instrumentus, operacijose sutrumpinamas operacijos laikas [9,13]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami implantams pozicionuoti [14]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai dažniausiai prie kaulo tvirtinami Kiršnerio vielomis [15].

Kulkšnies personalizuoti chirurginiai instrumentai tvirtinami prie kaulo mechaniškai ir anatomiškai. Atitinka kaulo anatomiją, sumažina operacijos laiką, padidina operacijoje atliekamų veiksmų tikslumą, sumažina operacijos kainą, naudojami, kai reikia specialių standartinių chirurginių instrumentų. Operacijos, kurios retai pasikartoja, bet reikalauja specializuotų chirurginių instrumentų, kurie brangiai kainuoja, pakeičiami vienkartiniais personalizuotais chirurginiais instrumentais. Kai operacijos pasikartoja retai - standartinių instrumentų pirkti ir sandeliuoti neapsimoka [16]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai padeda atstatyti kulkšnies biomechanikos ašis. Padeda lengviau pozicionuoti implantą [17]. Naudojamos specialios planavimo programinės įrangos, leidžiančios projektuoti [11].

Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami kaukolės rezekcijai (žr. 1.2 pav.). Instrumentai operacijos metu tvirtinami prie kaulo medicininėmis Kiršnerio vielomis, kurių skersmuo 2 mm. Instrumento pagrindo paviršius atitinka individualaus paciento kaukolės anatomiją ir kaulo paviršių. Naudojant personalizuotus chirurginius instrumentus, sutrumpėja operacijos laikas, pasiekiamas geresnis pjūvio tikslumas ir geriau pasirošama kranialinio implanto pozicionavimui, operacijos metu [18-20].



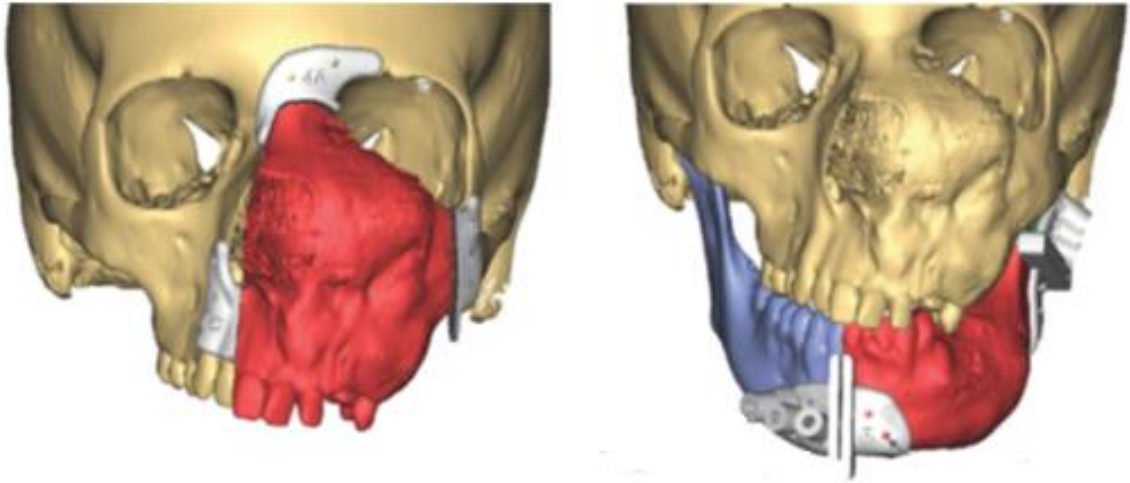
1.2 pav. Kaukolės skliauto rezekcijos planavimas [20]

Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami žandikaulio rezekcijai (žr. 1.3 pav.). Rezekcijos metu pašalinama kaulo dalis, kuri yra apimta naviko arba pažeista ligos [21]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai projektuojami atsižvelgiant į žandikaulyje esančius nervus, kraujagysles ir dantų šaknis. Kadangi rezekcijos linijos ir gręžimo kreipiančiosios nustatomos priešoperacinio planavimo metu, sumažinama operacijos rizika [22]. Personalizuotas chirurginis instrumentas naudojamas veido asimetrijai, osteogenezei² ištaisyti, ortognatinėse operacijose (veido bruožams ištaisyti), atliekant kaulo rezekciją ir pozicionavimą [23-26]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami ortognatinėse operacijose [24,26]. Dažniausiai veido operacijose personalizuoti chirurginiai instrumentai atlieka dvi funkcijas: rezekciją ir pozicionavimą. Šie instrumentai skirti išvengti nervų ir kraujagyslių pažeidimo bei pasiekti maksimalų veido simetriškumą. Patyręs chirurgas negali atlikti tokio pjūvio, kuris užtikrins tikslią simetriją. Turint rezekcijos liniją, sumažinama operacijos darbo zona. Operacija tampa patogesnė, saugesnė ir efektyvesnė [27,28]. Instrumentai, skirti kaulo pozicionavimui, yra tvirtinami prie skruostikaulių ir dantų paviršiaus. Personalizuoti chirurginiai instrumentai sudaromi iš kelių dalių: pagrindo ir kapos, kurių pozicijos nesikeičia, ir tiltų su skirtingais ilgiais [24]. Nustačius rezekcijos linijas šie instrumentai naudojami veido asimetrijai šalinti. Veido operacijose rezekcijos linijos privalo būti sudarytos iš tiesių linijų. Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami, kuomet reikia sumažinti riziką ir negalima naudoti operacinės navigacijos. Operacijos metu pozicionuojami atpjauti kaulai, arba endoprotezų komponentai. Vis daugiau chirurgų skiria didelį dėmesį nervų išsaugojimui, o personalizuoti chirurginiai instrumentai – geras ir lengvas būdas tam padaryti [29]. Tai greita ir tiksli priemonė, atlikti operacijas [26].

Paciento skenavimas ir 3D kaulo modelio sukūrimas užtrunka 35 minutes, operacijos planavimas užtrunka 140–300 minučių, instrumento projektavimas 80 – 360 minučių, operacijos laikas 120–180 minučių [30–31]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai leidžia sumažinti operacijos laiką 45–60 minučių [23]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai gaminami sparčiosios prototipų gamybos būdu iš biosuderinamų medžiagų – PEEK, poliamido, titano lydinio Ti6Al4V. CAD/CAM suteikia chirurgams šiuos pranašumus [21,32-41]:

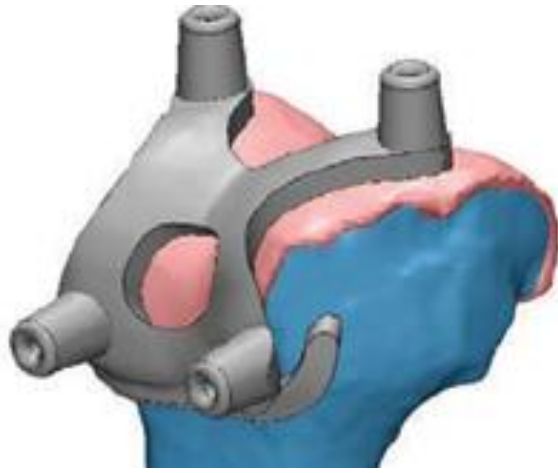
- sukuria ištaisyto veido vizualizaciją, nepažeidžiant organizmo;
- leidžia manipuliuoti kaulo poziciją ir rasti tinkamiausią variantą;
- leidžia sukurti instrumentą, kuris virtualų planavimą perkelia į operacinę.

² Osteogenezė-tai įgimta liga, dėl kurios formuojasi labai trapūs kaulai. Ši liga dar kitaip vadinama trapių kaulų liga arba lotynišku tarptautiniu pavadinimu *Osteogenesis imperfecta* [42]



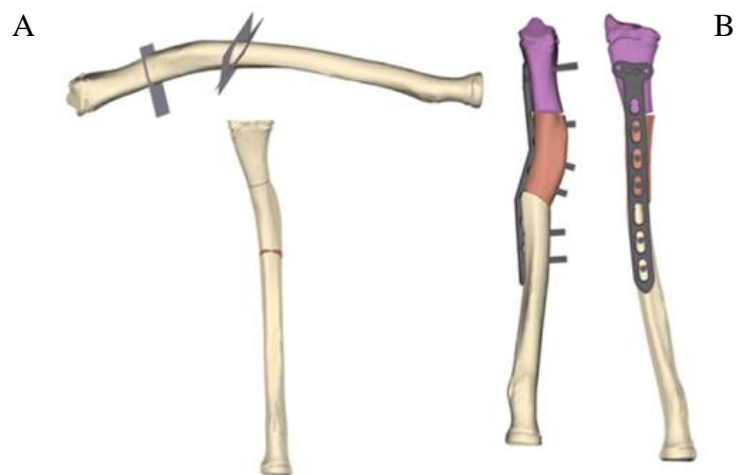
1.3 pav. Veido ir žandikaulio rezekcijai naudojami personalizuoti chirurginiai instrumentai [21]

Personalizuoti chirurginiai instrumentai supaprastina kelio operacijas [43]. Sumažina operacijos laiką ir kraujo praradimą [44-47]. Sumažina operacijoje naudojamų instrumentų kiekį. Šių instrumentų tikslas - operacijos metu sumažinti neteisingos rezekcijos plokštumų lygiavimo riziką [48]. Priešoperacinio planavimo metu sukuriama bazavimo paviršiai, kurie turi užtikrinti tikslų instrumento pozicionavimą [49]. Naudojamas, kai nebelieka galimybių operacijos atlikti standartiniais chirurginiais instrumentais [50]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami, kai negalima naudoti intramedulinių chirurginių instrumentų, pavyzdžiui, kai kaulas pažeistas traumos metu. Instrumentai gali reguliuoti pjūvimo kryptį, gylį ir plotį. Pritvirtinami prie kaulo paviršiaus medicininėmis Kiršnerio vielomis [51]. Personalizuotas chirurginis pozicionavimo instrumentas nurodo priešoperacinio planavimo metu nustatytus ryšius tarp endoprotezo komponentų. Ryšius nustato rezekcijos plokštumos, kurios nurodomos, kai instrumentas pozicionuojamas ant kaulo paviršiaus [52]. Didžiausias personalizuotų instrumentų privalumas tas, jog remiamasi anatominio kaulo paviršiumi. Tačiau sėkmingai operacijai būtina tinkamai nuo kaulo nusivalyti minkštuosius audinius. Nuo kelio priklauso biomechaninė šlaunikaulio-kelio-čiurnos ašis, kurią operacijos metu privaloma išlaikyti. Naudojant personalizuotus instrumentus kelio mechaninės ašies vidurkio koeficientas pasiekiamas 1.02, kuomet sveikosios mechaninės ašies vidurkio koeficientas 1.0 [53]. Kelio operacijoje reikia atlikti 4 pjūvius, kurie tarpusavyje turi sąsają. Trys pjūviai atliekami ant šlaunikaulio distalinio galo ir vienas blauzdikaulio proksimaliniame gale. Nuo pjūvių priklauso implanto pozicionavimas [54]. Matomas reikšmingas skirtumas naudojant personalizuotus chirurginius instrumentus ir jų nenaudojant [12].



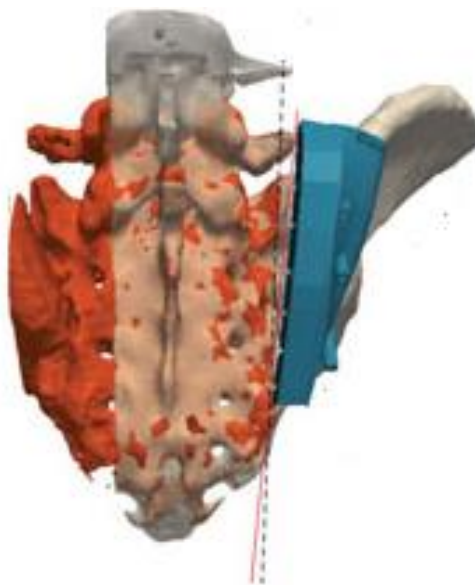
1.4 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas kelio operacijai [55]

Priešoperacinis kaulų rezekcijos planavimas vykdomas atlikus kompiuterinę tomografiją ir iš jos vaizdų sukūrus .stl formato modelį. Turint kaulo modelį, planuojamos rezekcijos plokštumos (žr. 1.5 pav.), gręžimo ašys. Kaulas pozicionuojamas modelį sukant ir slenkant, surandama taisyklingiausia kaulo pozicija. Tinkamai orientavus kaulą, projektuojami personalizuoti chirurginiai instrumentai, kurie užtikrins, jog operacijos metu kaulų pozicija atitiktų priešoperacinio planavimo metu nustatytas kaulų pozicijas [56-58]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai dažniausiai apglėbia dalį kaulo, taip užtikrindami tinkamą poziciją. Tinkamai suprojektuotų rezekcijos kreipiančiųjų aukštis 5-10 mm [57].



1.5 pav. A - suplanuoti blauzdikaulio pjūviai, B – blauzdikaulio sutvirtinimas lūžių plokštele [56]

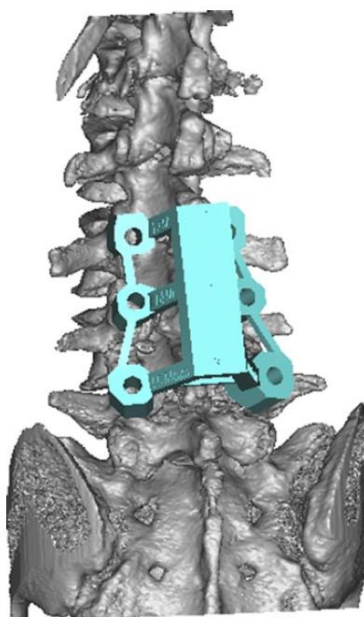
Personalizuotų chirurginių instrumentų, naudojamų klubo operacijose, rezekcijos sienelės sudarytos iš tiesių linijų (žr. 1.6 pav), o jų ilgis priklauso nuo išpjauamo kaulo dydžio. [14,59] Personalizuoti chirurginiai instrumentai naudojami vienoje komplektacijoje su implantu. Instrumentai tvirtinami ant kaulo medicininėmis Kiršnerio vielomis, kurių skermuo 2 mm. Instrumentų tikslumas priklauso nuo gamybos technologijos, tačiau pagal ISO1101 standartą, jų tolerancija negali viršyti 0,2 mm. Instrumentas privalo būti tvirtinamas nuo kaulo auglio ne mažesniu, nei 10 mm atstumu [60]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai ženkliai sutrumpina gūžduobės sąnario operacijos laiką [2]. Kaulo rezekcijai taip pat naudojama navigavimo sistema [61], tačiau naudojant personalizuotus instrumentus, operacijos atliekamos tiksliau [62].



1.6 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas, skirtas klubakaulio rezekcijai [59]

Stuburo operacijoms naudojami personalizuoti chirurginiai instrumentai supaprastina operaciją [8] ir pakeičia chirurgų požiūrį į priešoperacinį planavimą [18]. Personalizuoti chirurginiai instrumentai gaminami SLS (*Directive laser sintering*) gamybos būdu iš biosuderinamos medžiagos P2200 [63]. Šių instrumentų modeliavimas atliekamas pagal UNI CEI EN ISO 13485 standartą parametrinėmis programinėmis įrangomis, kuomet kaulo paviršius atimamas iš instrumento modelio [64]. Prieš projektuojant instrumentus, atliekamas priešoperacinis planavimas. Būna atvejų, kai reikia didelio personalizuoto instrumento, tuomet masyvi konstrukcija pakeičiama į kelis personalizuotus chirurginius instrumentus, tačiau atsiranda pozicionavimo paklaidos. Naudojant tris atskirus instrumentus, atliekami trys veiksmai:

pozicionavimas, gręžimas ir varžto įvedimas [65]. Pozicionavimo paklaidos sumažinamos fiksatoriais, kurie užtikrina konstrukcijos stabilumą. Atliekama rezekcija, naudojant šiuos instrumentus, parodė keletą kartų tikslesnius rezultatus, nei atliekamas pjūvis rankiniu būdu [66]. Stuburo operacijos yra sudėtingos ir didelę riziką keliančios operacijos. Sraigtus sunku pozicionuoti ir įsukti dėl šalia esančių arterijų. Naudojant personalizuotus chirurginius instrumentus, operacijos metu išvengiama nervų ir kraujagyslių pažeida [67]. Supaprastina ir sumažina operacijos riziką [68]. Turint 3D anatomicinį modelį, priešoperacinio planavimo metu sudėliojami varžtai [69]. Pooperacinio vertinimo skenavime nepastebėta skirtumo tarp suplanuoto ir atlikto varžtų pozicionavimo [70].

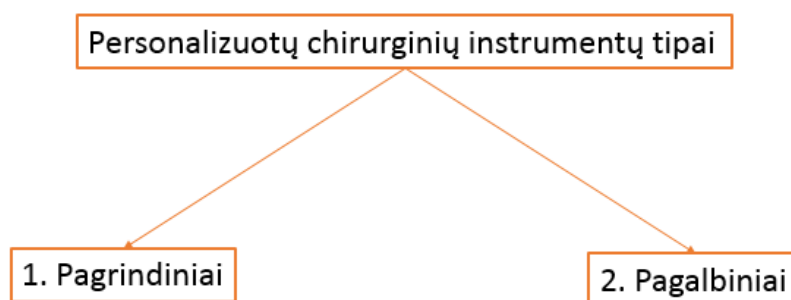


1.7 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas varžtų pozicionavimui, tvirtinant stuburą [66]

1.2. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ KLASIFIKAVIMAS PAGAL OPERACIJOS TIPĄ

Atlikus mokslinių straipsnių analizę, personalizuotus chirurginius instrumentus galima klasifikuoti pagal operacijos metu atliekamą vaidmenį (žr. 1.8 pav.). Personalizuotas chirurginis instrumentas operacijos metu gali atlikti pagrindinį arba pagalbinį veiksmą. Kai operacijos metu pacientui neatliekamas endoprotezavimas, personalizuotas chirurginis instrumentas atlieka

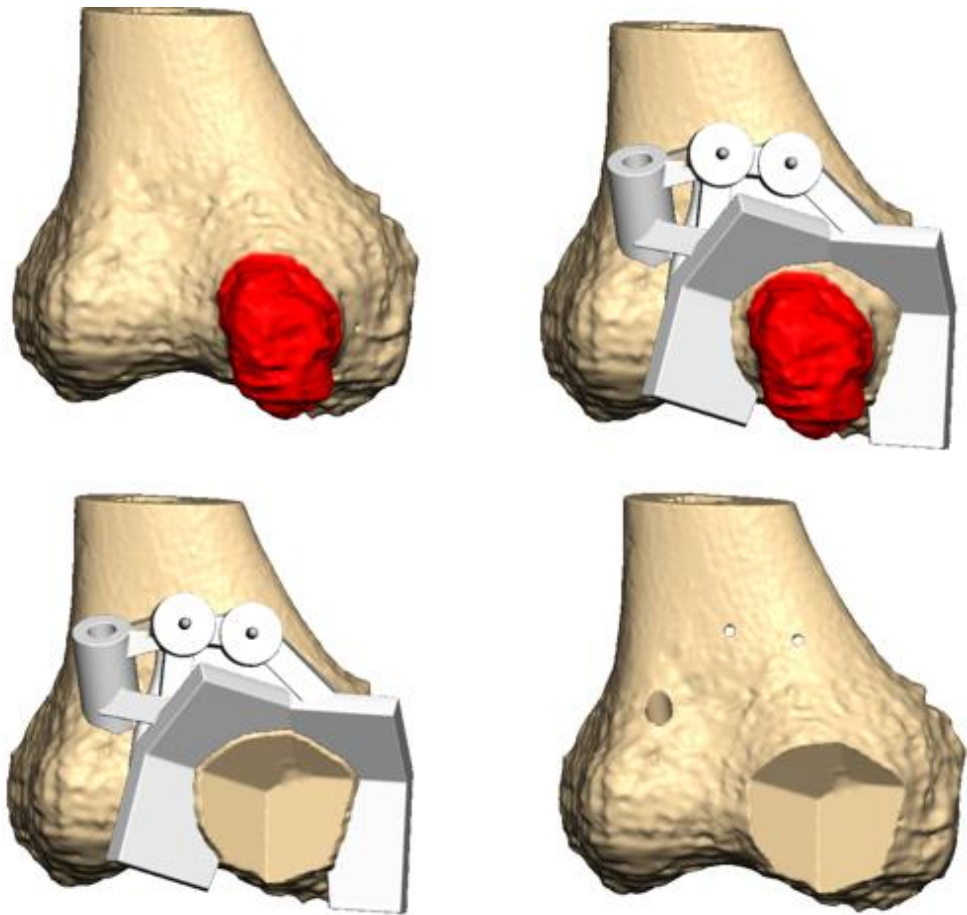
pagrindinę funkciją, t.y. operacijos metu išgręžia, nupjauna arba pozicionuoja kaulą, taip pašalina ataugas, navikus ir kitus nepageidaujamus darinius. Kai operacijos metu paciento sąnarys pakeičiamas endoprotezu, personalizuoti chirurginiai instrumentai paruošia skylės endoprotezo tvirtinimui, pašalinant kaulą, paruošia vietą endoprotezui arba pozicionuoja kaulą, priešoperacinio planavimo metu suplanuotam sujungimui.



1.7 pav. Personalizuotų chirurginių instrumentų tipai.

Pagrindiniai personalizuoti chirurginiai instrumentai:

Pagrindiniai personalizuoti chirurginiai instrumentai (žr. 1.9 pav.) tvirtinami anatomiškai prie kaulo paviršiaus (čia instrumento pagrindo paviršius atitinka kaulo paviršių). Anatomicinė fiksacija užtikrina tinkamą instrumento poziciją prie kaulo. Pagrindiniai chirurginiai instrumentai prie kaulo tvirtinami sraigtais arba Kiršnerio vielomis [11]. Šie personalizuoti chirurginiai instrumentai skirti perkelti priešoperacinio planavimo metu chirurgo nustatytą rezekcijos (nupjovimo) liniją arba gręžimo ašis į procedūros aikštelę. Rezekcijos metu pašalinama organo dalis, kuri yra apimta naviko, pažeista ligos, kai reikia taisyti įgytą deformaciją (pvz., nejudrų sąnarį, ydingą galūnės padėtį) ar šalinti anomaliją. Pavyzdžiui, kai ant šlaunikaulio distalinio galo (kelio sąnario) yra užaugęs navikas (žr. 1.9 pav.). Atliekant operaciją standartiniais chirurginiais instrumentais operacijos sėkmė priklauso tik nuo chirurgo patirties, nes šis operacijos metu nusprendžia, kaip giliai pjauti kaulą. Šlaunikaulio distaliniame gale yra augimo linija, kurią pažeidus vaiko šlaunikaulis nustotų augti, kai biomechanika pažeidžiama, judėjimo mechanizmas sutrinka, o ateityje pacientui prireiktų papildomų operacijų. Jei chirurgas paliktų nors ir mažą naviko dalį ant kaulo, yra tikimybė, jog navikas vėl pradėtų plėstis, vadinasi, yra tikimybė papildomai operacijai. Personalizuoti chirurginiai instrumentai padeda išvengti žmogiškojo faktoriaus klaidų.

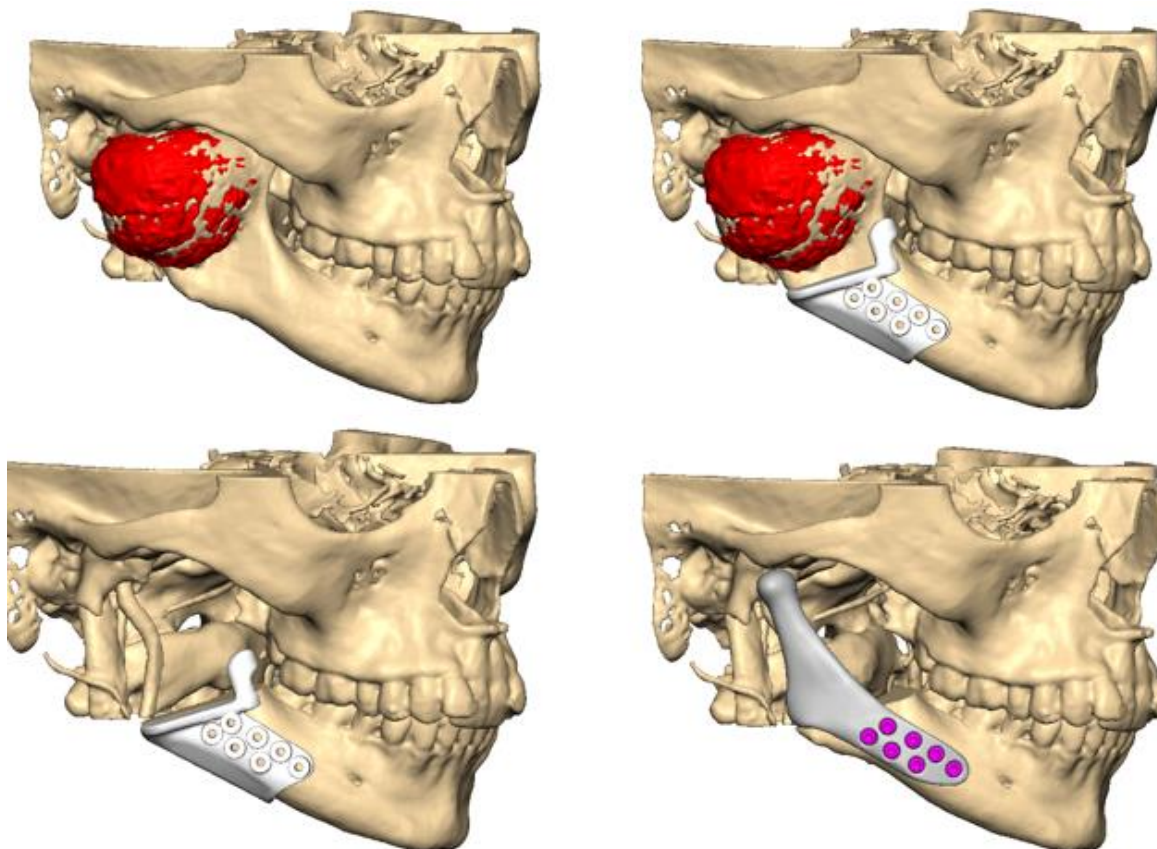


1.8 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas operacijos metu nustato kaulo pjovimo ribas

Pagalbiniai personalizuoti chirurginiai instrumentai:

Pagalbiniai personalizuoti chirurginiai instrumentai tvirtinami anatomiškai prie kaulo paviršiaus (čia instrumento pagrindo paviršius atitinka kaulo paviršių). Anatomicinė fiksacija užtikrina tinkamą instrumento poziciją prie kaulo. Pagalbiniai chirurginiai instrumentai prie kaulo tvirtinami sraigtais arba Kiršnerio vielomis. Operacijos metu šie instrumentai paruošia kaulą endoprotezavimui. Dažniausiai naudojami instrumentai, kurie vienu metu atlieka kelias funkcijas (žr. 1.10 pav.), jie naudojami, kai tarp rezekcijos plokštumų ir gręžimo vietų yra tiesioginė sąsaja ir ribota procedūrų aikštelė. Pavyzdžiui, žandikaulio sąnario operacijos metu naudojamo personalizuoto chirurginio instrumento rezekcijos linija sutampa su apatinio žandikaulio komponento vidiniu paviršiumi, o instrumento gręžimo kreipiančiųjų ašys sutampa su apatinio žandikaulio komponento skylių ašimis (žr. 1.10 pav.). Instrumento sienelė chirurgui padeda nustatyti rezekcijos liniją. Naudodamas standartinius įrankius, chirurgas remiasi savo patirtimi ir nustato rezekcijos liniją, nuo kurios priklauso apatinio žandikaulio komponento pozicionavimas,

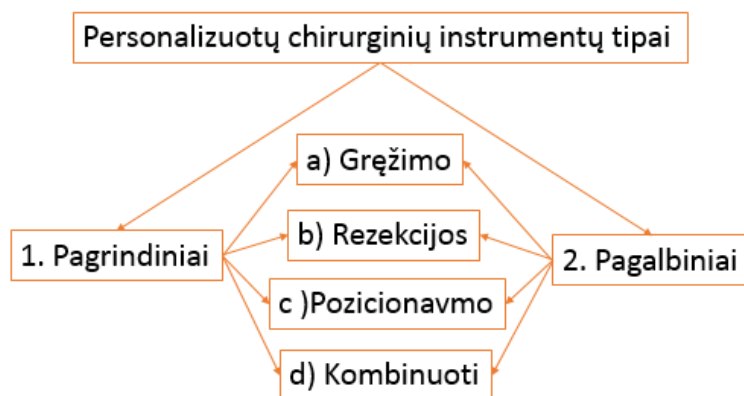
o nuo pastarojo – endoprotezo komponentų tarpusavio pozicija. Jei apatinio žandikaulio ir sąnarinės duobės endoprotezo komponentų pozicijos nesutampa – sumažėja paciento artikuliacinės, kramtymo ir išsižiojimo galimybės.



1.10 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas operacijos metu paruošia kaulą endoprotezavimui

1.3. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ KLASIFIKAVIMAS PAGAL ATLIEKAMĄ FUNKCIJĄ

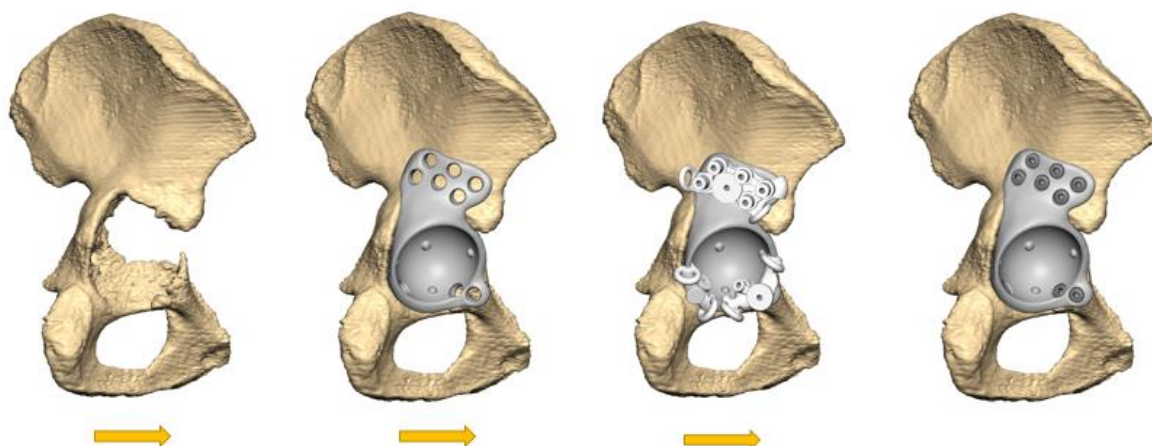
Pagal atliekamą funkciją skirstomi į gręžimo, rezekcijos, pozicionavimo ir kombinuotus personalizuotus chirurginius instrumentus (žr. 1.11 pav.). Tvirtinami anatomiškai, ši fiksacija užtikrina, jog personalizuotas chirurginis instrumentas bus pozicijuotas tinkamai. Mechaninė fiksacija užtikrina, jog personalizuotas chirurginis instrumentas nepajudės rezekcijos, gręžimo ar pozicionavimo metu.



1.11 pav. Personalizuotų chirurginių instrumentų atliekamos funkcijos

a) Personalizuoti gręžimo chirurginiai instrumentai:

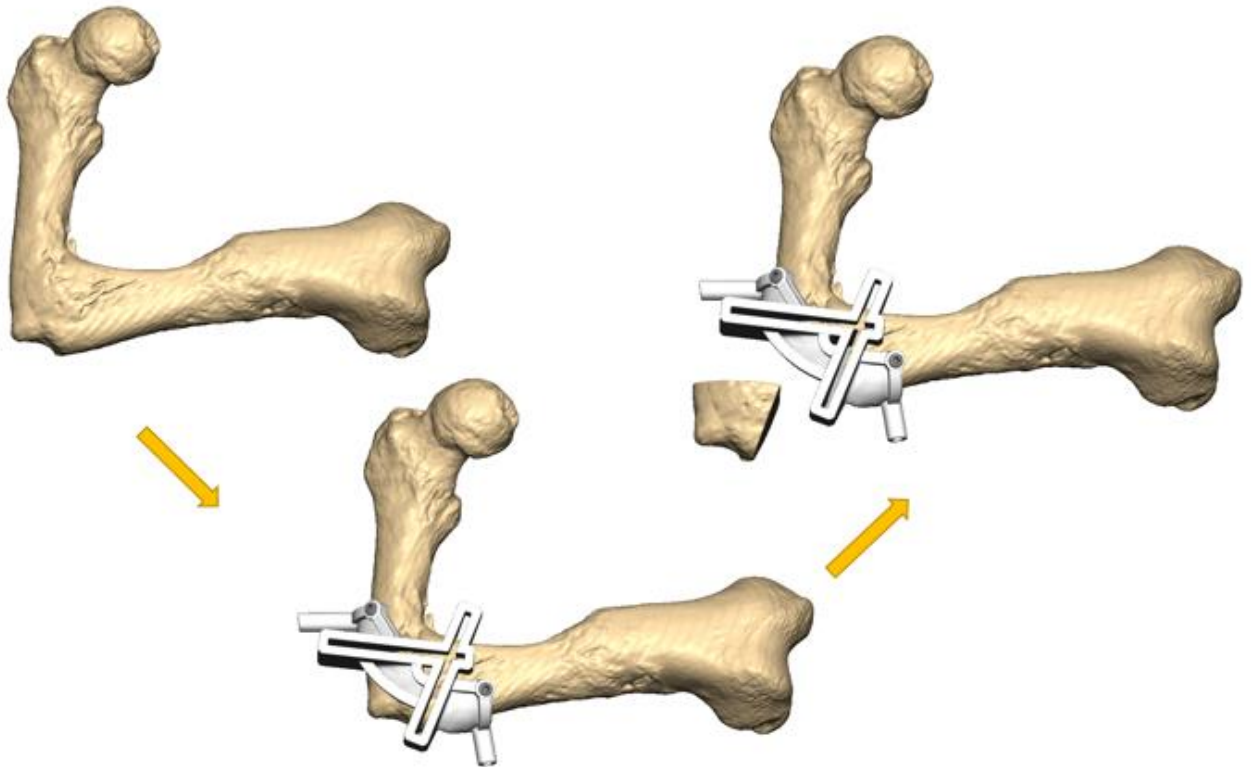
Gręžimui atlikti skirti instrumentai yra tvirtinami anatomiškai (pagrindo paviršius atitinka kaulo paviršių) ir mechaniškai (tvirtinami prie kaulo sraigtais arba Kiršnerio vielomis). Gręžimo personalizuoti chirurginiai instrumentai skirti perkelti priešoperacinio planavimo metu chirurgo nustatytas gręžimo ašis, kitų operacijos metu naudojamų medicinos prietaisų tvirtinimo prie kaulo vietas, tvirtinimo kryptis ir gręžimo gylis (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas, atliekantis gręžimo funkciją

b) Personalizuoti rezekcijos chirurginiai instrumentai:

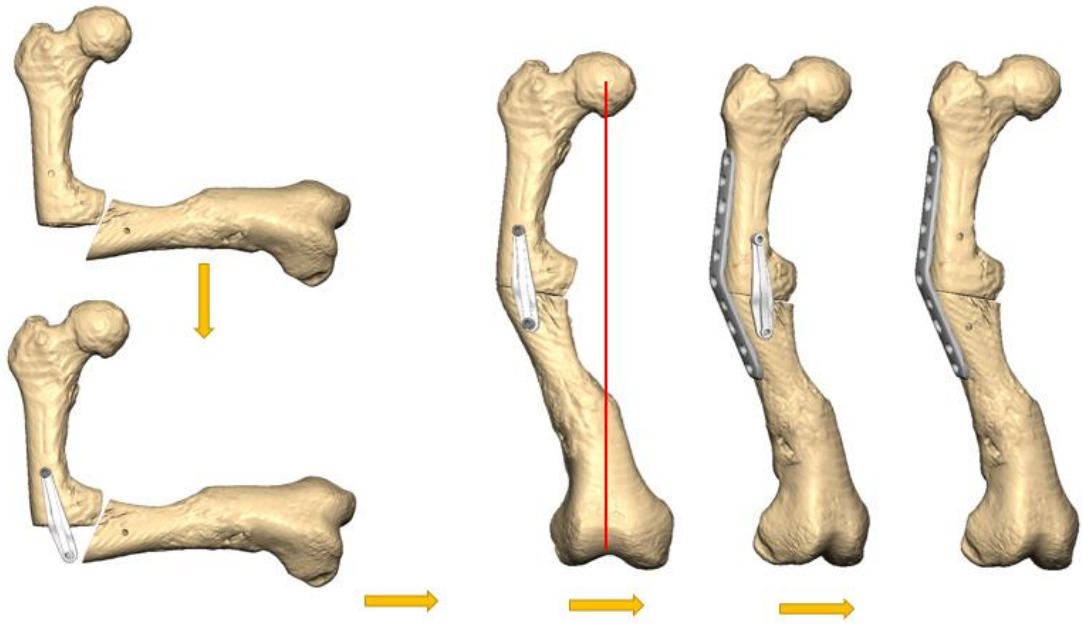
Rezekcijai atlikti skirti instrumentai yra tvirtinami anatomiškai (pagrindo paviršius atitinka kaulo paviršių) ir mechaniškai (tvirtinami prie kaulo sraigtais arba Kiršnerio vielomis). Rezekcijos personalizuoti chirurginiai instrumentai skirti perkelti priešoperacinio planavimo metu chirurgo nustatytą rezekcijos (nupjovimo) liniją į procedūros aikštelę. Rezekcijos metu pašalinama organo dalis, kuri yra apimta naviko, pažeista ligos, kai reikia taisyti įgytą deformaciją (pvz. nejudrų sąnarį, ydingą galūnės padėtį) ar šalinti anomaliją (žr. 1.13 pav.).



1.13 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas, nustatantis pjovimo liniją

c) Personalizuoti pozicionavimo chirurginiai instrumentai:

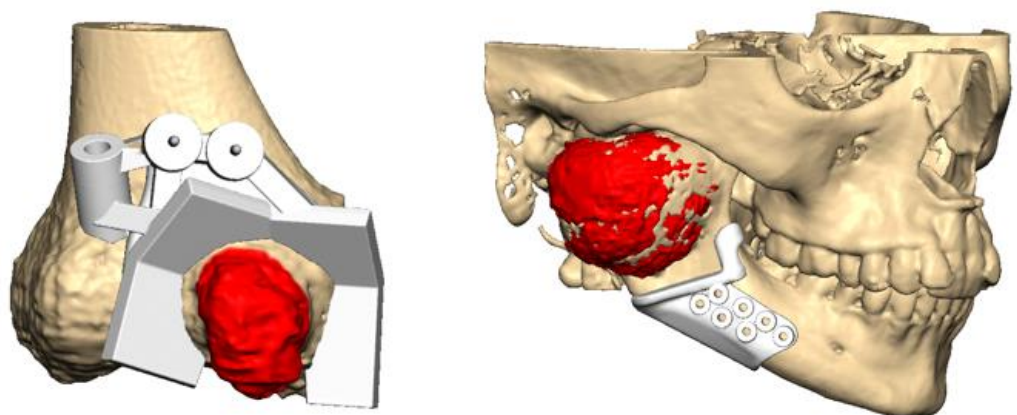
Pozicionavimui skirti personalizuoti chirurginiai instrumentai yra tvirtinami anatomiškai (pagrindo paviršius atitinka priešoperacinio planavimo metu pozicijuoto kaulo paviršių) ir mechaniškai (tvirtinami prie kaulo sraigtais arba Kiršnerio vielomis). Pozicionavimo instrumentai skirti priešoperacinio planavimo metu chirurgo nustatytų sujungimo vietų sujungimui (žr. 1.14 pav.).



1.14 pav. Personalizuotas chirurginis instrumentas, atliekantis kaulo pozicionavimo funkciją

d) Personalizuoti kombinuoti chirurginiai instrumentai:

Rezekcijai ir gręžimui skirti personalizuoti chirurginiai instrumentai yra tvirtinami anatomiškai (pagrindo paviršius atitinka kaulo paviršių) ir mechaniškai (tvirtinami prie kaulo sraigtais arba Kiršnerio vielomis). Kombinuoti instrumentai atlieka tiek gręžimui, tiek rezekcijai aukščiau išvardintas funkcijas, dažniausiai yra naudojami, kai tarp rezekcijos sienelių ir gręžimo vietų yra tiesioginė sąsaja ir ribota darbo zona (žr. 1.15 pav.).



1.15 pav. Personalizuoti chirurginiai instrumentai, atliekantys keletą funkcijų.

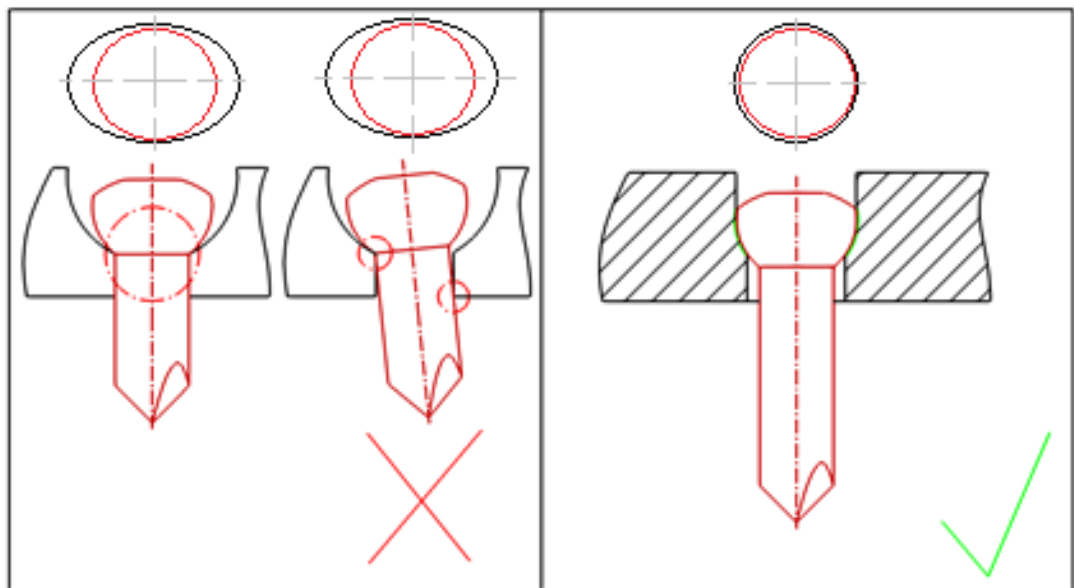
1.4. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ GAMYBOS PROBLEMATIKA

Personalizuotų chirurginių instrumentų mokslinės literatūros analizės metu nustatytas šių instrumentų gamybos metodas - 3D spausdinimas. Sparčiosios gamybos technologijos turi keletą veiksnių, kurie neleidžia užtikrinti šių instrumentų tikslumo. Šių procesų metu atsiranda paklaida:

- detalių sluoksniavimo,
- detalių pozicionavimo,
- greito detalių vėsimo.

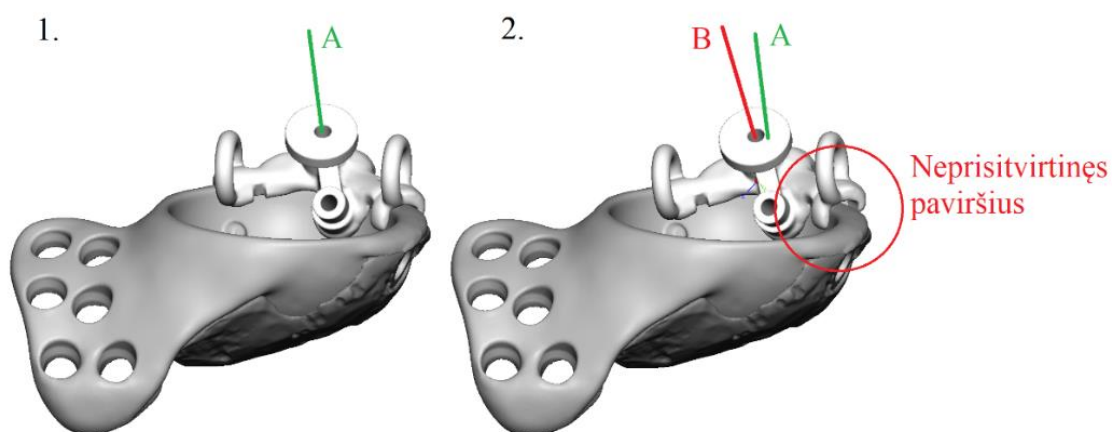
Sluoksniavimo paklaidos galima išvengti įvertinus sluoksniavimo metodą. Šio proceso metu bandinio sluoksnių kraštai nekerta CAD modelio kraštinės, dėl to atspausdintas bandinys automatiškai tampa mažesnis. Sluoksniavimo paklaidos galima išvengti bandinį padidinus 0,05 mm. Greito temperatūrų pokyčio paklaidos galima išvengti vėsimo procesui skiriant daugiau laiko. Vėsimą galima pailginti tiek įrengimo gamybos zonoje, tiek pakavimo stotyje.

Sudėtingiausia paklaida – pozicionavimo. Ši paklaida dažniausiai atsiranda cilindrinėse detalių zonose. Didžiausia problema ta, jog sparčiųjų gamybos technologijų metodu gaminami cilindrai dažniausiai praranda savo cilindriškumą ir tampa elipsės formos skylėmis (žr. 1.16 pav.). Tam, kad šios paklaidos išvengtume, reikia nustatyti, kaip pozicijuoti personalizuotą chirurginį instrumentą gamybos platformoje, kad instrumento kreipiančiosios išlaikytų reikiamą skersmenį ir cilindriškumą.



1.16 pav. Kairėje netinkama elipsės formos skylė. Dešinėje tinkama apskritimo formos skylė

Jeigu personalizuoto chirurginio instrumento apatinė dalis, kuri kontaktuoja su paviršiumi, yra didesnė, nei numatyta, instrumentas gali neužsifikuoti tinkamai ir klibėdamas gręžimo metu grąžtą nukreipti netinkamai. Tam, kad išvengtume šios paklaidos reikia nustatyti, kiek procentų bandinys atitinka CAD modelio paviršiaus. Žinant paviršių skirtumą, galima nustatyti, kokį tarpelį reikia palikti tarp implanto ir personalizuoto chirurginio instrumento (žr. 2.9 pav.).



2.9 pav. 1. Tinkamai užsifiksavęs personalizuotas chirurginis instrumentas, A – Suplanuota gręžimo trajektorija. 2. Pakibęs ir netinkamai užsifiksavęs personalizuotas chirurginis instrumentas. A- Suplanuota gręžimo trajektorija, B – Netinkama gręžimo trajektorije

2. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ TYRIMAS

Personalizuoti chirurginiai instrumentai modeliuojami naudojant projektavimo programines įrangas, remiantis chirurgų nurodytomis rezekcijos linijomis ir gręžimo ašis. Personalizuoti chirurginiai instrumentai privalo būti pagaminti iš biologiškai suderinamos medžiagos, taip pat turi būti suderinamos su personalizuotų implantų medžiaga. Personalizuoti implantai gaminami iš Ti6Al4V. Šis titano lydinys yra suderinamas su nailonu PA2200. Taip pat nailonas PA 2200 naudojamas sparčiosios gamybos technologijoje. Ši gamybos technologija puikiai tinka neparametrinių ir liaunų detalių gamybai, nes tradiciškos gamybos būdais personalizuotus chirurginius instrumentus pagaminti būtų sunku arba neįmanoma.

Personalizuotas chirurginis instrumentas turi pereiti visus gamybos etapus (žr. 2.1 pav).

1. Etapas – modeliavimas, .stl formato modelio sukūrimas, atliekamas parametrinių ir neparametrinių programinių įrangų pagalba. 2. Etapas – modelio pozicionavimas gamybos platformoje. 3. Etapas – sparčioji gamyba (sparčioji gamyba susideda iš 3D spausdinimo, atvėsimo, valymo, smėliavimo, plovimo). 4. Etapas – kokybės kontrolė, atliekama kompiuterinio tomografo pagalba.

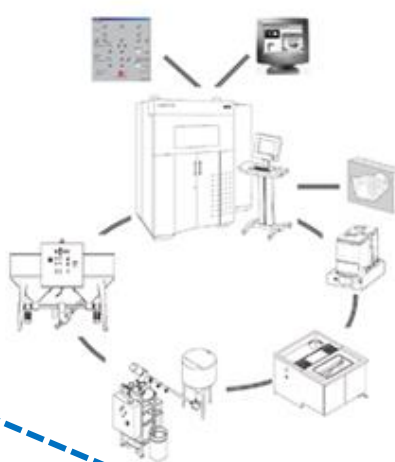
1. Etapas CAD modelio paruošimas



2. Etapas Modelio pozicionavimas



3. Etapas Sparčioji gamyba



4. Etapas Kokybės kontrolė



2.1 pav. Personalizuotų chirurginių instrumentų gamybos etapai

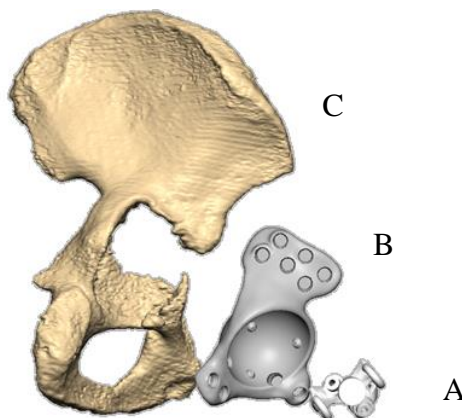
2.1. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ MODELIŲ PROJEKTAVIMAS

Modeliavimas yra atliekamas naudojant virtualaus modeliavimo sistemą, susidedančią iš aparatinės įrangos Geomagic® Touch™ X device (žr. 2.2 pav.) ir programinės įrangos Freeform® Plus System. Aparatinė įranga naudojama modeliuojant personalizuotus implantus. Liečiant virtualaus kaulo paviršių, sukuriamas personalizuotas chirurginis instrumentas, kurio paviršius atitiks kaulo paviršių. Dėl to instrumentas puikiai pozicionuojasi operacijos metu, taip sutrumpindamas operacijos trukmę.



2.2 pav. Aparatinė įranga Geomagic® Touch™ X device [71]

Personalizuotų chirurginių instrumentų modeliavimas pradedamas, kai sukuriamas 3D kaulo modelis iš kompiuterinės tomografijos vaizdų. Jeigu personalizuoti chirurginiai instrumentai gaminami tos pačios komplektacijos kaip ir personalizuoti implantai, pirmiausia sumodeliuojamas implantas ir tik vėliau projektuojamas personalizuotas chirurginis instrumentas (žr. 2.3 pav.).



2.3 pav. A – Personalizuotas chirurginis instrumentas, B – personalizuotas gūžduobės implantas, C – Dubens kaulas

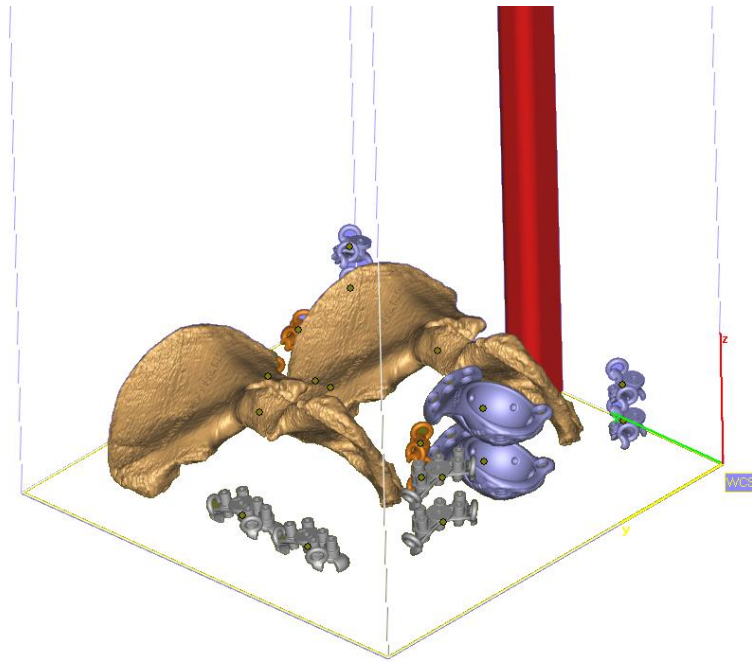
Priešoperacinio planavimo ir modeliavimo metu, jeigu operuojantis chirurgas pageidauja, turimas kaulo defektas yra pašalinamas kaulo rezekcijos metodu. Dalis kaulo išimama. Rezekcijos plokštumos nustatomos bendradarbiaujant su operuojančiu chirurgu. Žinant plokštumas, kurios bus naudojamos pjūviui, modeliuojamos kreipiančiosios sienelės. Kad sienelės rezekcijos metu nevirpėtų, modeliuojamos standumo briaunos. Taip pat abi sienelės sujungiamos su personalizuoto chirurginio instrumento pagrindu, kuris modeliuojamas kopijuojant kaulo paviršių ir vėliau apkarpomus. Personalizuotas chirurginis instrumentas turi būti tvirtinamas prie kaulo mechaniškai. Modeliavimo metu ne tik sukuriamas personalizuoto chirurginio instrumento modelis, bet ir sukuriama priešoperacinio planavimo eiga. Pirmiausia operacijos eiga patikrinama virtualiai, tik paskui patvirtinama, kad personalizuotas chirurginis instrumentas yra tinkamas ir tiksliai atkartos grėžimą tikroje operacijoje.

Jeigu operuojantis chirurgas nepageidauja, personalizuoto rezekcijos chirurginio instrumento iškart po implanto modeliavimo, projektuojami personalizuoti grėžimo chirurginiai instrumentai, skirti implanto tvirtinimui ir pozicionavimui. Šių instrumentų modeliavimas pradamas nuo grėžimo kreipiančiųjų kūrimo, vėliau modeliuojamas pagrindas ir standumo briaunos. Rankenėlės ir įtvirtinimo plokštuma modeliuojamos, kai patvirtinamas pradinis personalizuoto chirurginio instrumento dizainas. Personalizuoti grėžimo chirurginiai instrumentai prie implanto tvirtinami mechaniškai, nenaudojant nei sraigčių, nei Kiršnerio vielų, dėl to papildomai reikia suprojektuoti tvirtinimosi mechanizmą. Suprojektuotas personalizuotas chirurginis instrumentas pateiktas 2.3 pav. A.

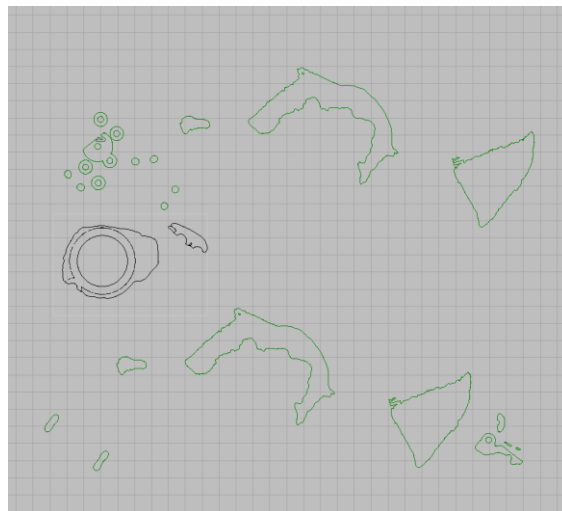
2.2. MODELIŲ PARUOŠIMAS GAMYBAI

Gamybos paruošimas pradamas, kai chirurgas patvirtina galutinį dizainą. Personalizuotų chirurginių instrumentų modeliai įkeliami į Magics 19.0 programinę įrangą (žr. 2.4 pav.). Tuomet modeliai pozicionuojami gamybos platformoje. Atsižvelgiant į modelių paviršių ir žymėjimo vietą, modeliai pozicionuojami taip, kad žymuo būtų nukreiptas Z ašimi. Modelius būtina pozicionuoti taip, kad visos nukreipėjų skylės gautųsi kuo tikslesnės.

Kai personalizuoti chirurginiai instrumentai galutinai patalpinti gamybos platformoje, modelių koordinatės išsaugomos. Tuomet modeliai keliami į sluoksniavimo programinę įrangą RP-tools (žr. 2.5 pav.), kurioje visi modeliai supjaustomi 0,1 mm storio sluoksniais. Šioje programinėje įrangoje patikrinama, ar modeliai tarpusavyje nesiliečia. Modeliai pakartotinai išsaugomi .sli formatu.

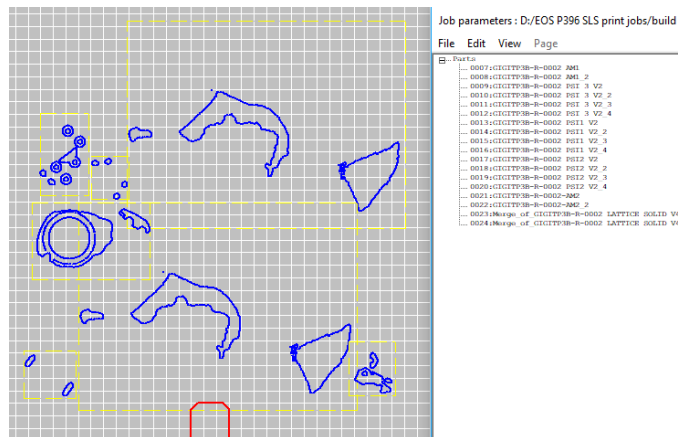


2.4 pav. Personalizuotų chirurginių instrumentų pozicionavimas spausdinimo platformoje.



2.5 pav. Modelių sluoksniai PSW programinėje įrangoje.

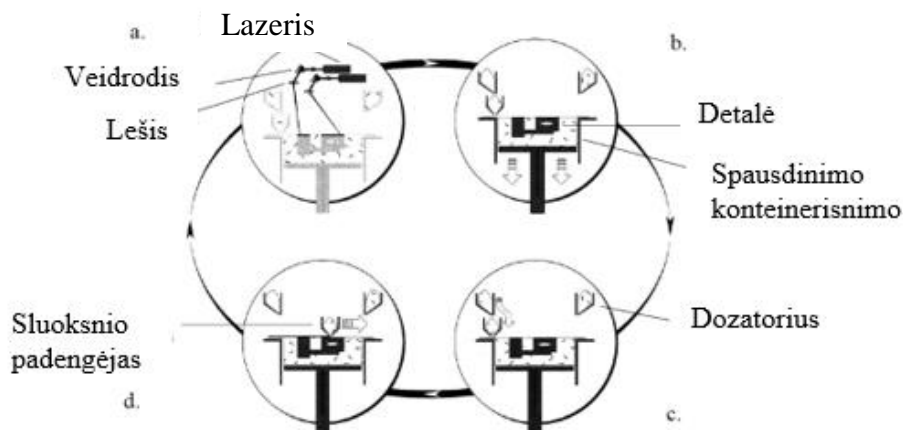
Susluoksniuoti ir patikrinti modeliai įkeliami į spausdintuvo programinę įrangą PSW (žr. 16 pav.). Modeliams parenkami gamybiniai parametrai ir miltelių dozavimas. Patrinkti parametrai išsaugomi .eosjz formatu.



2.6 pav. Modelių sluoksniai PSW programinėje įrangoje

2.3. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ GAMYBA

Parinkus modeliams parametrus, darbo zona privalo būti paruošta gamybos procesui. Spausdinimo platforma padengiama 6 mm miltelių storiu. Vėliau milteliai kaitinami dvi valandas, kol bus pasiekta darbo temperatūra 130 laipsnių, tuo tarpu gamybos konteineryje temperatūra turi pasiekti 170 laipsnių. Pasiekus reikiamą temperatūrą, pradedamas procesas. Padengiami 6 mm miltelių ir pradedamas modelių kepinimas lazeriu (žr. 2.7 pav. a). Lazeriui baigus lydyti vieną sluoksnį, spausdinimo platforma nusileidžia 0,1 mm žemyn (žr. 2.7 pav. b), padengėjas užpildo darbo zoną milteliais (žr. 2.7 pav. c). Padengus miltelius, procesas kartojamas, tuo pat metu dozatorius papildo padengėją milteliais.



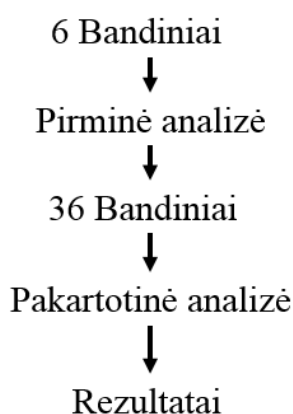
2.7 pav. Sparčiosios gamybos procesas

2.4. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ BANDINIŲ ANALIZĖ

Tyrimas buvo atliktas nuo 2017 m. vasario mėnesio iki 2017 m. lapkričio mėnesio. Tyrimas atliktas Implantų tyrimų ir vystymų centre, UAB Baltic Orthoservice įmonėje.

2.5. ANALIZĖS ORGANIZAVIMAS

Analizei atlikti - pagaminti 42 bandiniai. Pirminei analizei - pagaminti 6 bandiniai žr. 3.4 pav., gamybos ataskaita pateikta A priede. Pakartotinei analizei pagaminti - 36 bandiniai, po 6 bandinius skirtingose 6 gamybos platformose, gamybos ataskaitos pateiktos A priede.



3.1 pav. Tyrimo eigos schema

Tyrimo metu atliktas personalizuotų chirurginių instrumentų projektavimas, gamyba, matavimai ir analizė. Projektavimo metu sumodeliuotas chirurginis instrumentas individualiam klubo gūžduobės sąnario endoprotezavimui, implanto tvirtinimui sraigtais, skylių paruošimui. Pagaminus pirminį modelį pastebėta, jog pozicionavus skirtingai instrumento kreipiančiąsias, jų matmenys skiriasi. Sudarytas tyrimų planas pateiktas žr. 3.1 pav. Pagaminti šeši vienodi, bet skirtingai gamybos platformoje orientuoti bandiniai. Kadangi visų bandinių gauti matmenys buvo skirtingi, gamyba pakartota šešis kartus gaminant šešis vienodus bandinius. Gamybos ataskaitos pateiktos A priede, matavimų ataskaita pateikta B priede.

2.6. Palyginamosios analizės uždaviniai

- 1) Ištirti skirtingai orientuotų personalizuotų instrumentų gręžimo kreipiančiųjų skersmenis.
- 2) Ištirti skirtingai orientuotų personalizuotų instrumentų gręžimo kreipiančiųjų cilindriškumą.
- 3) Palyginti personalizuotų operacinių instrumentų pagamintus bandinius su CAD modeliu.
- 4) Ištirti personalizuoto chirurginio instrumento priglundimą prie pagaminto implanto modelio.

2.7. Palyginamosios analizės metodas

Personalizuotų operacinių instrumentų palyginamoji analizė atliekama nuskenavus personalizuotų operacinių instrumentų bandinius su pramoniniu tomografu. Programine įranga VGStudio MAX 3.0 atliekama virtuali operacija, t.y. išmatuojami bandinių gręžimo kreipiančiųjų skersmenys ir cilindriškumai. Sulyginant kiekvieną nuskenuotą modelį, su CAD modeliu nustatoma skirtingai orientuotų ir bazuotų modelių gamybos paklaida.

2.8. Palyginamosios analizės užduota sąlyga

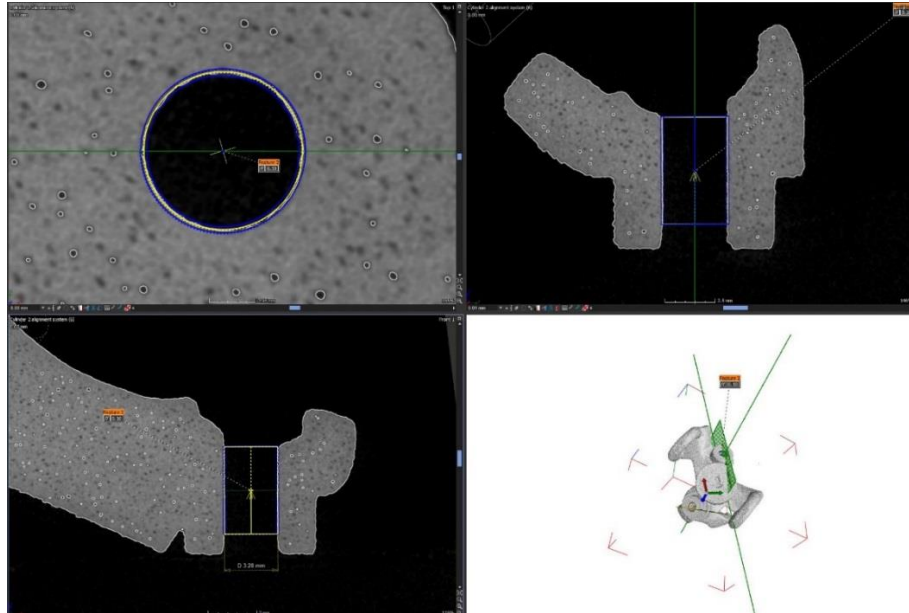
- 1) Priimta, kad leistina skersmens paklaida 0,1 mm;
- 2) Priimta, kad leistinas cilindriškumas 0,1 mm;
- 3) Priimta, kad leistina nuokrypa nuo CAD modelio 5 %;
- 4) Priimta, kad 0,2 mm nuotolis nuo personalizuoto chirurginio instrumento iki implanto yra toleruojamas, bet didesnis nei 0,2 mm – negalimas, kadangi šis atstumas padidina paklaidą gręžimo metu.

2.9. Palyginamosios analizės eiga

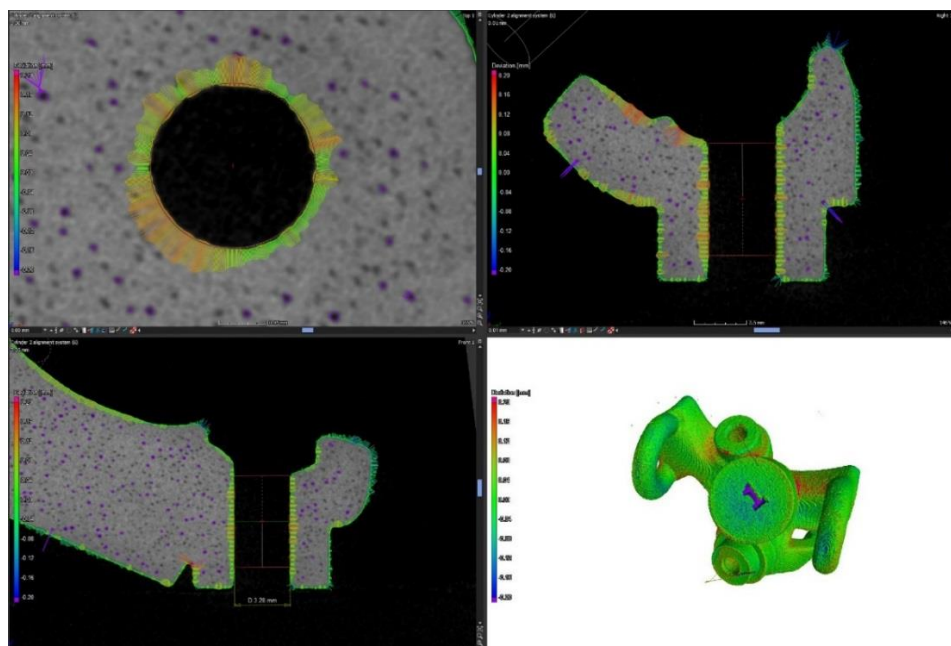
Palyginamosios analizės eigą sudaro šie etapai:

- 1) Bandinys nuskenuojamas;
- 2) Bandinys sulyginamas su CAD modeliu (panaudojama geriausio atitikimo komanda) žr. 3.4 pav.;

- 3) Nustatomas bandinio kreipiančiųjų skersmenys (pažymimi atsitiktinai parinkti 6 taškai, pagal kuriuos nustatomas bandinio skylės skersmuo) žr. 3.3 pav.;
- 4) Nustatomas bandinio kreipiančiųjų cilindriškumas (sukuriamas teorinis cilindras bandinio skylėje ir matuojamas tolimiausias skylės atstumas iki sukurto teorinio cilindro) žr. 3.2 pav.;



3.2 pav. Bandinio gręžimo kreipiančiųjų cilindriškumo matavimas

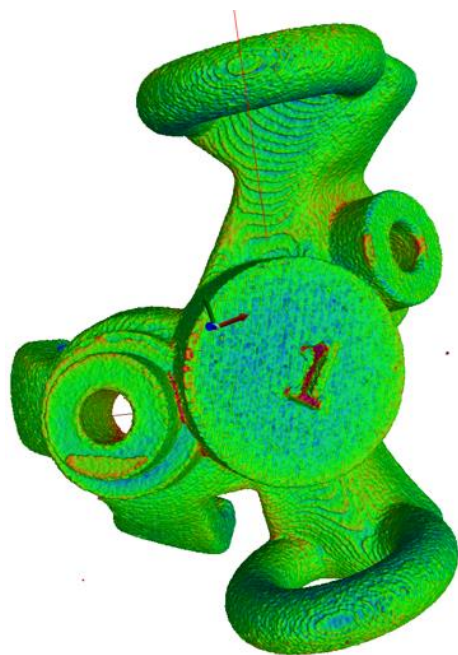


3.3 pav. Bandinio lyginimas su CAD modeliu

5) Gaunama spalvinė palyginamosios analizės diagrama.

Pagamintas bandinys gali būti didesnis arba mažesnis už CAD modelį, todėl spalvinėje diagramoje matomas neatitikimas. Jeigu bandinys yra mažesnis už CAD modelį, ši vieta pažymima mėlyna spalva, jeigu didesnis - raudona.

-0,2 mm  0,2 mm

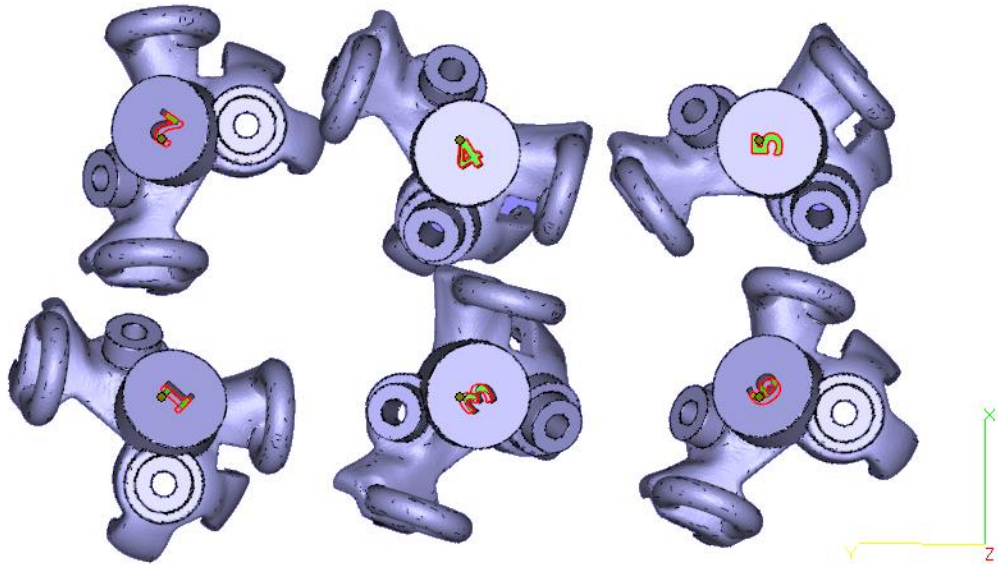


3.4 pav. Bandinio lyginimas su CAD modeliu

Išvardinti veiksmai atliekami su visais personalizuotų instrumentų bandiniais.

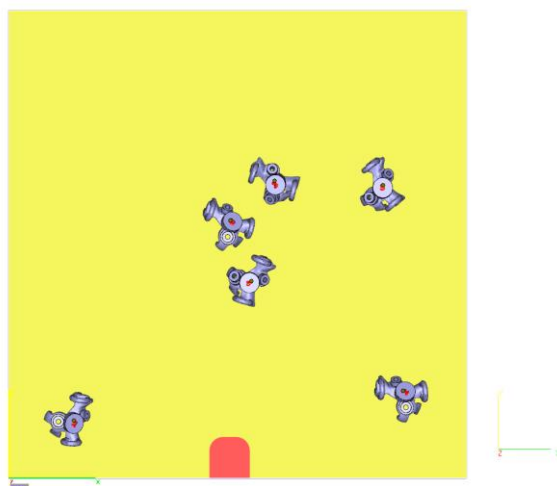
2.10. PALYGINAMOSIOS ANALIZĖS BANDINIAI

Tyrimo metu sumodeliuotas personalizuotas chirurginis instrumentas su dvejomis kreipiančiosiomis, skylėms išgręžti. Šios skylės nėra lygiagrečios, todėl gaminant galima išgauti tik vieną tikslią skylę. Pasak 3D spausdintuvo gamintojų, skylės geriausiai atsispausdina, kai orientuojamos statmenai Z ašies. Visi bandiniai yra kopijos, dėl to CAD modeliai yra identiški ir sunumeruoti žr. 3.5 pav. Papildoma informacija apie bandinius pateikta A priede 1 lentelėje.



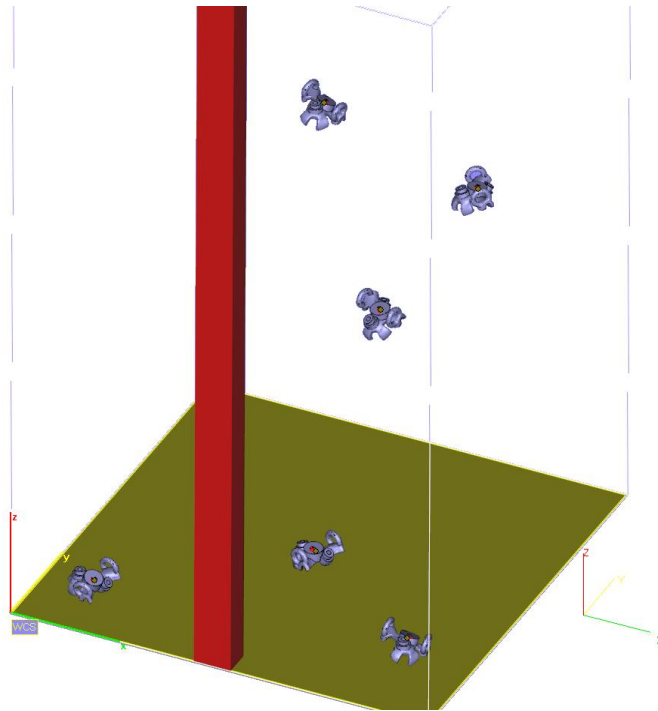
3.5 pav. Palyginamosios analizės bandinių orientavimas

1 personalizuotas chirurginis instrumentas orientuojamas taip, kad pirmoji skylė statmena Z ašiai, antroji skylė nukreipta į X ašį. 2 personalizuoto instrumento pirmoji skylė statmena Z ašiai, antroji skylė nukreipta į Y ašį. 3 personalizuoto instrumento skylės nukreiptos į YZ kampą. 4 personalizuoto instrumento skylės nukreiptos ZX Kampu. 5 personalizuoto instrumento skylės pakreiptos ZXY kampu ir 6 personalizuoto instrumento pirmoji skylė orientuota Z ašimi, o antroji X ašimi žr. 3.6 pav.



3.6 pav. Bandinių pozicionavimas spausdinimo platformoje XY koordinatinių atžvilgiu

Kadangi spausdinimo platformos skirtinguose aukščiuose yra skirtingos temperatūros, kurios taip pat gali turėti įtakos personalizuoto chirurginio instrumento tikslumui, bandiniai išdėstomi skirtinguose aukščiuose ir skirtinguose kampuose. 1, 2 ir 6 personalizuoti chirurginiai instrumentai orientuoti apatinėje spausdinimo platformos dalyje. 4 bandinys orientuotas viduryje. 3, 5 bandiniai orientuoti viršutinėje spausdinimo platformos dalyje žr. 3.7 pav.



3.7 pav. Bandinių pozicionavimas spausdinimo platformoje ZXY koordinačių atžvilgiu

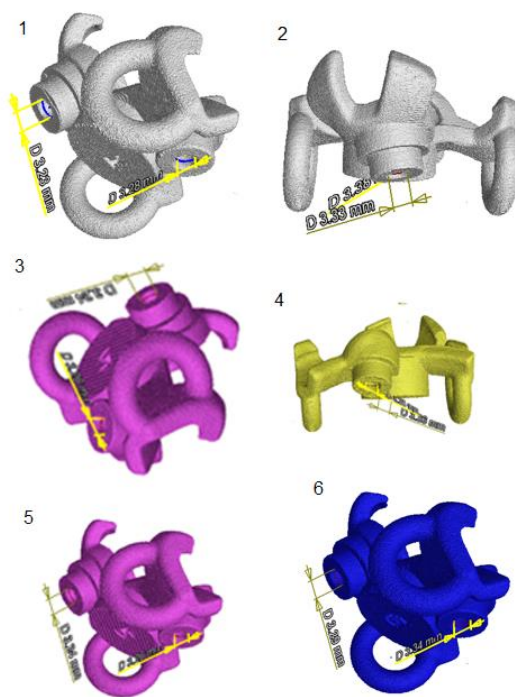
6 bandiniai gaminami 6 kartus, kurių pozicija išlaikoma kuo tikslesnė pirmosios gamybos metu. Iš viso yra 42 bandiniai, spausdinti 7 skirtingose platformose. Papildoma informacija apie bandinius pateikta A priede 2 lentelėje.

3. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ ANALIZĖS REZULTATAI

Personalizuotų chirurginių instrumentų pirminės analizės rezultatai pateikti 3.1 skyriuje. Antrinės analizės rezultatai pateikti 3.2 skyriuje.

3.1. PIRMINĖS ANALIZĖS REZULTATAI

Atlikus pirminę palyginamąją analizę, nustatyti skylių skersmenys (leistinas nuokrypis nuo CAD modelio matmens 0,1 mm žr. 3.8 pav.) ir cilindriškumas (leistinas nuokrypis 0,1 mm) Nustatytas bandinių nukrypimas nuo CAD modelio. 1 Lentelėje pateikti personalizuotų chirurginių instrumentų pirminės analizės bandinių pozicija, orientavimas, skersmens matavimai ir cilindriškumo matavimai.



3.8 pav. Rezultatai po skylių skersmens matavimų

- 1) Bandinio tik pirmosios skylės skersmuo ir cilindriškumas patenka į užduotų sąlygų ribas.

- 2) Bandinio pirmoji skylė atitinka užduotas sąlygas, o antrosios skylės skersmuo yra per didelis.
- 3) Bandinys atitinka skersmens ir cilindriškumo sąlygas.
- 4) Bandinio skylės atitinka tik cilindriškumo sąlygą.
- 5) Bandinio tik antrosios skylės skersmuo atitinka užduotas sąlygas.
- 6) Bandinys pilnai atitinka užduotas sąlygas.

Lentelėje raudona spalva pažymėti matmenys netenkina užduotos sąlygos, matmenys pažymėti žalia spalva tenkina užduotą sąlygą.

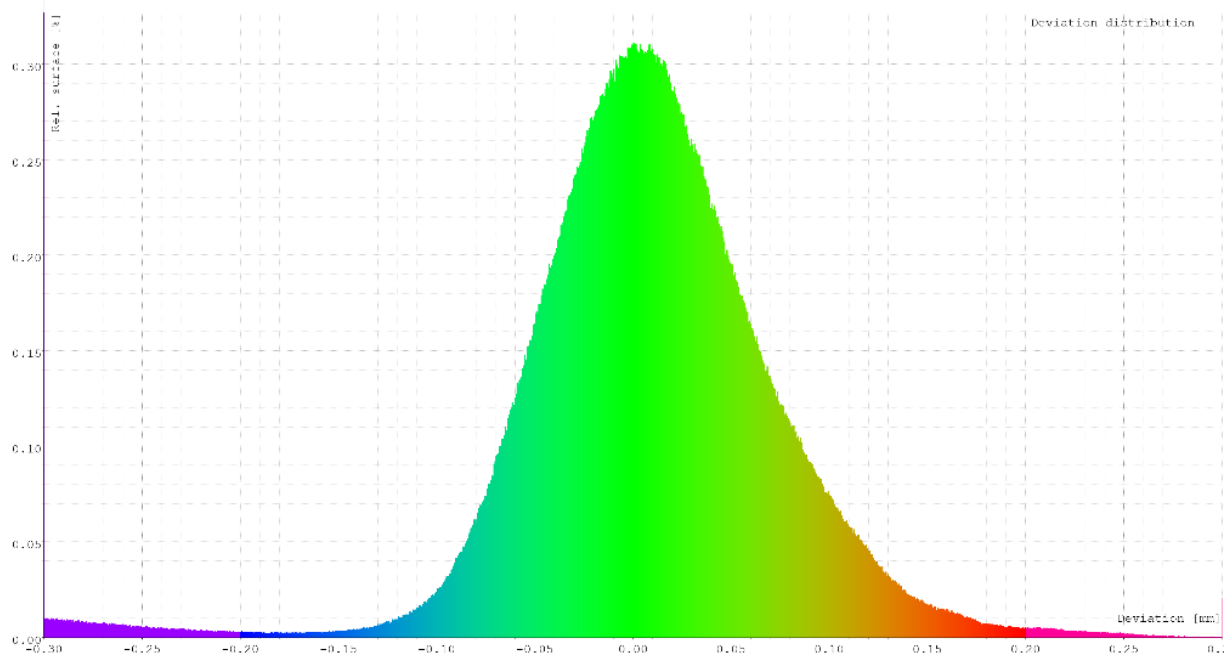
1. Lentelė Pirminės analizės bandinių skylių matavimo rezultatai

Bandinio Nr.	1 Skylės orientavimas	2 Skylės orientavimas	Pozicija spausdinimo platformoje	1 Skylės skersmuo	2 skylės skersmuo	1 Skylės cilindriškumas	2 Skylės cilindriškumas
1	Z	ZX	Apačia	3,28	3,23	0,08	0,11
2	Z	XY	Apačia	3,33	3,38	0,08	0,09
3	ZY	ZY	Vidurys	3,34	3,35	0,09	0,09
4	ZX	ZX	Viršus	3,36	3,38	0,08	0,08
5	ZXY	ZXY	Viršus	3,24	3,26	0,12	0,11
6	Z	ZY	Apačia	3,29	3,34	0,08	0,09

Palyginus personalizuotų chirurginių instrumentų bandinius su CAD modelių, nustatyti neatitikimai. 1 bandinio rezultatai parodyti histogramoje (žr.3.9 pav.). Gautoje histogramoje raudona spalva pažymi, kad bandinys yra didesnis už CAD modelį, mėlyna spalva rodo, jog bandinys yra mažesnis, nei CAD modelis. Jeigu bandinys funkciniam paviršiuje bus didesnis, jis pasikabins ant implanto. Kai bandinys pasviręs, yra tikimybė, kad neužsikabins abejais tvirtinimo elementais, tai reiškia, kad gręžimo kreipiančiosios taip pat bus pasvirusios ir suteiks paklaidą gręžiant.

2. Lentelė Pirminės analizės bandinių lyginimo su CAD modeliu rezultatai

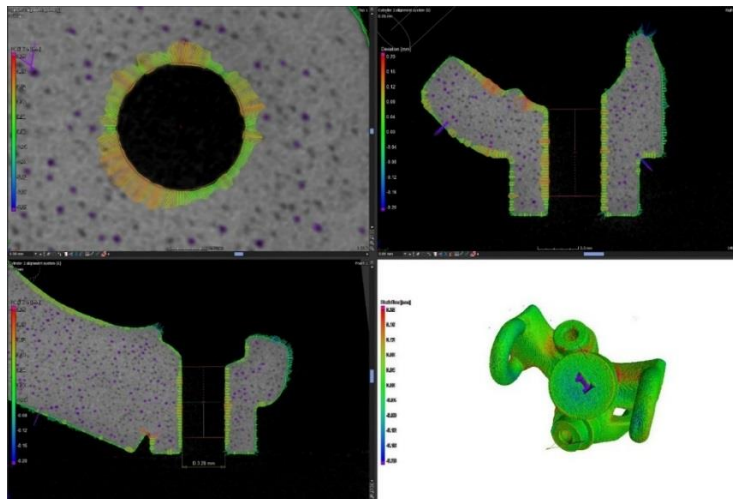
	bandinys 1	bandinys 2	bandinys 3	bandinys 4	bandinys 5	bandinys 6
1 skylės orientavimas	Z	Z	ZY	ZX	ZXY	Z
2 skylės orientavimas	ZX	ZY	ZY	ZX	ZXY	ZY
Spausdinimo vieta	Apačia	Apačia	Vidury	Viršus	Viršus	Apačia
Bandinys = CAD	97%	97%	97%	96%	95%	94%
Bandinys < CAD	1%	2%	2%	3%	2%	3%
Bandinys > CAD	2%	1%	1%	1%	3%	3%



3.9 pav. Bandinių atitikimo su CAD modeliu histograma

Pagal sąlygą bandinys negali būti didesnis arba mažesnis daugiau nei 2 mm. 2 Lentelėje pateikti duomenys, kokia bandinio dalis sutampa su CAD modeliu 0,2 mm ribose.

Visų bandinių palyginimo su CAD modeliu histogramos pateiktos B priede.



3.10 pav. Bandinio lyginimas su CAD modeliu

Nuskenuotas 5 bandinys ant implanto modelio ir išmatuoti atstumai tarp modelių. Paveiksle parodytas bandinio pirmos skylės pjūvis. Kairėje, kaip ir buvo numatyta, instrumento kreipiančiosios pozicionavimo elementas remiasi implanto viršuje, tačiau dešinėje bandinys su implantu remiasi skylės viduje. Tarpai tarp personalizuoto chirurginio instrumento ir implanto modelio 0,19 mm. Salyga tenkinama, rezultatai neviršija 0,2 mm ribos žr. 3.11 pav.

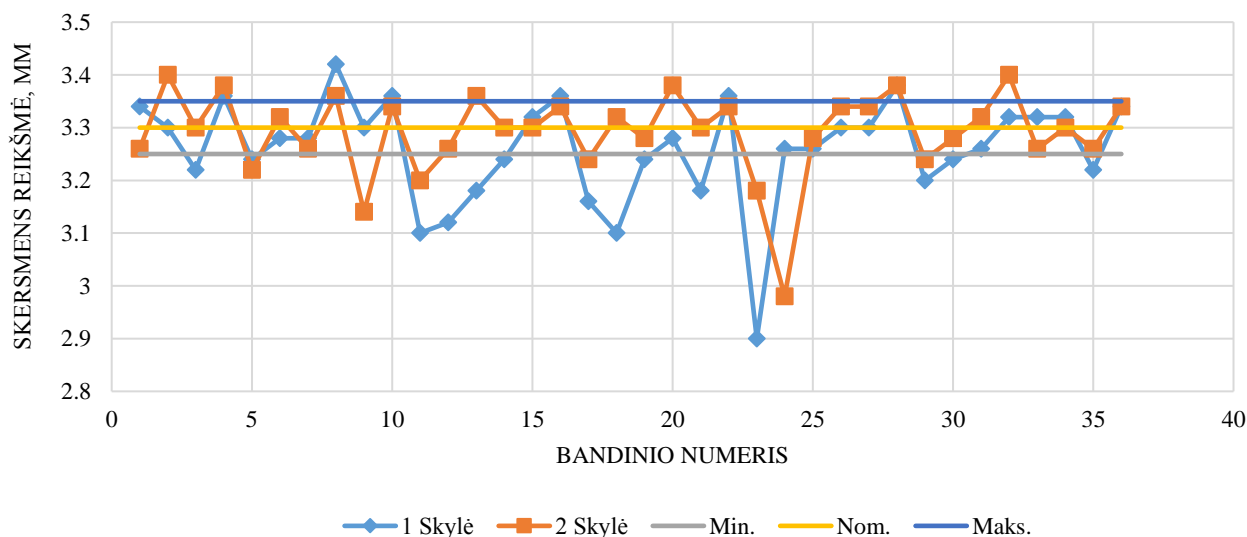


3.11 pav. Implanto ir personalizuoto chirurginio instrumento fiksacijos matavimas

3.2. PAKARTOTINĖS ANALIZĖS PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ BANDINIŲ SKYLIŲ SKERSMENS MATAVIMŲ REZULTATAI

Pakartotinės analizės bandinių matavimų rezultatai pateikti B priede. Pagal nurodytą sąlygą, nustatytos mažiausia ir didžiausia riba, tarp kurių bandiniai patenka į tinkamų bandinių intervalą. Mažiausia reikšmė – 3.25 mm, didžiausia reikšmė - 3.35 mm. Visų pakartotinės analizės bandinių skersmens matavimų rezultatai pateikti 3.12 pav. Bandinių skersmenų reikšmės išsidėsčiusios 2.9 mm - 3.4 mm intervale. Vienuolikos (30 proc.) bandinių abiejų skylių skersmenys yra tinkami. Aštuonių (23 proc.) bandinių abiejų skylių skersmenys nepatenka į tinkamų bandinių intervalą. Septyniolikos (47 proc.) bandinių bent viena skylė netenkina tinkamų bandinių sąlygos. Blogiausi bandiniai pagaminti trečioje ir ketvirtoje platformoje (13-24 bandiniai). Geriausi bandiniai pagaminti pirmoje ir šeštoje platformoje (1-6 ir 30-36 bandiniai).

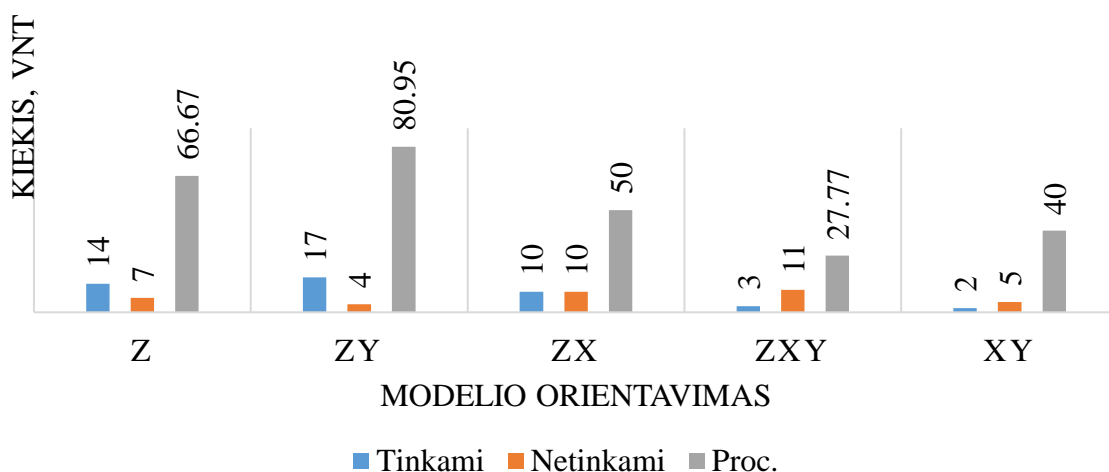
BANDINIŲ SKERSMENS MATAVIMŲ REZULTATAI



3.12 pav. Bandinių skersmens matavimų rezultatai

Skirtingai orientuotų 42 bandinių skylių rezultatai pateikti 3.13 pav. Mėlyna spalva nurodo bandinius, tenkinančius užduotą sąlygą, oranžinė spalva nurodo bandinių skaičių netenkinančių sąlygą, pilka spalva nurodo procentinę bandinių dalį tenkinančių užduotą sąlygą. 17 iš 21 bandinių, kurių skersmenys tiksliausi orientuoti ZY kryptimi (80.95 proc.). 3 iš 14 netiksliausi bandiniai orientuoti ZXY kryptimi (27.77 proc.). Bandiniai, kurie orientuoti Z kryptimi, skylių, tenkinančių sąlygą dvigubai daugiau, nei netenkinančių sąlygą (14 iš 21 tenkina). Bandiniai orientuoti ZX kryptimi 10 iš 20 (50 proc.) netenkina užduotos sąlygos.

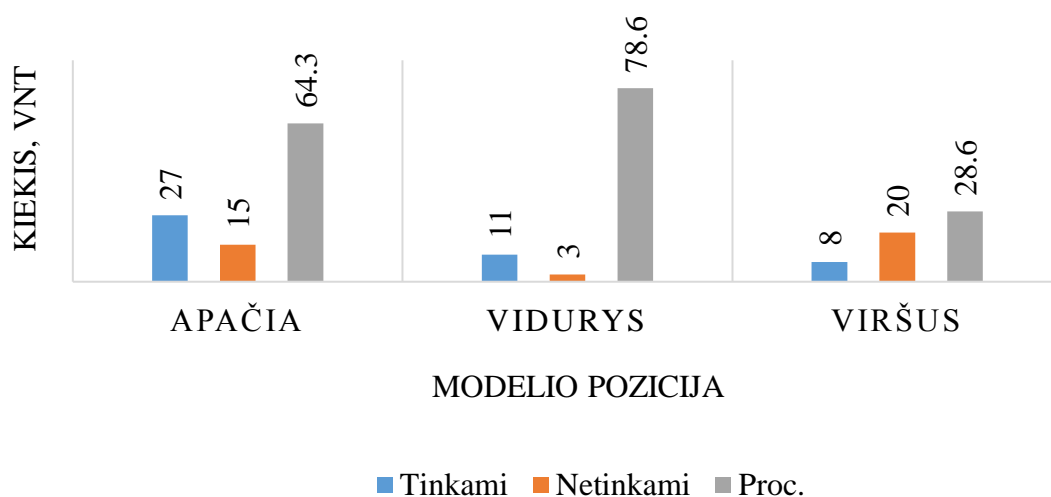
BANDINIŲ SKYLIŲ SKERSMENS MATAVIMŲ REZULTATAI PAGAL MODELIO ORIENTAVIMĄ



3.13 pav. Bandinių skylių skersmens matavimų rezultatai pagal modelio orientavimą

42 Bandinių skylių skersmens matavimų rezultatai, pagal modelio poziciją gamybos platformoje, pateikti 3.14 pav. Tiksliausias bandinių skersmenis pavyko gauti, kai bandiniai gamybos platformoje orientuoti viduryje ~310 mm aukštyje, 11 iš 14 skylių tenkina užduotą sąlygą (78.6 proc.). Bandiniai, kurie buvo orientuoti platformos apačioje ~20 mm aukštyje 27 iš 42 (64.3 proc.) skylių tenkina užduotą sąlygą. Tačiau bandiniai, kurie orientuoti 48 mm aukštyje tik 8 iš 28 (28.6) skylių tenkina užduotą sąlygą.

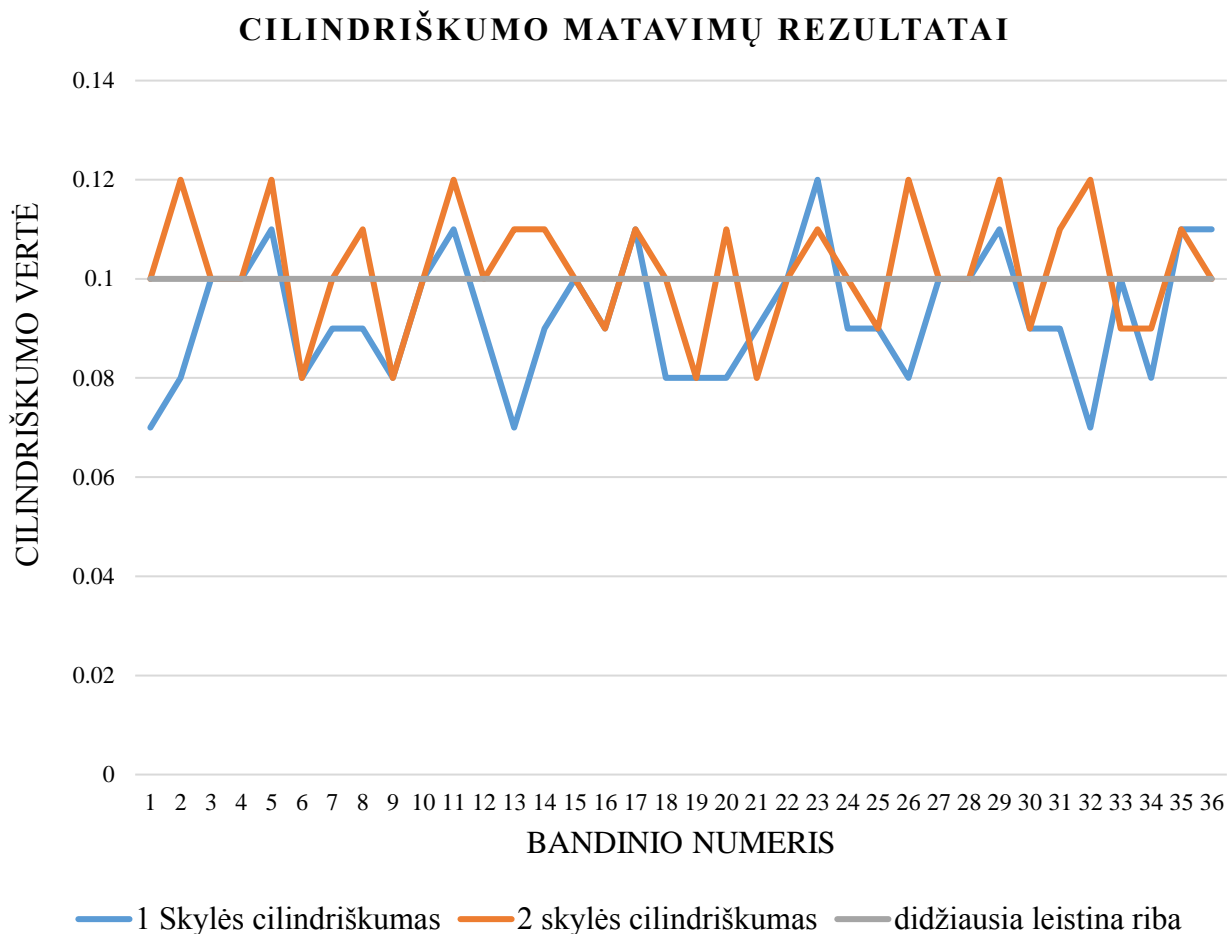
BANDINIŲ SKYLIŲ SKERSMENS MATAVIMŲ REZULTATAI PAGAL MODELIO POZICIJĄ



3.14 pav. Bandinių skylių skersmens matavimų rezultatai pagal modelio poziciją gamybos platformoje

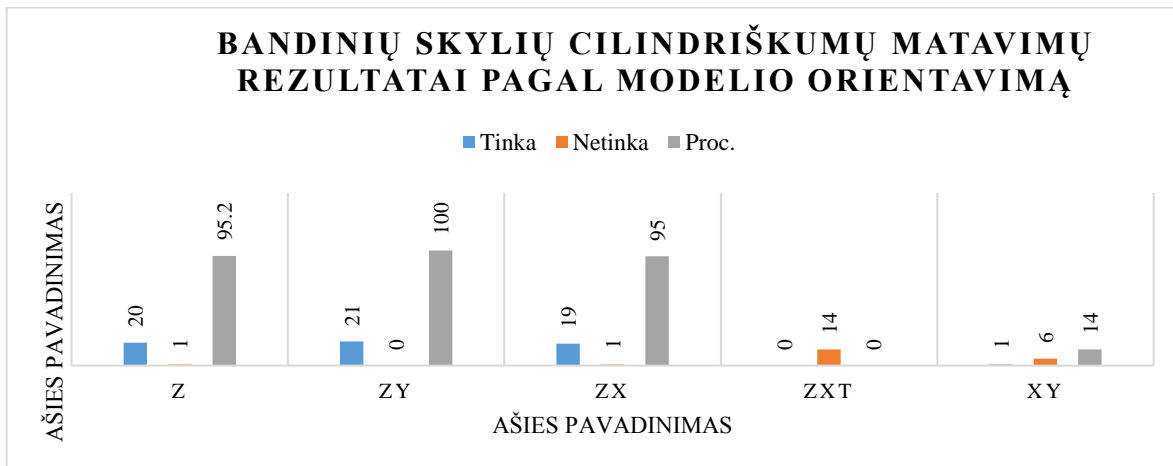
3.3. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ CILINDRIŠKUMO MATAVIMŲ REZULTATAI

36 Bandinių skylių cilindriškumą matavimų rezultatai pateikti 3.15 pav. Didžiausia leistina bandinių cilindriškumą reikšmė 0,1. Pirmosios bandinių skylės 29 iš 36 (80,8 proc.) tenkina cilindriškumo sąlygą. Antrosios bandinių skylės 22 iš 36 (61 proc.) tenkina cilindriškumo sąlygą. Iš 72 skylių cilindriškumo sąlygos netenkina 21 skylė (29 proc.). Tiek blogi, tiek geri bandiniai tolygiai pasiskirstė visose spausdinimo platformose.



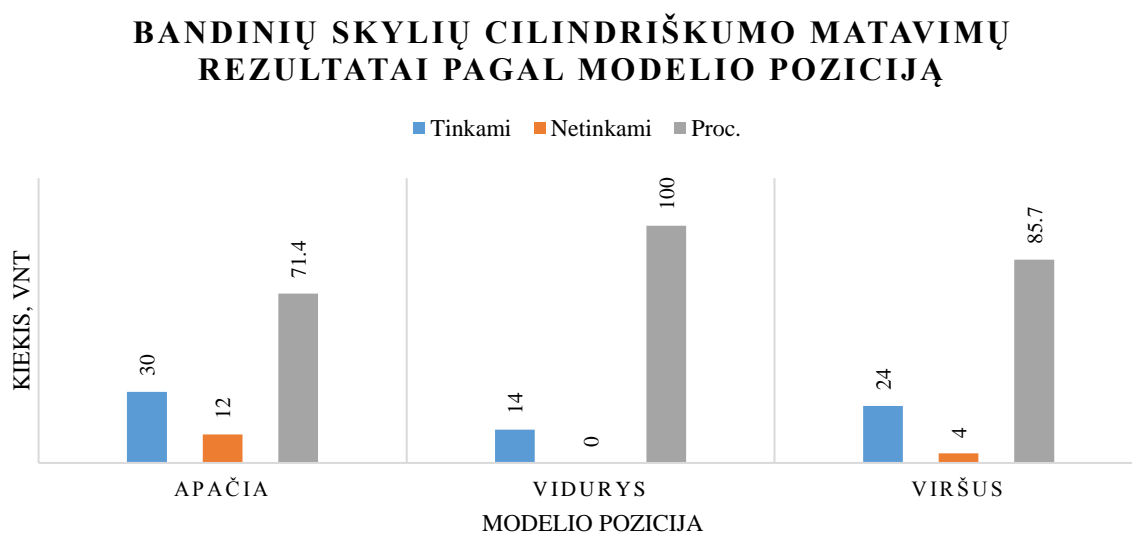
3.15 pav. Bandinių cilindriškumą matavimo rezultatai

42 Bandinių skylių cilindriškumo matavimų rezultatai pagal modelio orientavimą gamybos platformoje pateikti 3.16 pav. Geriausi rezultatai pasiekti, kuomet bandinių skylės orientuotos ZY kryptimi 21 iš 21 (100 proc.) skylės tenkina cilindriškumo sąlygą. Tačiau, blogiausi rezultatai gauti, kuomet skylės orientuotos ZXY kryptimi 0 iš 14 (0 proc.) bandiniai tenkina užduotą cilindriškumo sąlygą. Kuomet bandiniai orientuojami Z arba ZX kryptimis, skylės ~95 proc. tenkina cilindriškumo sąlygą. Tačiau orientuojamos XY kryptimi tik 1 iš 6 (14 proc.) cilindriškumo sąlyga išpildoma.



3.16 pav. Bandinių skylių cilindriškumo matavimų rezultatai pagal modelio orientavimą gamybos platformoje

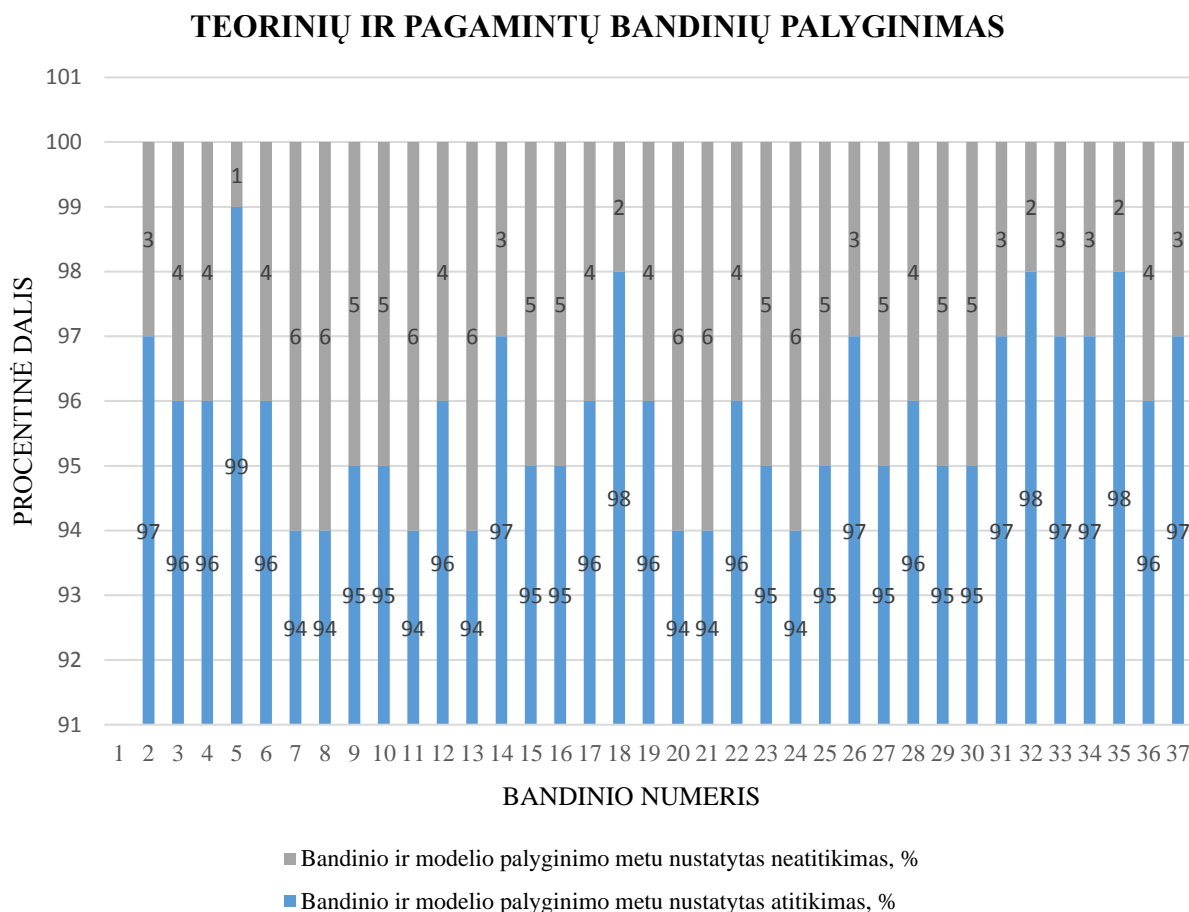
42 Bandinių skylių cilindriškumo matavimų rezultatai pagal modelio poziciją gamybos platformoje pateikti 3.17 pav. Geriausi bandinių cilindriškumai gauti, kuomet bandiniai pozicijuojami gamybos platformos viduryje 14 iš 14 (100 proc.) bandiniai tenkina užduotą sąlygą. Blogiausias rezultatas pasiektas, kuomet bandiniai orientuojami apačioje 30 iš 42 bandinių (71.4 proc.) tenkina sąlygą. Bandiniai, kurie pozicijuoti viršuje, 85.7 proc. yra geri.



3.17 pav. Bandinių skylių cilindriškumo matavimų rezultatai pagal modelio poziciją gamybos platformoje

3.4. PERSONALIZUOTŲ CHIRURGINIŲ INSTRUMENTŲ TEORINIŲ IR PAGAMINTŲ BANDINIŲ PALYGINIMAS

Teorinių ir pagamintų bandinių palyginimo rezultatai pateikti 3.18 pav. Bandiniai, kurių 95 procentai sutampa su teoriniu modeliu tenkina užduotą sąlygą. 29 bandiniai iš 36 (80,5 proc.) tenkina užduotą sąlygą. 7 iš 36 (19,5 proc.) yra netinkami.

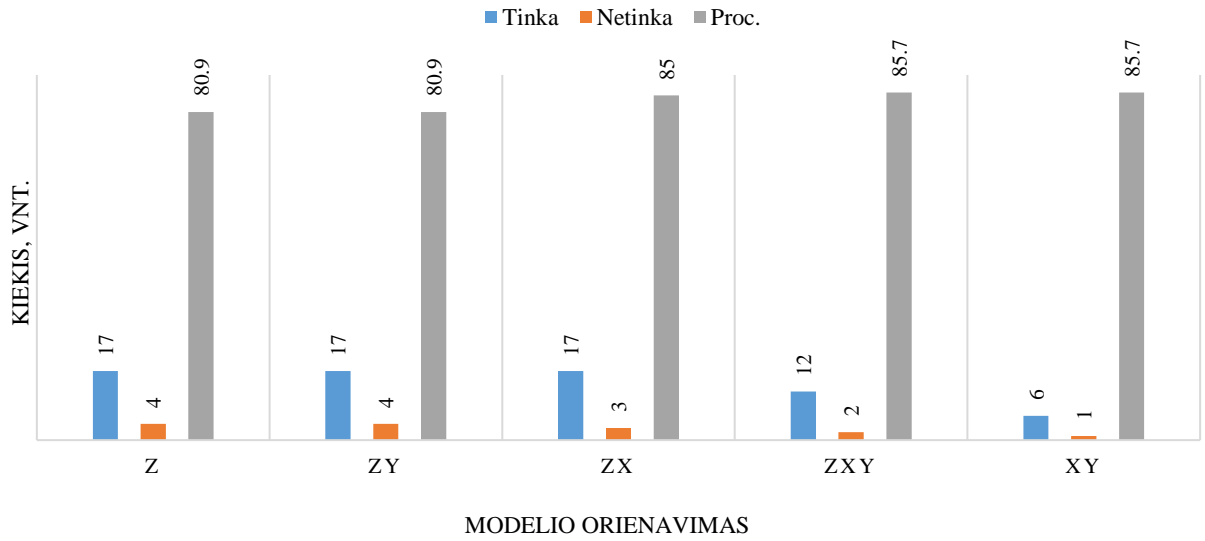


3.18 pav. Teorinių ir pagamintų bandinių palyginimas

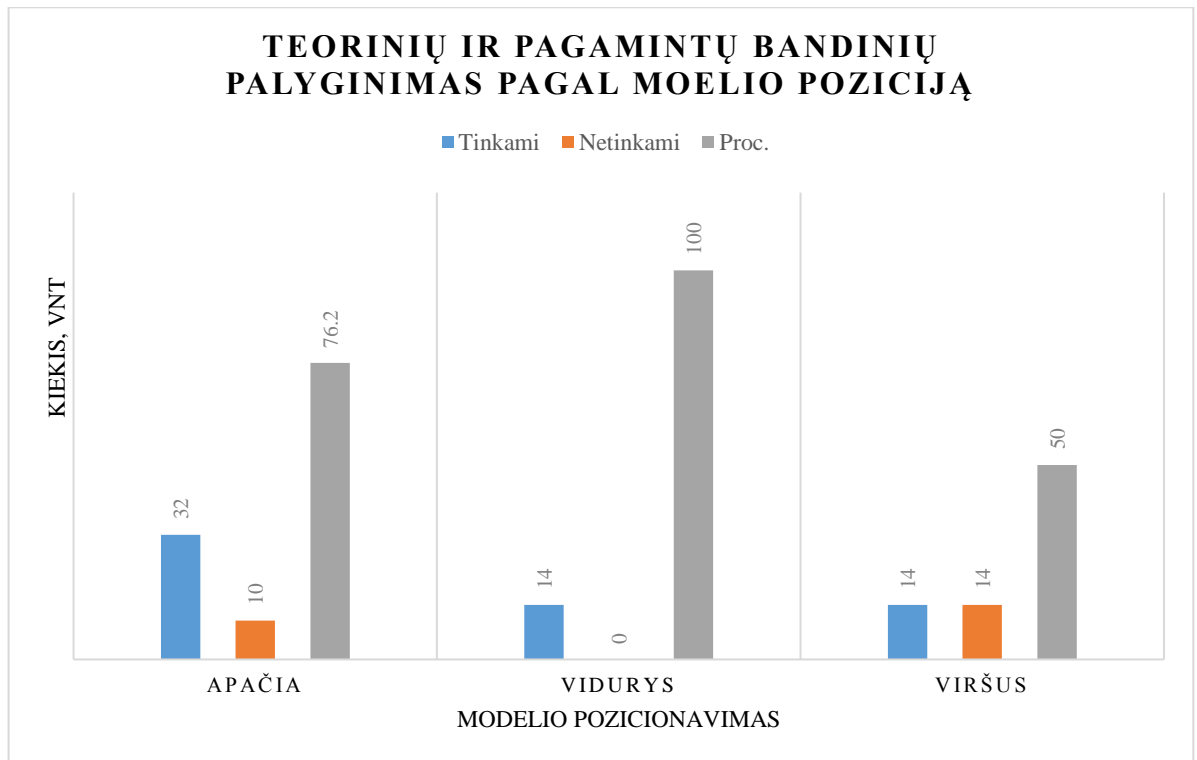
Teorinių ir 42 pagamintų bandinių palyginimo pagal modelių orientavimą palyginimo rezultatai pateikti 3.19 pav. Geriausias rezultatas pasiektas, kuomet skylės orientuojamos ZXY ir XY kryptimi (85,7 proc.) tenkina užduotą sąlygą. Blogiausi rezultatai pasiekti, kuomet skylės orientuojamos Z ir ZY kryptimi (80,9 proc.). Visi rezultatai patenka į 80,9 – 85,7 proc. intervalą.

Teorinių bandinių palyginimo su 42 pagamintais bandiniais pagal skylių poziciją rezultatai pateikti 3.20 pav. Geriausi bandinių rezultatai gauti, kuomet bandiniai pozicionuojami gamybos platformos viduryje 14 iš 14 (100 proc.) bandiniai tenkina užduotą sąlygą. Blogiausias rezultatas pasiektas kuomet bandiniai orientuojami viršuje 14 iš 28 bandinių (50 proc.) tenkina sąlygą. Bandiniai, kurie pozicionuoti apačioje 76,2 proc. yra geri.

TEORINIŲ IR PAGAMINTŲ BANDINIŲ Palyginimas pagal Modelių Orientavimą



3.19 pav. Bandinių palyginimo matavimų rezultatai pagal modelio orientavimą gamybos platformoje



3.20 pav. Bandinių palyginimo rezultatai pagal modelio poziciją gamybos platformoje

IŠVADOS

1. Atlikta personalizuotų chirurginių instrumentų mokslinės literatūros apžvalga. Išanalizuota 80 mokslinių publikacijų. Atlikta instrumentų klasifikacija. Nustatytas gamybos pobūdis ir reikalavimai modeliams. Išskirtos sritys, kuriose naudojami personalizuoti chirurginiai instrumentai. Nustatyta gamybos problematika.

2. Atlikas personalizuotų chirurginių instrumentų projektavimas, naudojant neparimetrinę projektavimo įrangą FreeForm modeling Plus. Suprojektuotas personalizuotas chirurginis instrumentas gūžduobės implanto pozicionavimui.

3. Pirminės analizės metu sparčiųjų prototipų gamybos metodu pagaminti 6 personalizuotų chirurginių instrumentų bandiniai. Antrinės analizės metu pagaminti 36 personalizuotų chirurginių instrumentų bandiniai.

4. 42 bandiniai nuskenuoti pramoniniu kompiuteriniu tomografu. Matavimai atlikti programine įranga VGStudio MAX 3.0.

5. Atlikta personalizuotų chirurginių instrumentų palyginamoji analizė:

5.1. Išmatuoti 42 skirtingai orientuoti personalizuotų chirurginių instrumentų bandinių skersmenys ir nustatyta, kad:

5.1.1. bandinių skersmenų reikšmės išsidėsčiusios 2.9 mm - 3.4 mm intervale. 11 iš 42 bandinių (30 proc.) abiejų skylių skersmenys yra tinkami. 8 iš 42 bandinių (23 proc.) abiejų skylių skersmenys nepatenka į tinkamų bandinių intervalą. 17 iš 42 (47 proc.) bandinių bent viena skylė netenkina tinkamų bandinių sąlygos.

5.1.2. 17 iš 21 bandinių, kurių skersmenys tiksliausi, orientuoti ZY kryptimi (80.95 proc.). Netiksliausi bandinių skersmenys orientuoti ZXY kryptimi 3 iš 14 (27.77 proc.).

5.1.3. Tiksliausius bandinių skersmenis pavyko gauti, kai bandiniai gamybos platformoje orientuoti viduryje ~310 mm aukštyje, 11 iš 14 skylių tenkina užduotą sąlygą (78.6 proc.). Tačiau bandiniai, kurie orientuoti 48 mm aukštyje tik 8 iš 28 (28.6) skylių tenkina užduotą sąlygą.

5.2. Išmatavus 42 skirtingai orientuotus personalizuotų chirurginių instrumentų bandinių cilindriškumus nustatyta, kad:

5.2.1. Alikus analizę, pirmosios bandinių skylės 29 iš 36 (80,8 proc.) tenkina cilindriškumo sąlygą. Antrosios bandinių skylės 22 iš 36 (61 proc.) tenkina cilindriškumo sąlygą.

5.2.2. Atlikus analizę pagal skylių orientavimą, geriausi rezultatai pasiekti, kuomet bandinių skylės orientuotos ZY kryptimi 21 iš 21 (100 proc.) skylės tenkina cilindriškumo sąlygą. Tačiau blogiausi rezultatai gauti, kuomet skylės orientuotos ZXY kryptimi 0 iš 14 (0 proc.).

5.2.3. Atlikus analizę pagal bandinių pozicionavimą, geriausi bandinių cilindriškumai gauti, kuomet bandiniai pozicionuojami gamybos platformos viduryje 14 iš 14 (100 proc.) bandiniai tenkina užduotą sąlygą. Blogiausias rezultatas pasiektas, kuomet bandiniai orientuojami apačioje 30 iš 42 bandinių (71.4 proc.) tenkina sąlygą.

5.3. Atlikus teorinių modelių ir pagamintų bandinių palyginamąją analizę, nustatyta, kad:

5.3.1. Bandiniai, kurių 95 procentai sutampa su teoriniu modeliu 29 bandiniai iš 36 (80,5 proc.) tenkina užduotą sąlygą. 7 iš 36 (19,5 proc.) yra netinkami.

5.3.2. Geriausias rezultatas pasiektas, kuomet skylės orientuojamos ZXY ir XY kryptimi (85,7 proc.) tenkina užduotą sąlygą. Blogiausi rezultatai pasiekti, kuomet skylės orientuojamos Z ir ZY kryptimi (80,9 proc.).

5.3.3. Geriausi bandinių rezultatai gauti, kuomet bandiniai pozicionuojami gamybos platformos viduryje 14 iš 14 (100 proc.) bandiniai tenkina užduotą sąlygą. Blogiausias rezultatas pasiektas, kuomet bandiniai orientuojami viršuje 14 iš 28 bandinių (50 proc.) tenkina sąlygą.

NAUDOTA LITERATURA

1. S. DE WOUTERSA, K. TRAN DUYB, P.-L. DOCQUIERA. Patient-specific instruments for surgical resection of painful tarsal coalition in adolescents. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2014, 423-427 [žiūrėta 2017 09 11].
2. EDUARD CERNAT, PIERRE-LOUIS DOCQUIER, LAURENT PAUL, XAVIER BANSE, ION-BOGDAN CODOREAN. Patient Specific Instruments for Complex Tumor Resection-Reconstruction Surgery within the Pelvis: A Series of 4 Cases. *Chirurgia*. 2016, 439-444 [žiūrėta 2017 09 11] Doi: 10.21614/chirurgia.111.5.439
3. LAURENT PAUL, OLIVIER CARTIAUX, GUILLAUME ANTHONY ODRI, FRANÇOIS GOUIN. Accuracy of Patient-Specific Instrumentation for Bone Tumor Resection within the pelvis: 1st study of 11 patients. *Annals of biomedical engineering*. 2014, 205-213. [žiūrėta 2017 10 09].
4. QIONG RONG, SHUANGXI ZHU, SONGLING CHEN, XING ZHANG. Individual Stereolithographic Template YGuided Curved Osteotomy for Unilateral Prominent Mandibular Angle. *Journal of Craniofacial Surgery*. 2013, 289-282 [žiūrėta 2017 09 11] Doi: 10.1097/SCS.0b013e31828f2b61.
5. MANUELA KUNZ, PHD, BURTON MA, PHD, JOHN F. RUDAN, MD, RANDY E. ELLIS, PHD, DAVID R. PICHORA, MD. Image-Guided Distal Radius Osteotomy Using Patient-Specific Instrument Guides. *The journal of hand surgery*. 2017, 1618-1624 [žiūrėta 2017 10 01] Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2013.05.018>
6. EMMANUEL THIENPONT, FREDERIC PATERNOSTRE, MARTIN PIETSCH, MAHMOUD HAFEZ, STEPHEN HOWELL. Total knee arthroplasty with patient-specific instruments improves function and restores limb alignment in patients with extra-articular deformity. *Elsevier*. 2013, 407-411 [žiūrėta 2017 08 09] Doi: <https://doi.org/10.1016/j.knee.2013.07.001>
7. I;BRAJLIH, T;PAULIČ, M;BALIC, J; TOMAZIC. Patient specific instruments for total hip replacement surgery. *International conference on modern technologies in manufacturing*. 2013 [žiūrėta 2017 10 08].
8. XIN ZHAO, JIE ZHAO, YOUZHUAN XIE, AND JIE MI. The Utility of a Digital Virtual Template for Junior Surgeons in Pedicle Screw Placement in the Lumbar Spine. *BioMed reaserch international*. 2016 [žiūrėta 2017 09 04].
9. LUC RENSONA, PASCALPOILVACHEB, HANSVAN DEN, WYNGAERTC. Improved alignment and operating room efficiency with patient-specific instrumentation for TKA. *Elsevier*. 2014, 1216-1220 [žiūrėta 2017 10 11] Doi:<https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.09.008>.

10. HMAD B. ALALI, MBBS,A MICHELLE F. GRIFFIN, MBCHB, MSC,A AND PETER E. BUTLER, MD, FRCSI, FRCS, FRCS(PLAST). Three-Dimensional Printing Surgical Applications A. *Eplasty*. 2015; 15: e37 [žiūrėta 2017 10 22].
11. JAMES D. WYLIE AND ROBERT Z. TASHJIAN. Planning software and patient-specific instruments in shoulder arthroplasty. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2016, 1-9 [žiūrėta 2017 09 30] Doi: 10.1007/s12178-016-9312-4.
12. ABANE L, ANRACT P, BOISGARD S, DESCAMPS S, COURPIED JP, HAMADOUCHE M. A comparison of patient-specific and conventional instrumentation for total knee arthroplasty: a multicentre randomised controlled trial. *The bone and joint journal*. 2015 [žiūrėta 2017 11 01] DOI: 10.1302/0301-620X.97B1.34440.
13. JIN ZHANG, XIAO-BIN TIAN, LI SUN, RU-YIN HU JIA-LIANG TIAN, WEI HAN, AND JIN-MIN ZHAO. Establishing a Customized Guide Plate for Osteotomy in Total Knee Arthroplasty Using Lower-extremity X-ray and Knee Computed Tomography Images. *Chin Med J* . 2016, 386-391 [žiūrėta 2017 10 12] Doi: 10.4103/0366-6999.176082.
14. WONG KC, KUMTA SM, GEEL NV, DEMOL J. One-step reconstruction with a 3D-printed, biomechanically evaluated custom implant after complex pelvic tumor resection. *Comput Aided Surg*. 2015, 14-23 [žiūrėta 2017 09 09]. Doi: 10.3109/10929088.
15. VLACHOPOULOS L, SCHWEIZER A, MEYER DC, GERBER C, FÜRNSTAHL P. Three-dimensional corrective osteotomies of complex malunited humeral fractures using patient-specific guides. *Jurnal of shoulder and elbow surgery*. 2016, 2040-2047 [žiūrėta 2017 06 03] Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jse.2016.04.038>.
16. JUSTIN DAIGRE, MD, GREGORY BERLET, MD, BRYAN VAN DYKE, DO, KYLE S. PETERSON, DPM, AND ROBERT SANTROCK, MD. Accuracy and Reproducibility Using Patient-Specific Instrumentation in Total Ankle Arthroplasty. *Foot Ankle Int*. 2017 38(4):412-418. [žiūrėta 2017 09 011] Doi: 10.1177/1071100716682086.
17. ANDREW R. HSU, MD, W. HODGES DAVIS, MD, BRUCE E. COHEN, MD, CARROLL P. JONES, MD, J. KENT ELLINGTON, MD, AND ROBERT B. ANDERSON, MD. Radiographic Outcomes of Preoperative CT Scan–Derived Patient-Specific Total Ankle Arthroplasty. *Foot Ankle Int*. 2015 36(10):1163-9. [žiūrėta 2017 09 011] Doi: 10.1177/1071100715585561.
18. SEAN PEEL, SATYAJEET BHATIA, DOMINIC EGGBEER, DANIEL S MORRIS AND CAROLINE HAYHURST. Evolution of design considerations in complex craniofacial reconstruction using patient-specific implants. *Proc Inst Mech Eng H*. 2017, 509-524 [žiūrėta 2017 10 10] Doi: 10.1177/0954411916681346.
19. M. V. M. Anchieta, F. A. Salles, B. D. Cassaro, M. M. Quaresma ,B. F. O. Santos. Skull reconstruction after resection of bone tumors in a single surgical time by the association of the

- techniques of rapid prototyping and surgical navigation. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2016 Oct;11(10):1919-25. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1007/s11548-016-1415-2.
20. MELISSA LOPRESTI, MD BRADLEY DANIELS, BS EDWARD P. BUCHANAN, MD, LAURA MONSON, MD, AND SANDI LAM. Virtual surgical planning and 3D printing in repeat calvarial vault reconstruction for craniosynostosis: technical note. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics* 2017 (19)4 490-494 [žiūrėta 2017 10 02].
 21. WENDY W. WONG, MD AND MARK C. MARTIN, MD, DMD. Reconstruction of Extended Orbitomaxillectomy and Hemimandibulectomy Defects With Fibula Flaps and Patient-Specific Implants. *J Craniofac Surg.* 2016 27(2):380-4. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1097/SCS.0000000000002417.
 22. ANDREAS THOR, DDS, PHD. Preoperative Planning of Virtual Osteotomies Followed by Fabrication of Patient Specific Reconstruction Plate for Secondary correction and Fixation of Displaced Bilateral Mandibular Body Fracture. *Craniofac Trauma Reconstr.* 2016; 9(2): 188–194. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1055/s-0036-1572492
 23. P. SCOLOZZI. Computer-aided design and computer-aided modeling (CAD/CAM) generated surgical splints, cutting guides and custom-made implants: Which indications in orthognathic surgery? *Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale.* 2015; 116(6):343-9. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1016/j.revsto.2015.09.005.
 24. B. YING, N. YE, Y. JIANG, Y. LIU, J. HU4, S. ZHU. Correction of facial asymmetry associated with vertical maxillary excess and mandibular prognathism by combined orthognathic surgery and guiding templates and splints fabricated by rapid prototyping technique. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2015 44(11):1330-6. [žiūrėta 2017 09 011] Doi: 10.1016/j.ijom.2015.05.012
 25. JAHRAD HAQA, NISHMA PATELA, KATHERINE WEIMERB, N SHAUN MATTHEWSA. Single stage treatment of ankylosis of the temporomandibular joint using patient-specific total joint replacement and virtual surgical planning. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2014 52(4):350-5. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1016/j.bjoms.2014.01.004.
 26. NIANSONG YE HU LONG SONGSONG ZHU YUNQIANG YANG WENLI LAI JING HU. The Accuracy of Computer Image-Guided Template for Mandibular Angle Osteotomy. *Aesthetic Plast Surg.* 2015 39(1):117-23. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1007/s00266-014-0424-1.
 27. QIONG RONG, DDS, SHUANGXI ZHU, DDS, SONGLING CHEN, DDS, XING ZHANG, DDS. Individual Stereolithographic Template Guided Curved Osteotomy for Unilateral Prominent Mandibular Angle: A Case Report. *Journal of Craniofacial Surgery:* 2013 e289–e292 [žiūrėta 2017 09 011] Doi: 10.1097/SCS.0b013e31828f2b61.
 28. JING-JING FANG, PHD, JIA-KUANG LIU, DDS, TZU-CHIEH WU, BS, JING-WEI LEE, MD, TAI-HONG KUO, PHD. Complex Facial Deformity Reconstruction With a Surgical Guide

- Incorporating a Built-in Occlusal Stent as the Positioning Reference. *J Craniofac Surg.* 2013 24(3):e260-5. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1097/SCS.0b013e31828cbccc.
29. JING-JING FANG, PHD, JIA-KUANG LIU, DDS, TZU-CHIEH WU, BS, JING-WEI LEE, MD, TAI-HONG KUO, PHD. Complex Facial Deformity Reconstruction With a Surgical Guide Incorporating a Built-in Occlusal Stent as the Positioning Reference. *J Craniofac Surg.* 2013 24(3):e260-5. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1097/SCS.0b013e31828cbccc.
 30. HSIN-WEN CHANG, LUN-JOU LO. Development of customized positioning guides using computer-aided design and manufacturing technology for orthognathic surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 2015,10, 2021–2033 [žiūrėta 2017 10 02].
 31. BIAO LI, LEI ZHANG, HAO SUNA, JIANBING YUAN, STEVE G.F. SHEN, XUDONGWANG. A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD/CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2013 51(8) 239-44. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1016/j.bjoms.2013.03.007.
 32. FRANK WILDE, HENNING HANKEN, FLORIAN PROBST, ALEXANDER SCHRAMM, MAX HEILAND, CARL-PETER CORNELIUS. Multicenter study on the use of patient-specific CAD/CAM reconstruction plates for mandibular reconstruction. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery.* 2015 (10), 2035–2051 [žiūrėta 2017 10 02].
 33. LIN WANG, DAN TIAN, XIUMEI SUN, YANJU XIAO, LI CHEN, GUOMIN WU. The Precise Repositioning Instrument for Genioplasty and a Three-Dimensional Printing Technique for Treatment of Complex Facial Asymmetry. *Aesthetic Plast Surg.* 2017 41(4):919-929. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1007/s00266-017-0875-2.
 34. CELLAN V. THOMAS, KEVIN G. MCMILLAN, PETE JEYNES, TIM MARTIN, SAT PARMAR. Use of a titanium cutting guide to assist with raising and inset of a DCIA free flap.. *Oral and Maxilofacial surgery.* 2013 (51) 958–961 [žiūrėta 2017 10 02] DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjoms.2013.04.014>
 35. ROBIN SEEBERGER, SEBASTIAN SCHERFLER, KOLJA FREIER, OLIVER THIELE. Use of stereolithographic cutting guides in corrective (wedge) Lefort I osteotomy. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2011;49(5) [žiūrėta 2017 10 14]. Doi: 10.1016/j.bjoms.2010.09.010.
 36. PAOLO SCOLOZZI. Maxillofacial Reconstruction Using Polyetheretherketone Patient- Specific Implants by “Mirroring” Computational Planning. *Aesthetic Plastic Surgery.* 2012, 36, 660–665. [žiūrėta 2017 10 02].
 37. ETHAN L. NYBERG, ASHLEY L. FARRIS, BEN P. HUNG, MIGUEL DIAS, JUAN R. GARCIA, AMIR H. DORAFSHAR, and WARREN L. GRAYSON. 3D-Printing Technologies for Craniofacial Rehabilitation, Reconstruction, and Regeneration. *Annals of Biomedical Engineering.* 2017, 45, 45–57 [žiūrėta 2017 10 02].

38. ALASTAIR DARWOOD, BMEDSCI, JONATHAN COLLIER, FRCS(OMFS) PHD, NARESH JOSHI, FRCO(PHTH), WILLIAM E. GRANT, FRCS(ORL), VERONIQUE SAURET-JACKSON, PHD, ROBIN RICHARDS, PHD, ANDREW DAWOOD, MRDRCS(ENG), NIALL KIRKPATRICK, FRCS(PLAST) Re-thinking 3D printing: A Novel Approach to Guided Facial Contouring. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 2015, 1256-1260 [žiūrėta 2017 10 02].
39. SEIED OMID KEYHAN, ALIREZA JAHANGIRNIA, HAMID REZA FALLAHI, ALIREZA NAVABAZAM, AND SINA GHANEAN. Three dimensional printer assisted reduction genioplasty; surgical guide fabrication. *Ann Maxillofac Surg*. 2016 6(2): 278–280. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.4103/2231-0746.200321
40. J. KRAEIMAA, J. JANSMAA, R.H. SCHEPERSA. ScienceDirect Splintless surgery: does patient-specific CAD-CAM osteosynthesis improve accuracy of Le Fort I osteotomy. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 2016 54(10):1085-1089. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1016/j.bjoms.2016.07.007.
41. JENNIFER LAVIE, BS, MARK W. STALDER, MD, AND HUGO ST. HILAIRE, DDS, MD. Virtual Resection and Subsequent Design of a Patient-Specific Alloplastic Implant in the Preoperative Planning and Surgical Treatment of a Venous Malformation of the Zygoma. *J Craniofac Surg*. 2015 26(7) 641-3. [žiūrėta 2017 10 02] Doi: 10.1097/SCS.0000000000002042.
42. Osteogenėzės sąvoka. [žiūrėta 2017 12 10] Internetinis adresas: <https://www.medguru.lt/ligos/nebaigtine-osteogeneze/>.
43. JIN ZHANG, XIAO-BIN TIAN, LI SUN, RU-YIN HU, JIA-LIANG TIAN, WEI HAN, JIN-MIN ZHAO. Establishing a Customized Guide Plate for Osteotomy in Total Knee Arthroplasty Using Lower-extremity X-ray and Knee Computed Tomography Images, 2016 20;129(4):386-91. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.4103/0366-6999.176082.
44. B. SCHLATTERERA, J.-M. LINARES B, J. CAZALA, P. MERLOZ C, S. PLAWESKI D. Posterior tibial slope accuracy with patient-specific cutting guides during total knee arthroplasty: A preliminary study of 50 cases. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2015 101(6) S233-40. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.1016/j.otsr.2015.06.005.
45. BING QIU, BS FEI LIU, PHD BEN SEN TANG, BS BIYONG DENG, PHD FANG LIU, PHD WEIMIN ZHU, BS DONG ZHEN, MS MINGYUAN XUE, PHD MINGJIAO ZHANG, MS. Clinical Study of 3D Imaging and 3D Printing Technique for Patient-Specific Instrumentation in Total Knee Arthroplasty. *J Knee Surg*. 2017 30(8):822-828. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.1055/s-0036-1597980.
46. BERT BOONEN MARTIJN G. M. SCHOTANUS, BART KERENS, FRANS-JAN HULSMANS WIM E. TUINEBREIJER NANNE P. KORT. Patient-specific positioning guides for total knee arthroplasty: no significant difference between final component alignment and pre-operative

- digital plan except for tibial rotation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017 25(9):2809-2817. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.1007/s00167-015-3661-1.
47. JASON CHINNAPPA, DARREN B. CHENA, IAN A. HARRIS, SAMUEL J. MACDESSI. Total knee arthroplasty using patient-specific guides: Is there learning curve? *Knee.* 2015 22(6):613-7. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1016/j.knee.2015.03.002.
48. JACK M HAGLIN, BS, ADAM E M ELTORAI, MS, JOSEPH A GIL, MD, STEPHEN E MARCACCIO, BS, JULIANA BOTERO-HINCAPIE, BS, ALAN H DANIELS, MD. Patient-Specific Orthopaedic Implants. *Orthopaedic Surgery* 2014 (8), Issue 4 [žiūrėta 2017 09 06].
49. JONG-KEUN SEON HYEONG-WON PARK SEUNG-HYUN YOO EUN-KYOO SONG. Assessing the accuracy of patient-specific guides for total knee arthroplasty. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 2016, (24) 3678–3683 [žiūrėta 2017 09 03].
50. VINCENT V.G. AN A, BRAHMAN S. SIVAKUMAR, KEVIN PHAN, YADIN DAVID LEVY, WARWICK J.M. BRUCE. Accuracy of MRI-based vs. CT-based patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty: A meta-analysis. *J Orthop Sci.* 2017 22(1):116-120. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.1016/j.jos.2016.10.007
51. LORENZO MATTEI, PIETRO PELLEGRINO, MICHEL CALÒ, ALESSANDRO BISTOLFI, FILIPPO CASTOLDI. Patient specific instrumentation in total knee arthroplasty: a state of the art. *Ann Transl Med.* 2016; 4(7): 126. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.21037/atm.2016.03.33.
52. JUSTIN A M J VAN LEEUWEN¹, BJARNE GRUGAARD, LARS NORDSLETTEN, AND STEPHAN M RÖHRL. Comparison of planned and achieved implant position in total knee arthroplasty with patient-specific positioning guides. *Acta Orthop.* 2015; 86(2): 201–207. [žiūrėta 2017 09 03] Doi: 10.3109/17453674.2014.985154
53. RAHIJ ANWAR SUNIL GURPUR KINI SAIF SAI¹ WARWICK J. M. BRUCE. Early clinical and radiological results of total knee arthroplasty using patient-specific guides in obese patients. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2016 136(2):265-70. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1007/s00402-015-2399-z
54. TILMAN CALLIESS, KAMIL BAUER, CHRISTINA STUKENBORG-COLSMAN, HENNING WINDHAGEN, STEFAN BUDDE, MAX ETTINGER. PSI kinematic versus non-PSI mechanical alignment in total knee arthroplasty: a prospective, randomized study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017 25(6):1743-1748. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1007/s00167-016-4136-8.
55. RYONG KWON, KYOUNG-TAK KANG, JUHYUN SON, YUN-JIN CHOI, DONG-SUK SUH, AND YONG-GON KOH. The Effect of Femoral Cutting Guide Design Improvements for Patient-Specific Instruments. *BioMed Research International.* Volume 2015 8 [žiūrėta 2017 10 22]. Doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2015/978686>.

56. ANDREA S. BAUER, MD, DORA A. R. STORELLI, MD, SARAH E. SIBBEL, MD, H. RELTON MCCARROLL, MD, AND LISA L. LATTANZA, MD. Preoperative Computer Simulation and Patient-specific Guides are Safe and Effective to Correct Forearm Deformity in Children. *J Pediatr Orthop.* 2017 37(7):504-510. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1097/BPO.0000000000000673.
57. PHILIPP FÜRNSTAHL, PHD, LAZAROS VLACHOPOULOS, MD, ANDREAS SCHWEIZER, MD, SANDRO F. FUCENTESE, MD, AND PETER P. KOCH, MD. Complex Osteotomies of Tibial Plateau Malunions Using Computer-Assisted Planning and Patient-Specific Surgical Guides. *J Orthop Trauma.* 2015 29(8):e270-6. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1097/BOT.0000000000000301.
58. D.F. KALBERMATTENA, M. HAUGA, D.J. SCHAEFERA, E. WOLFINGERA, R. SCHUMACHERC, P. MESSMERB, G. PIERERA. Computer aided designed neo-clavicle out of osteotomized free fibula: case report. *Br J Plast Surg.* 2004 57(7):668-72 [žiūrėta 2017 09 06].
59. L. SPENCER-GARDNER, J. PIERREPONT, M. TOPHAM, J. BARÉ, S. MCMAHON, A. J. SHIMMIN. Patient-specific instrumentation improves the accuracy of acetabular component placement in total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2016 98-B(10):1342-1346 [žiūrėta 2017 09 06].
60. OLIVIER CARTIAUX, LAURENT PAUL, BERNARD G. FRANCO, XAVIER BANSE, and PIERRE-LOUIS DOCQUIER. Improved Accuracy with 3D Planning and Patient-Specific Instruments During Simulated Pelvic Bone Tumor Surgery. *Ann Biomed Eng.* 2014 42(1):205-13. [žiūrėta 2017 09 06] Doi: 10.1007/s10439-013-0890-7.
61. XIAOJUN CHENA, LU XUA, YIPING WANGA, YONGQIANG HAOB, LIAO WANGBAINSTITUTE. Image-guided installation of 3D-printed patient-specific implant and its application in pelvic tumor resection and reconstruction surgery. *Comput Methods Programs Biomed.* 2016 125:66-78. [žiūrėta 2017 09 01] Doi: 10.1016/j.cmpb.2015.10.020.
62. THORSTEN JENTZSCH, LAZAROS VLACHOPOULOS, PHILIPP FÜRNSTAHL, DANIEL A. MÜLLER AND BRUNO FUCHS. Tumor resection at the pelvis using three-dimensional planning and patient-specific instruments: a case series. *World J Surg Oncol.* 2016; 14: 249 Published online 2016 21. [žiūrėta 2017 09 01] Doi: 10.1186/s12957-016-1006-2
63. XIN RONG, BEI-YU WANG, YU-XIAO DENG, HAO LIU. Three-dimensional Printed Patient-specific Drilling Templates for Expansive Open-door Laminoplasty. *Chin Med J (Engl).* 2016 129(21): 2644–2646. [žiūrėta 2017 10 01] Doi: 10.4103/0366-6999.192786
64. FRANCESCO NADDEO, EMILIO CATALDO, ALESSANDRO NADDEO, NICOLA CAPPETTI, NICOLA NARCISO. An automatic and patient-specific algorithm to design the optimal insertion direction of pedicle screws for spine surgery templates. *Med Biol Eng Comput.* 2017 55(9):1549-1562. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1007/s11517-017-1627-9.

65. TAKU SUGAWARA, MD, NAOKI HIGASHIYAMA, MD, SHUICHI KANEYAMA, MD, Y AND MASATOSHI SUMI, MD. Accurate and Simple Screw Insertion Procedure With Patient-Specific Screw Guide Templates for Posterior C1-C2 Fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017 15;42(6):E340-E346. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1097/BRS.0000000000001807.
66. MATJAZ MERC IGOR DRSTVENSEK MATJAZ VOGRIN TOMAZ BRAJLIH GREGOR REČNIK. Multi-level rapid prototyping drill guide template reduces the perforation risk of pedicle screw placement in the lumbar and sacral spine. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2013 133(7):893-9. [žiūrėta 2017 09 16] Doi: 10.1007/s00402-013-1755-0.
67. LU SHENG, XU YONG-QING, ZHANG YUAN-ZHI , LI YAN-BING, SHI JI-HONG, CHEN GUO-PING AND CHEN YU-BING. Rapid prototyping drill guide template for lumbar pedicle screw placement. *Chin J Traumatol*. 2009 12(3):177-80 [žiūrėta 2017 09 16] .
68. FEI GUO, JIANHAO DAI, JUNXIANG ZHANG, YICHUAN MA, GUANGHUI ZHU, JUNJIE SHEN, GUOQI NIU. Individualized 3D printing navigation template for pedicle screw fixation in upper cervical spine. *PLoS One*. 2017 12(2):e0171509. [žiūrėta 2017 10 15] Doi: 10.1371/journal.pone.0171509.
69. YONG HU, ZHEN-SHAN, YUAN WILLIAM, RYAN SPIKE, WEI-XIN, DONG XIAO-YANG, SUN JIAN-BING, JIAO ZHANG, BINGKE ZHU. A comparative study on the accuracy of pedicle screw placement assisted by personalized rapid prototyping template between preand post-operation in patients with relatively normal mid-upper thoracic spine. *Eur Spine J*. 201625(6):1706-15. [žiūrėta 2017 010 16] Doi: 10.1007/s00586-016-4540-2.
70. KUO-YUAN HUANG, MD, PHD RUEY-MO LIN, MD, JING-JING FANG, PHD. A novel method of C1–C2 transarticular screw insertion for symptomatic atlantoaxial instability using a customized guiding block A case report and a technical note. *Medicine (Baltimore)*. 2016 95(43):e5100 [žiūrėta 2017 11 02] .
71. Freeform Modeling Plus aparatinė įranga. [žiūrėta 2017 11 28] Internetinis adresas: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/geomagic-touch-x>.