

# Identificiranje putanje otvaranja čeljusnog sinusa u kirurškom endoskopskom zahvatu

---

**Antunović, Bartol**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:921621>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Bartol Antunović**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Komentor:

Student:




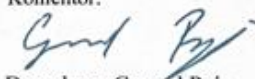
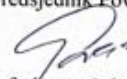
Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Doc. dr.sc. Gorazd Poje

Bartol Antunović

Zagreb, 2025.

## ZADATAK

	<p>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  <b>FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE</b>          Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite          Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:          Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,          mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija</p>											
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Sveučilište u Zagrebu</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Fakultet strojarstva i brodogradnje</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">Datum</td> <td style="width: 50%;">Prilog</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Ur.broj: 15 - 25 -</td> </tr> </table>			Sveučilište u Zagrebu		Fakultet strojarstva i brodogradnje		Datum	Prilog	Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1		Ur.broj: 15 - 25 -	
Sveučilište u Zagrebu												
Fakultet strojarstva i brodogradnje												
Datum	Prilog											
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1												
Ur.broj: 15 - 25 -												
<h2 style="text-align: center;">DIPLOMSKI ZADATAK</h2>												
Student:	<b>Bartol Antunović</b>	JMBAG: 0035224133										
Naslov rada na hrvatskom jeziku:	<b>Identificiranje putanje otvaranja čeljusnog sinusa u kirurškom endoskopskom zahvatu</b>											
Naslov rada na engleskom jeziku:	<b>Identifying the path of opening the maxillary sinus in endoscopic surgery</b>											
Opis zadatka:	<p>I pored intenzivnog razvoja tehnike, još je uvijek vrlo mnogo ljudskih djelatnosti koje se odvijaju pretežno ručno. Postrojenje ljudskih umnih, osjetilnih i tjelesnih sposobnosti posebno se otežano odvija u djelatnostima u kojima se pojavljuju predmeti rada nekonzistentne geometrije i drugih svojstava, a u manjim proizvodnim količinama.</p>											
U radu je potrebno:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. upoznati se s kirurškim endoskopskim zahvatom otvaranja čeljusnog sinusa i navesti njegov značaj</li> <li>2. opisati tipičan sadržaj i postupanje u endoskopskom zahvatu otvaranja čeljusnog sinusa u pogledu uključenog tkiva pacijenta, medicinskog osoblja i opreme</li> <li>3. posebno se osvrnuti na za navedeni zahvat potrebne podatke te načine njihovog prikupljanja i obrade</li> <li>4. istražiti i navesti mogućnosti unaprjeđenja zahvata, napose definiranja opće trajektorije otvaranja čeljusnog sinusa</li> <li>5. za definiranu opću trajektoriju osmisliti i provesti eksperimente, dostupnom opremom.</li> </ol>											
Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:										
28. studeni 2024.	30. siječnja 2025.	6., 7. i 10. veljače 2025.										
Zadatak zadao:	Komentor:	Predsjednik Povjerenstva:										
 Prof. dr.sc. Zoran Kunica	 Doc. dr.sc. Gorazd Poje	 Prof. dr. sc. Ivica Garašić										

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici i komentoru doc. dr.sc. Gorazdu Poji na savjetima, komentarima i kritikama tijekom izrade ovog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na potpori i podršci tijekom ovih godina.

U Zagrebu, 29. siječnja 2025.

Bartol Antunović

## **SAŽETAK**

U ovom radu razmatrana je digitalizacija endoskopskog kirurškog zahvata otvaranja čeljusnog (maksilarnog) sinusa, obuhvaćajući posebno: snimanje, analizu, definiciju te digitalizaciju i virtualizaciju trajektorije otvaranja i njenog ostvarenja. Opisane su anatomske strukture povezane sa zahvatom, specifični instrumenti i uređaji koji se koriste u zahvatu, te sam postupak otvaranja maksilarnog sinusa. Trajektorije otvaranja maksilarnog sinusa digitalizirane su u softveru Slicer, pomoću Python skripte na temelju CT snimkama šestero bolesnika, te je tako dobivena uprosječena trajektorija otvaranja. Potom se u okružju operacijske sale u virtualnoj stvarnosti, korištenjem opreme HTC Vive 1, simuliralo pokrete kirurga i dobivena je trajektorija slična onoj uprosječnoj iz Slicera. Iako je u nekim svojim aspektima virtualizacija zahvata pojednostavnjena, jasno je pokazan potencijal virtualne stvarnosti kao alata za bolje razumijevanje i unaprjeđenje kirurškog procesa.

Ključne riječi: endoskopska kirurgija sinusa, maksilarni sinus, trajektorija otvaranja, digitalizacija, virtualna stvarnost

## **SUMMARY**

In this paper, the digitalization of the endoscopic surgical procedure for the opening of the maxillary sinus is discussed, specifically encompassing: imaging, analysis, definition, digitalization, and virtualization of the trajectory for opening and its execution. The maxillary sinus and associated anatomical structures are described, along with the specific instruments and devices used during the procedure, as well as the process of opening the maxillary sinus itself. The trajectories for opening the maxillary sinus were digitalized using Slicer software with a Python script based on CT scans of six patients, resulting in an averaged opening trajectory. Subsequently, in the operating room environment using virtual reality equipment (HTC Vive 1), surgeon's movements were simulated, producing a trajectory similar to the averaged one from Slicer. Although some aspects of the virtualization were simplified, the work clearly demonstrates the potential of virtual reality as a tool for improving the understanding and enhancement of surgical processes.

Key words: endoscopic sinus surgery, maxillary sinus, opening trajectory, digitalization, virtual reality

## SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY.....	IV
POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA.....	VI
POPIS SLIKA.....	VIII
POPIS TABLICA.....	XII
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OSNOVNO O ANATOMIJI I ENDOSKOPSKOJ KIRURGIJI SINUSA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. ENDOSKOPSKI ZAHVAT OTVARANJA MAKSILARNOG SINUSA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Instrumenti (alati) i oprema potrebni za zahvat.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Medicinsko osoblje.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Potrebni podaci uoči zahvata i način njihovog prikupljanja.....</b>	<b>20</b>
<b>4. SUVREMENI UREĐAJI I MOGUĆNOSTI AUTOMATIZACIJE U ENDOSKOPSKOJ KIRURGIJI SINUSA.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Suvremeni uređaji.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2. Mogućnosti automatizacije.....</b>	<b>31</b>
<b>5. OTVARANJE ČELJUSNOG SINUSA U VIRTUALNOJ STVARNOSTI.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1. Definiranje trajektorije otvaranja maksilarnog sinusa.....</b>	<b>35</b>
<b>5.2. Simulacija otvaranja maksilarnog sinusa u virtualnoj stvarnosti.....</b>	<b>59</b>
<b>5.3. Matematička definija trajektorije otvaranja maksilarnog sinusa.....</b>	<b>80</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>82</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>84</b>



## POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
$\theta$	°	kut vrha alata
$x$		koordinatna os $x$
$y$		koordinatna os $y$
$z$		koordinatna os $z$
eng.		engleski
CT		eng. <i>Computed Tomography</i> – računalna tomografija
DICOM		eng. <i>Digital Imaging and COmmunications in Medicine</i>
DWI		eng. <i>Diffusion-Weighted magnetic resonance Imaging</i> – difuzijski ponderirane slike
EM		elektromagnetski
ESS		eng. <i>endoscopic sinus surgery</i> – endoskopska kirurgija sinusa
FLAIR		eng. <i>Fluid Attenuated Inversion Recovery</i> –
LPS		eng. <i>left, posterior, superior</i> – lijevo, stražnje, gornje
MR		eng. <i>Magnetic resonance</i> – magnetska rezonancija
MRI		eng. <i>Magnetic resonance imaging</i> – prikaz magnetske rezonancije
RAS		eng. <i>right, anterior, superior</i> – desno, prednje, gornje
SAD		Sjedinjene Američke Države
STIR		eng. <i>Short Tau Inversion Recovery</i>

TCP		eng. <i>Tool Center Point</i> – središnja točka alata
VR		eng. <i>Virtual Reality</i> – virtualna stvarnost

## POPIS SLIKA

Slika 1. Fleksibilan endoskop i kruti endoskopi .....	3
Slika 2. Lokalizacija maksilarnog (čeljusnog) sinusa [4] .....	4
Slika 3. Usporedba zdravog (lijevo) i upalom zahvaćenog maksilarnog sinusa (desno).....	5
Slika 4. Nosni polipi.....	6
Slika 5. Shema lokalizacije i oblika fontanele [6].....	7
Slika 6. Deformacije septuma nosa [7] .....	8
Slika 7. Krvne žile i živci (vaskularizacije i inervacije) nosa [8] .....	8
Slika 8. Faze rinološkog kirurškog zahvata: gore – glavna, endoskopska faza zahvata; dolje – posljednja, neendoskopska faza .....	10
Slika 9. Lokalizacija prednje i stražnje fontanele u odnosu na okolne anatomske strukture: F – frontalni sinus, HS – hiatus semilunaris, UP – processus uncinatus, BE – bulla ethmoidalis, MT – srednja nosna školjka, SPF– foramen sphenopalatium, IT – donja nosna školjka, PF – stražnja fontanela, AF – prednja fontanela [9] .....	11
Slika 10. Antrum aspirator .....	11
Slika 11. Gore: lijeva nosna šupljina s naznačenim mjestom otvaranja maksilarnog sinusa, dolje: formirana antrostoma lijevog maksilarnog sinusa .....	12
Slika 12. Endoskopi kuta 0° te 45° i 70° .....	13
Slika 13. Kruti endoskopi s kutovima gledanja 0°, 30° i 70° .....	14
Slika 14. Mikrodebrider [12].....	15
Slika 15.. Dvije vrste vrha mikrodebridera ravan (gore) i ukošen (dolje) [12].....	15
Slika 16. Angulirani mikrodebrider .....	16
Slika 17. Regulator i pedala mikrodebridera.....	17

Slika 18. Angulirana bušilica .....	18
Slika 19. Navigacijski sustav za endoskopsku kirurgiju sinusa [14] .....	19
Slika 20. CT paranazalnih sinusa .....	21
Slika 21. Hallerove stijenke [16].....	22
Slika 22. CT uređaj [18].....	23
Slika 23. Ravnine po kojima je podijeljeno ljudsko tijelo [19].....	24
Slika 24. MR uređaj [20].....	25
Slika 25. MR: način rada [21] .....	26
Slika 26. MR: snimka T1 (desno) i snimka T2 (lijevo) [22].....	27
Slika 27. MR: A – nakon upotrebe FLAIR sekvence, B – prije upotrebe FLAIR sekvence, C – subtrakcija sekvence B od sekvence A [23] .....	27
Slika 28. MR: T2 sekvenca uz primjenu STIR-a [24].....	28
Slika 29. Medtronic StealthStation Surgical Navigation System [25] .....	30
Slika 30. Prijeoperacijsko planiranje kirurške putanje.....	31
Slika 31. Naslovni prozor softvera Slicer s bazom podataka.....	35
Slika 32. Data modul u softveru Slicer .....	36
Slika 33. Segmentacija glave za prikaz kosti u softveru Slicer.....	37
Slika 34. Segmentacija glave za prikaz mekog tkiva i kosti u softveru Slicer.....	37
Slika 35. Izlist Python skripte za iscrtavanje trajektorije odnosno krivulje otvaranja maksilarnog sinusa .....	39
Slika 36. Krivulja bolesnika 1 .....	40
Slika 38. Trajektorija bolesnika 1 prikazana na njegovoj lubanji, u koronalnoj (lijevo) i sagitalnoj (desno) ravnini .....	41
Slika 39. Detalji krivulje bolesnika 1 .....	42
Slika 40. Detalj 3D lubanje reprezentiran trokutićima.....	43
Slika 41. <i>Decimate mesh body</i> .....	44

Slika 42. CT i 3D prikaz bolesnika 2 .....	44
Slika 43. Segmentacija kosti bolesnika 2 .....	45
Slika 44. Segmentacija mekog tkiva bolesnika 2 .....	45
Slika 45. Prikaz krivulje za bolesnika 2 .....	46
Slika 46. Krivulja s mjerama za bolesnika 2 .....	47
Slika 47. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 3 .....	47
Slika 48. Krivulja za bolesnika 3. ....	48
Slika 49. Krivulja s mjerama za bolesnika 3 .....	49
Slika 50. CT i 3D prikaz za bolesnika 4.....	49
Slika 51. Prikaz devijacije nosa bolesnika 4 .....	50
Slika 52. Segmentacija kosti bolesnika 4 .....	50
Slika 53. Segmentacija mekog tkiva bolesnika 4 .....	51
Slika 54. Prikaz krivulje i njene vrijednosti .....	52
Slika 55. 3D model bolesnika 4 .....	53
Slika 56. CT i 3D prikaz bolesnika 5 .....	53
Slika 57. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 5 .....	54
Slika 58. Prikaz krivulje i njenih vrijednost bolesnika 5.....	55
Slika 59. CT i 3D model bolesnika 6 .....	55
Slika 60. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 6 .....	56
Slika 61. Prikaz s krivulje i njenih vrijednosti bolesnika 6.....	57
Slika 62. Krivulje otvaranja maksilarnog sinusa svih bolesnika te uprosječna krivulja .....	58
Slika 63. Naočale HTC Vive 1 [40] .....	59
Slika 64. Kontroler HTC Vive 1 [41].....	60
Slika 65. Senzor HTC Vive 1 [41] .....	60
Slika 66. Postavljanje senzora u prostori [42].....	61

Slika 67. Odabir okruŕja u virtualnoj stvarnosti .....	62
Slika 68. Model operacijskog stola [43].....	63
Slika 69. Model instrumenta [44].....	64
Slika 70. Model medicinskog tehničara [45] .....	65
Slika 71. Model zaslona za navigaciju endoskopa [46] .....	66
Slika 72. Model seta stolova za odlaganje alata [47] .....	66
Slika 73. Opći model lubanje [48] .....	67
Slika 74. Virtualna scena zahvata iz vizure kirurga koji prilazi operacijskom stolu, desno medicinski tehničar.....	68
Slika 75. Početan položaj endoskopa – položaj 1 .....	69
Slika 76. Instrument u ruci kirurga – položaj 2.....	70
Slika 77. Instrument u blizini lubanje – položaj 3 .....	71
Slika 78. Instrument pri ulazu u nosnu šupljinu – položaj 4.....	72
Slika 79. Instrument pri otvaranju maksilarnog sinusa – položaj 5 .....	73
Slika 80. Kirurg predaje instrument tehničaru – položaj 6 .....	74
Slika 81. Koordinate TCP-a instrumenta odloŕenog na stol .....	75
Slika 82. Trajektorija instrumenta u kirurgovoj ruci, u milimetrima, skalirano 1:100 .....	77
Slika 83. Uvećana trajektorija instrumenta u kirurgovoj ruci u nosnoj šupljini, u milimetrima, skalirano 1:100 .....	78
Slika 84. Projekcije trajektorije (nacrta, bokocrt, tlocrt), 1:100 .....	79

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristične točke krivulje za bolesnika 1 .....	38
Tablica 2. Karakteristične točke za bolesnika 2 .....	46
Tablica 3. Karakteristične točke za bolesnika 3 .....	48
Tablica 4. Karakteristične točke za bolesnika 4 .....	51
Tablica 5. Karakteristične točke bolesnika 5 .....	54
Tablica 6. Karakteristične točke bolesnika 6 .....	56
Tablica 7. Vrijednosti veličina krivulja po bolesnicima .....	57
Tablica 8. Podaci o poziciji i orijentaciji vrha instrumenta (TCP) u početnom položaju .....	69
Tablica 9. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 2 .....	70
Tablica 10. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 3 .....	71
Tablica 11. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 4 .....	72
Tablica 12. Podaci o poziciji i orijentaciji endoskopa u položaju 5 .....	73

## 1. UVOD

Endoskopski kirurški zahvati predstavljaju suvremen pristup u liječenju mnogih ljudskih bolesti, a u području rinologije, različitih patologija sinusa, poput kroničnog sinutisa, polipa, i drugih abnormalnosti [1]. Tako se u SAD-u godišnje približno 500 000 bolesnika podvrgne endoskopskoj operaciji sinusa samo radi kroničnog rinosinuitisa, a broj operacija raste svake godine [2].

Endoskopska kirurgija omogućava kirurzima da precizno i minimalno invazivno interveniraju unutar sinusa, smanjujući rizik od komplikacija, skraćujući vrijeme oporavka bolesnika, i povećavajući ukupnu uspješnost liječenja. Identificiranje putanje otvaranja čeljusnog (maksilarnog) sinusa ključno je za uspjeh ovih zahvata. Točna identifikacija omogućava kirurzima da sigurno i učinkovito pristupe zahvaćenim područjima, minimirajući oštećenje zdravog tkiva i tako optimirajući terapijske ishode.

U ovom radu, s medicinskih a napose tehničkih aspekata analizirat će se kirurški endoskopski zahvat otvaranja čeljusnog sinusa. Rad će pružiti detaljan opis postupanja u endoskopskom zahvatu otvaranja čeljusnog sinusa, s posebnim osvrtom na anatomiju uključenog tkiva, te prostor i geometriju zahvata, kao i medicinsko osoblje koje sudjeluje u zahvatu i opremu koja se koristi u njemu.

Posebna pažnja bit će posvećena razradi potrebnih podataka i metoda prikupljanja informacija, kao što su računalna tomografija (CT) i magnetska rezonancija (MR).

Dalje, istražiti će se mogućnosti digitalizacije ovih zahvata, s naglaskom na pokušaj definiranja opće trajektorije otvaranja čeljusnog sinusa. U tom kontekstu, izvest će se pokusi prvo korištenjem softvera Slicer, za pokušaj pronalaženja, klasifikacije i normalizacije trajektorija za otvaranje maksilarnog sinusa, na osnovi CT slika, a nakon toga pokus korištenjem virtualne stvarnosti, s ciljem simulacije zahvata te povećanje kirurške točnosti, preciznosti i učinkovitosti. Ovi pokusi će naznačiti potencijalne koristi i odgovore na izazove



primjene digitalnih tehnologija u kirurškoj praksi, kao i pokušaj smanjivanja invazivnosti zahvata na najmanje potrebno te potencijalno planiranje novih optimiziranih instrumenata.

Na kraju, rad će naznačiti mogućnosti daljnjeg unapređenja izvedbe endoskopskih zahvata na čeljusnom sinusu, primjenom automatizacije i robotike, koje bi mogle dodatno poboljšati kirurške ishode, skratiti vrijeme zahvata i povećati sigurnost zahvata.

Kroz sve ove aspekte, cilj je prikazati kako moderna tehnologija može unaprijediti standardne kirurške metode, vodeći ka boljim rezultatima liječenja.

## 2. OSNOVNO O ANATOMIJI I ENDOSKOPSKOJ KIRURGIJI SINUSA

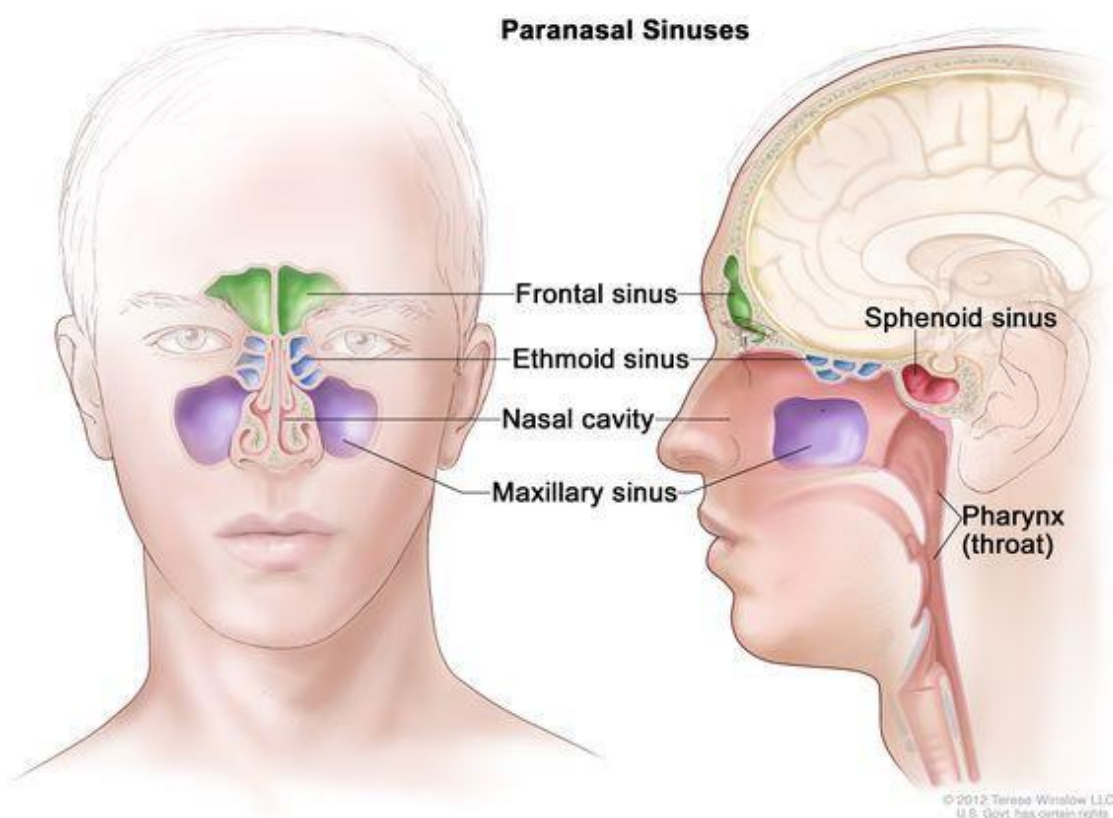
Danas se pomoću endoskopa vizualiziraju, dijagnosticiraju i liječe gotovo sve bolesti nosa, sinusa i lubanjske osnovice. Ambulantno se češće koriste fleksibilni (tanki i savitljivi) endoskopi, a u kirurgiji kruti endoskopi opremljeni kamerom (Slika 1.). U suvremenoj rinologiji endoskopska kirurgija sinusa (ESS, eng. *endoscopic sinus surgery*) je najkorištenija kirurška metoda liječenja svih bolesti nosa i sinusa. Ova minimalno invazivna kirurška tehnika je značajno unaprijedila liječenje bolesti nosa i sinusa. Endoskop omogućuje kirurzima da precizno, kroz nosne otvore i nosne šupljine pristupe svim paranazalnim sinusima. [3]



**Slika 1. Fleksibilan endoskop i kruti endoskopi**

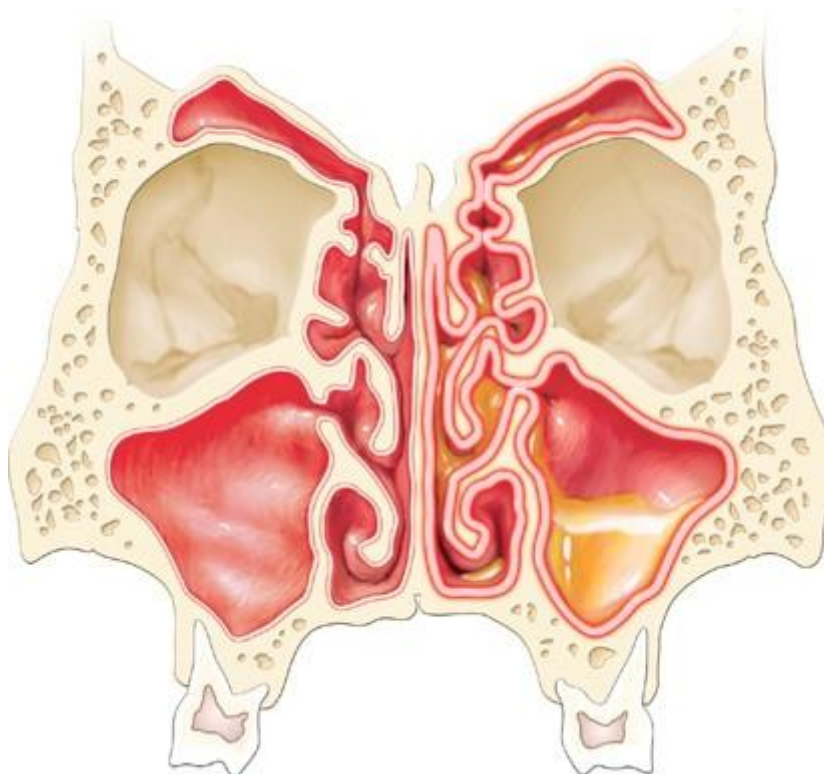
Paranasalni sinusi su zrakom ispunjene šupljine koje su spojene s nosnim šupljinama i preko njih se ventiliraju i dreniraju. Pomoću endoskopa mogu se vizualizirati unutarnje strukture nosa i sinusa, što omogućuje učinkovitu intervenciju bez potrebe za vanjskim rezovima i šavovima. Značaj ovog zahvata je višestruk: prvo i najvažnije, omogućuje bolju drenažu svih sinusa, što je presudno za liječenje bolesnika s kroničnim upalama sinusa. Sinusi, smješteni u prednjem

dijelu lubanje (Slika 2.), ponekad mogu imati sužene ili blokirane otvore, što sprječava njihovu ventilaciju i drenažu.



**Slika 2. Lokalizacija maksilarnog (čeljusnog) sinusa [4]**

Ako je drenaža sinusa blokirana, dolazi do nakupljanja sekreta i razvoja upale (Slika 3.) što može rezultirati bolnim pritiscima, glavoboljama i osjećajem težine u predjelu lica i čela. ESS omogućuje širenje tih prirodnih otvora ili stvaranje novih putanja za drenažu, što dugoročno može spriječiti nastanak novih infekcija i upala.



**Slika 3. Usporedba zdravog (lijevo) i upalom zahvaćenog maksilarnog sinusa (desno)**

Endoskopski zahvati na sinusima za mnoge bolesnike omogućuju značajno olakšanje simptoma nakon višemjesečnih ili čak višegodišnjih problema s disanjem i neugodnim simptomima. Osim što omogućuje bolji protok zraka i sekreta, jedan od ključnih razloga zašto se endoskopska sinusna kirurgija smatra superiornijom u odnosu na klasične metode jest njezina minimalno invazivna priroda. Za razliku od tradicionalnih kirurških zahvata koji su uključivali vanjske rezove i ožiljke, endoskopski pristup izvodi se isključivo kroz nosnice. Time se značajno smanjuje trauma tkiva, a bolesnici se brže oporavljaju, što ishodi kraćim boravkom u bolnici i bržim povratkom svakodnevnim aktivnostima. Ovaj manji stupanj invazivnosti također smanjuje rizik od komplikacija, kao što su infekcije rana ili oštećenja osjetljivih struktura lica. [5] Preciznost zahvata još je jedna velika prednost. Endoskop pruža kirurgu detaljan i uvećan pogled na kiruršku anatomiju sinusa u stvarnom vremenu. Kroz kamere visoke rezolucije, kirurg može pratiti svaku svoju intervenciju s velikom preciznosti, što smanjuje mogućnost nenamjernog oštećenja okolnih tkiva. Ovo je posebno važno zbog kompleksne anatomije, sinusi se nalaze u blizini očnih šupljina i mozga te mnogih važnih struktura poput kranijalnih živaca i krvnih žila. Minimalna greška može dovesti do ozbiljnih posljedica. Pomoću

endoskopa, kirurg može lakše izbjeći te rizike i postići željeni rezultat uz maksimalnu sigurnost za bolesnika.

EES se također pokazala učinkovitom u liječenju kroničnog sinuitisa, koji je čest problem u modernoj populaciji, posebno u urbanim sredinama gdje su zagađenje zraka i alergeni sveprisutni. Bolesnici koji nisu reagirali na konzervativno liječenje, na primjer kortikosteroidima i/ili antibioticima, često imaju značajno poboljšanje simptoma nakon endoskopskih zahvata. Uklanjanjem fizičkih prepreka unutar sinusa, koje su uzrokovale zadržavanje sekreta i upale, simptomi poput zagušenja, bolova u licu, glavobolja i poteškoća s disanjem znatno se smanjuju ili potpuno nestaju. Ono što je također važno istaknuti je da endoskopska tehnika otvaranja sinusa omogućuje i rješavanje drugih problema unutar nosne šupljine. Primjerice, kirurzi mogu ukloniti polipe, benigne izrasline koje sprečavaju normalan protok zraka (Slika 4.), a često su uzrok ponavljajućih upala.



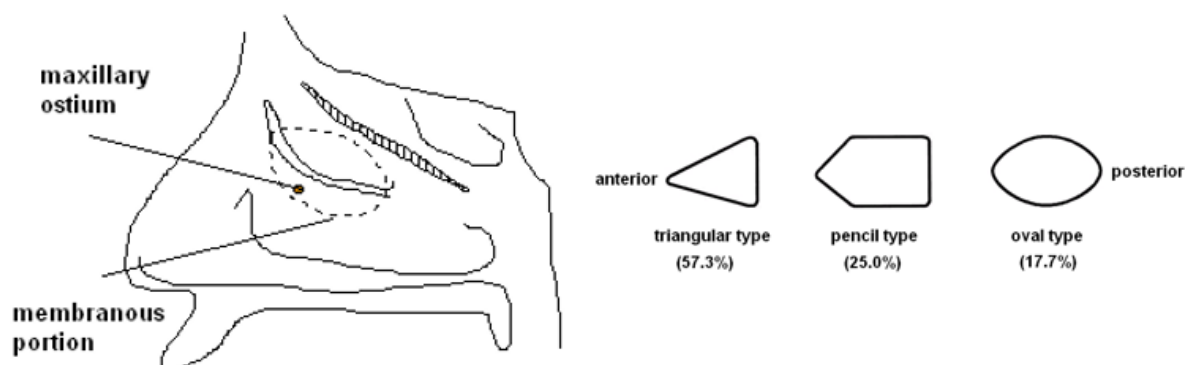
**Slika 4. Nosni polipi**

Na kraju, endoskopski zahvat na sinusima ima i važnu ulogu u prevenciji ozbiljnijih komplikacija. Neliječene upale sinusa mogu dovesti do širenja infekcija na okolna tkiva, uključujući mozak ili oči, što može rezultirati životno ugrožavajućim stanjima poput meningitisa i apscesa mozga ili nogu dovesti do gubitka vida. Endoskopski zahvati na sinusima smanjuju rizik od takvih komplikacija, jer se, zahvaljujući prikazu operacijskog polja pod povećanjem, oni izvode preciznije u odnosu na otvorene kirurške zahvate. [5]

ESS tehnički je složena i zahtijeva pažljivo razmatranje svih uključenih elemenata – od anatomskih struktura bolesnika, preko tkiva i geometrije operacijskog područja, do uloge medicinskog osoblja i potrebne opreme. Svaka komponenta zahvata ima presudnu ulogu u postizanju uspješnog ishoda, a cijeli postupak temelji se na poznavanju anatomije nosa i sinusa, kao i na korištenju sofisticirane endoskopske tehnologije. Tijekom endoskopskog zahvata, kirurg mora pažljivo pristupiti ovom području kroz nosne šupljine, izbjegavajući osjetljive strukture kao što su očne šupljine, lubanjska osnovica i kranijalni živci.

Jedan od najčešćih endoskopskih zahvata jest otvaranje maksilarnog tj. čeljusnog sinusa. Svrha ovog zahvata je uspostava njegove ventilacije i drenaže, te uklanjanje eventualnog patološkog procesa u sinusu.

Maksilarni sinus se u pravilu otvara u području tzv. fontanele. Fontanela jest područje na lateralnoj stijenci nosne šupljine, odnosno medijalna stijenka maksilarnog sinusa, koja nema kosti nego je građena samo od duplikature pokosnice i sluznice (Slika 5.), a može biti trokutastog, olovkastog i ovalnog tipa. [6]

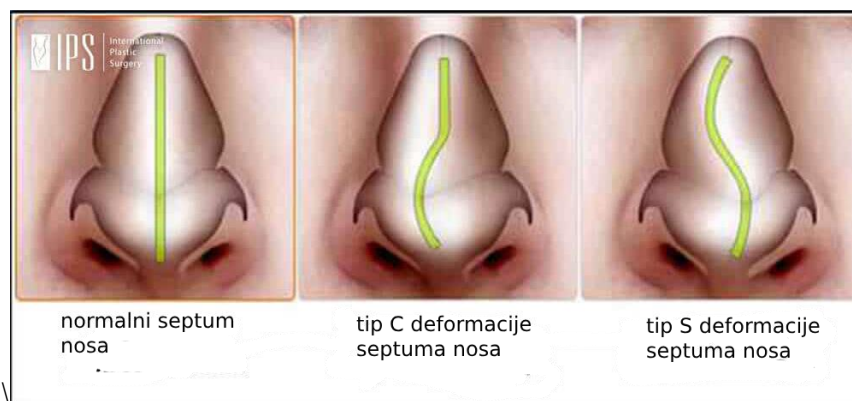


Slika 5. Shema lokalizacije i oblika fontanele [6]

Zbog blizine važnih i/ili vitalnih struktura u ESS-u je važno točno i precizno odrediti putanju kirurških instrumenata kako bi se izbjegle ozbiljne komplikacije, poput oštećenja krvnih žila, nenamjernog proboja u očnu šupljinu te eventualnog oštećenja vidnog živca, ili čak proboja u intrakranijski prostor. To se postiže korištenjem instrumenata (alata) posebno konstruiranih za ESS. Instrumenti kojim se probija fontanela promjera su od 1 mm do 3 mm.

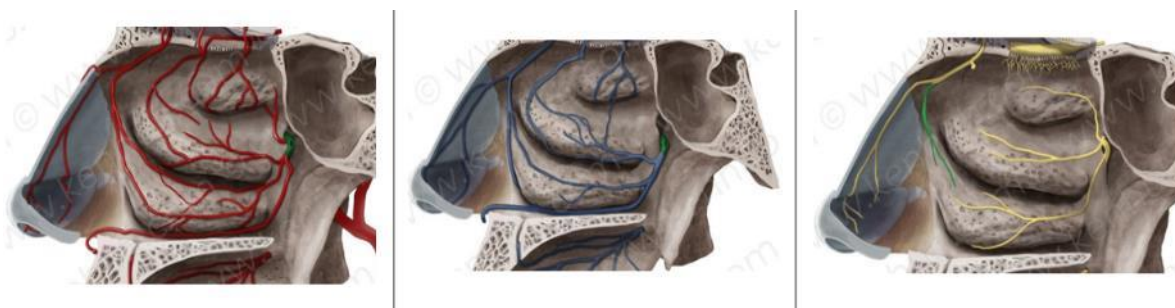
Nadalje, razvojem tehnologije, koriste se i instrumenti odnosno uređaji s električnim napajenjem poput mikrobebridera, koji uklanjaju oboljelo tkivo, polipe ili zadebljane sluznice. Ako postoji potreba za prolaz kroz deblje kosti, kirurg može koristiti posebne alate za bušenje i uklanjanja koštanih struktura.

Izvedba ESS-a može biti otežana postojanjem deformacije nosne pregrade jer smanjuje operacijsko polje (Slika 6.).



**Slika 6. Deformacije septuma nosa [7]**

Korištenje instrumenata u skućenom prostoru zahtijeva iznimnu kirurgovu vještinu i iskustvo, a svaka intervencija na koštanom tkivu mora biti pažljivo planirana i izvedena kako bi se izbjeglo oštećenje okolnih vitalnih struktura. Nosna šupljina, iako naizgled prostrana, zapravo je vrlo uska i složena zbog mnoštva krvnih žila, živaca (Slika 7.).



**Slika 7. Krvne žile i živci (vaskularizacije i inervacije) nosa [8]**

### 3. ENDOSKOPSKI ZAHVAT OTVARANJA MAKsilARNOG SINUSA

Kod svakog ESS zahvata (Slika 8.), pa tako i kod zahvata otvaranja maksilarnog sinusa, zahtijeva se detaljna priprema bolesnika, što obuhvaća pretrage koje uključuju i CT koji pomaže kirurgu u planiranju zahvata i orijentaciji unutar operacijskog polja pri samom zahvatu.

Nakon što je bolesnik anesteziran, obično pod općom anestezijom, kirurg započinje zahvat pažljivim uvodom endoskopa kroz nosnu šupljinu. Endoskop, opremljen kamerom, prenosi sliku operativnog polja na monitor, omogućujući kirurgu jasnu vizualizaciju.

Prvi korak zahvata je prepoznavanje anatomskih struktura i pronalaženje mjesta gdje se otvara sinus koji želi operirati. Ukoliko je nosna šupljina ispunjena tkivom, na primjer nosnim polipima, onda će prvo oni ukloniti. Korištenjem mikrobebridera ili drugih instrumenata, kirurg započinje s uklanjanjem oboljelog tkiva, polipa ili zadebljane sluznice koje blokiraju drenažu sinusa.

Otvaranje maksilarnog sinusa podrazumijeva nalaženje pogodnog mjesta, ovisno o anatomiji bolesnika. Za otvaranje čeljusnog sinusa najprije se endoskopom vizualizira *processus uncinatus*, koštano izbočenje na bočnoj stijenci nosne šupljine koji fontanelu dijeli na prednji i stražnji dio (Slika 9.), i na mjestu jedne od fontanela otvara se sinus, a napravljeni otvor proširi.

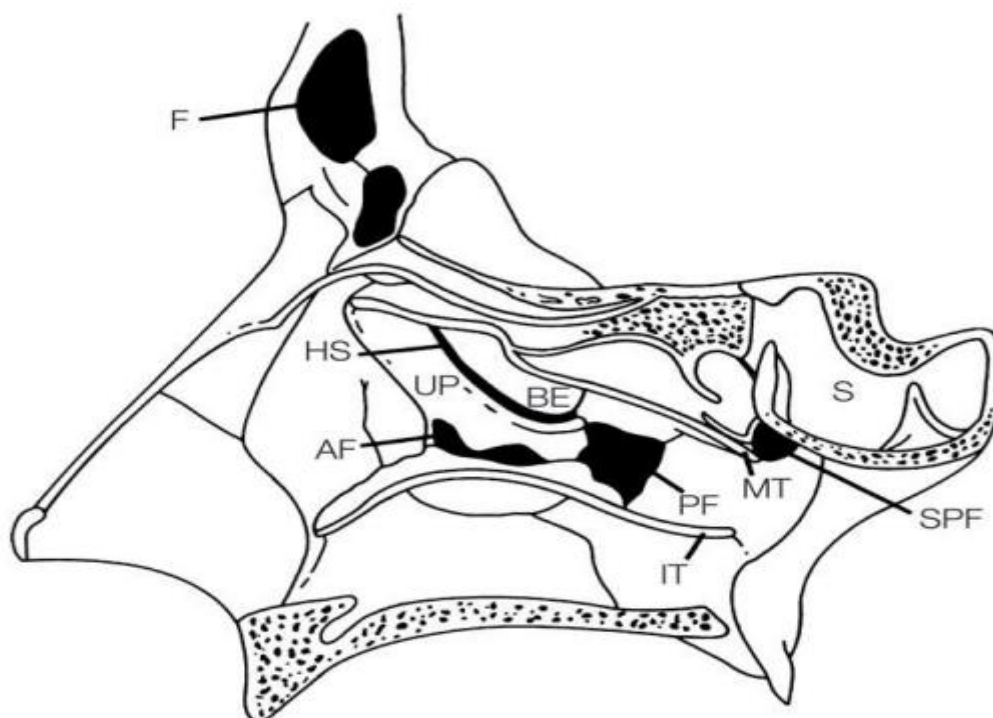
Instrumenti za otvaranje se koriste ovisno o osobnim preferencijama svakog kirurga (primjerice: Stammbergerov nazubljeni antrum forceps, različiti antrum aspiratori). Slika 10.

**Takvo otvaranje maksilarnog sinusa ishodi manjom destrukcijom tkiva budući da se ne uklanja cijeli *processus uncinatus*, kao što je uvriježeno.**





**Slika 8. Faze rinološkog kirurškog zahvata: gore – glavna, endoskopska faza zahvata;  
dolje – posljednja, neendoskopska faza**

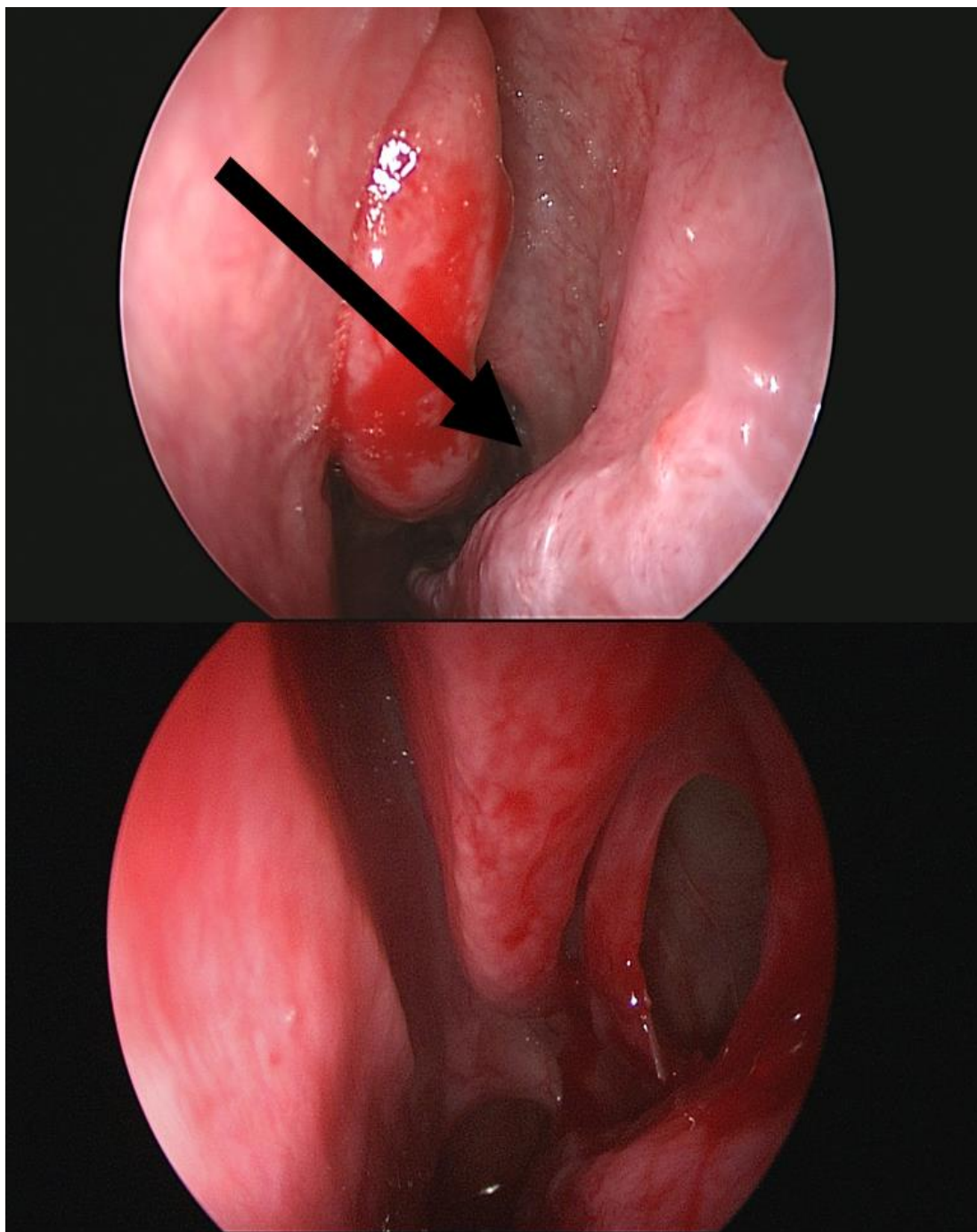


**Slika 9. Lokalizacija prednje i stražnje fontanele u odnosu na okolne anatomske strukture: F – frontalni sinus, HS – hiatus semilunaris, UP – processus uncinatus, BE – bulla ethmoidalis, MT – srednja nosna školjka, SPF – foramen sphenopalatium, IT – donja nosna školjka, PF – stražnja fontanela, AF – prednja fontanela [9]**



**Slika 10. Antrum aspirator**

Postupak otvaranja čeljusnog sinusa naziva se formiranje antrostome čeljusnog sinusa (Slika 11.). Kirurg cijeli postupak radi gledajući u monitor tj. korištenjem endoskopa s kamerom: slika operacijskog polja je pritom uvećana pa su anatomske strukture detaljnije prikazane. Danase se koriste 4k monitori koji dodatno digitalno uvećavaju sliku.

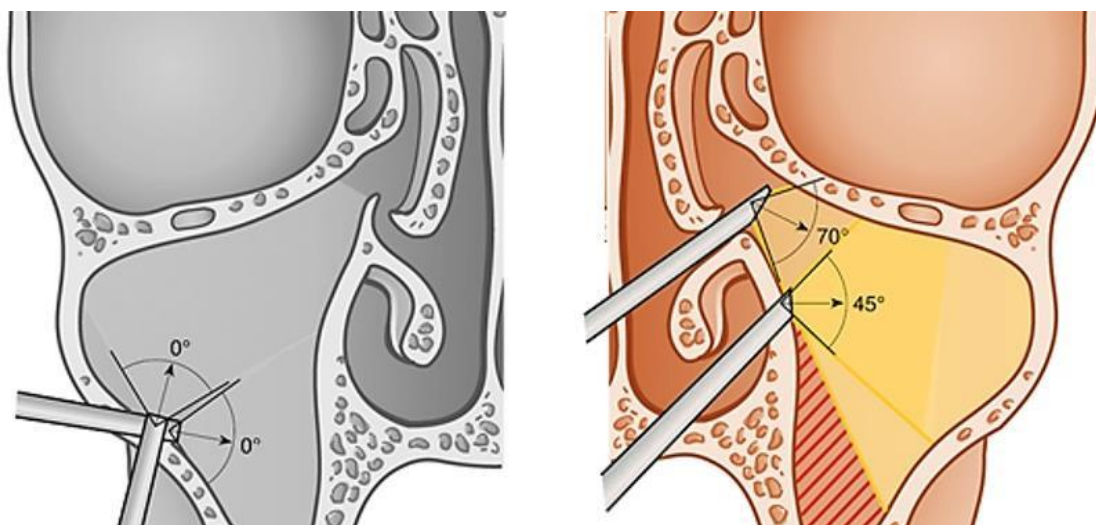


**Slika 11. Gore: lijeva nosna šupljina s naznačenim mjestom otvaranja maksilarnog sinusa, dolje: formirana antrostoma lijevog maksilarnog sinusa**

Nakon operacije, bolesnik se budi iz opće anestezije, zatim premješta u sobu za oporavak. Postoperacijski, bolesnik treba ispirati nos fiziološkom otopinom kako bi se iz nosa ispirala sukrvica i spriječilo stvaranje krusti, a potrebne su i redovite kontrole za kojih kirurg radi toaletu operacijskog polja.

### 3.1. Instrumenti (alati) i oprema potrebni za zahvat

Oprema koja se koristi u ovakvim zahvatima uključuje razne kirurške instrumente i uređaje. Tijekom zahvata, kirurg radi i kreće se po ograničenom području koristeći endoskop koji omogućava uvećanu sliku u stvarnom vremenu. To zahtijeva preciznu manipulaciju instrumentima u ograničenom prostoru, pri čemu se mora paziti da geometrija i smještaj alata ne bi izazvali nenamjerno oštećenje krvožilnih i okolnih struktura. Ovisno o potrebi, koriste se endoskopi različitih karakteristika koji variraju po dužini, kutovima (Slika 12.) vrha, promjeru i kutu gledanja.



Slika 12. Endoskopi kuta 0° te 45° i 70°

U pravilu, endoskopi koji se koriste za sinusne operacije dugi su 15 do 18 cm. Uobičajeni promjer endoskopa za sinusne operacije je 2,7 (za operacije djece) i 4 mm (odrasli) [5]. Veći promjeri imaju prednost za veću rezoluciju kamere i širu sliku dok manji omogućuju prolaz kroz uže anatomske strukture. Mogućnost mijenjanja kuta na endoskopu, ili uzimanje endoskopa s već postavljenim kutovima (Slika 13.), omogućuju da se u svakoj operaciji pristupa prema posebnostima anatomije bolesnika.

U operacijama vrh endoskopa obično se nalazi iznad i iza vrha instrumenta kako bi se preko monitora vidjelo operacijsko polje i instrument kojim se rukuje.



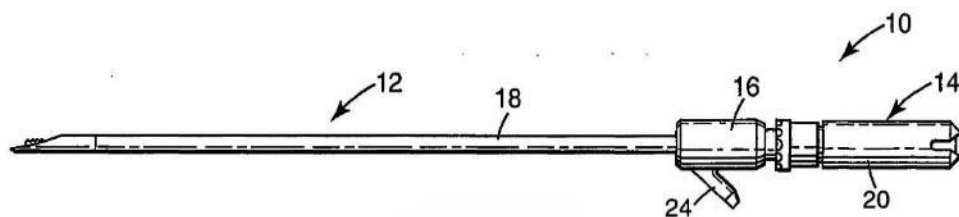
**Slika 13. Kruti endoskopi s kutovima gledanja 0°, 30° i 70°**

Endoskopi se koriste s kutovima između 0° i 110°, a najčešće se koriste: 0°, 30°, 45°, 70° i 90°. [10] Svaki kut rada ima svoje prednosti pa tako endoskop s 0°, koji je i najkorišteniji, služi za gledanje ravno ispred vrha endoskopa.

Endoskop s kutom od 30° omogućava pogled pod malim kutem što je pogodno za pregled bočnih strana sinusa. Pod kutom od 45° se najčešće koristi za operacije gdje kirurg ima potrebu gledati iza koštanih izbočenja ili zakrivljenih anatomskih struktura, te je najpogodniji za operacije maksilarnog sinusa gdje su takve pojave najčešće. Endoskopi pod većim kutovima poput 70° i 90° koriste se u vrlo specifičnim situacijama kada kirurg mora vidjeti iza ili oko prepreka. Slika se prenosi s kamere endoskopa na velik monitor, što omogućava kirurgu bolji uvid u stanje tkiva i bolju kontrolu operacijskog polja.

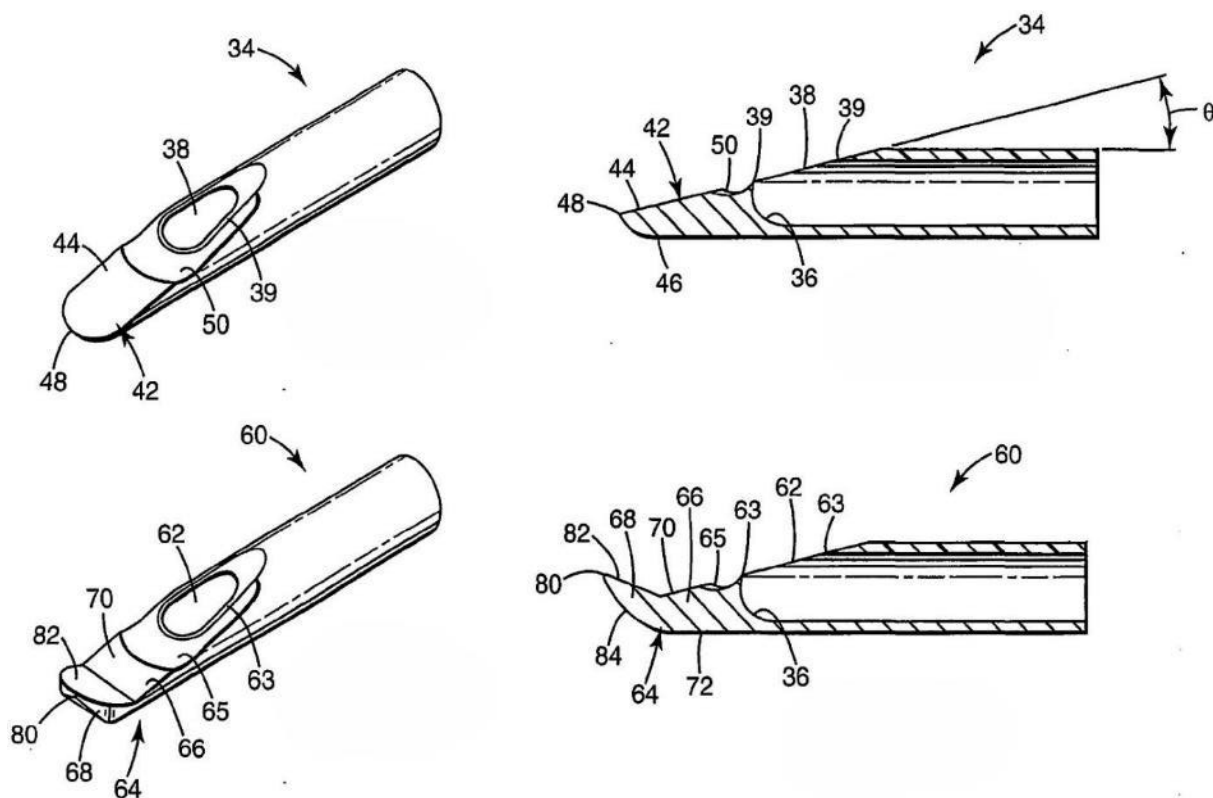
Osim endoskopa, koriste se i različiti specijalizirani kirurški instrumenti, poput mikrodebridera, pinceta i bušilica za kosti, koji su oblikovani za rad u skučenim prostorima. Mikrodebrider (Slika 14.) je sofisticiran kirurški uređaj koji ima važnu ulogu u kirurgiji sinusa. Njegov način rada temelji se na kombinaciji mehaničkog rezanja i usisavanja odrezanog tkiva, omogućujući kirurzima da precizno uklone bolesno tkivo bez oštećenja zdravih struktura. Ovaj

instrument pruža kirurgu mogućnost učinkovitog uklanjanja tkiva, istovremeno održavajući operativno polje čistim i preglednim. [5]



Slika 14. Mikrodebrider [12]

Središnji dio mikrodebridera je rotirajući nož, koji se okreće brzinom od nekoliko tisuća okretaja u minuti. Ovaj nož smješten je unutar vanjske cijevi koja ima otvor kroz koji dolazi u kontakt s tkivom. Aktivacijom noža, rezanje počinje gotovo trenutačno, a usisni sustav koji je integriran u alat (Slika 15.) istovremeno uklanja izrezano tkivo i tekućine iz operativnog polja. Upravo ta kombinacija rezanja i usisavanja čini mikrodebrider tako učinkovitim u zahvatima koji zahtijevaju visoku razinu preciznosti. [12]



Slika 15.. Dvije vrste vrha mikrodebridera ravan (gore) i ukošen (dolje) [12]

U pravilu, kut vrha alata  $\theta$  je između 10 i 16°, idealno 13°, dok je vanjski promjer od 2 ili 2,9 mm, a sama debljina oštrice noža iznosi 0,127 mm. Kirurg kontrolira cijeli proces putem ergonomске ručke ili nožne pedale (Slika 17.), što mu omogućuje da u svakom trenutku prilagodi brzinu rotacije noža, najčešće između 3000 i 5000 okretaja po minuti i intenzivnost usisavanja, obično 5 cm<sup>3</sup>/minuta, ovisno o tipu tkiva na kojem radi (Slika 16.) [13].



**Slika 16. Angulirani mikrodebrider**

Na primjer, kada se radi o mekšim tkivima, poput polipa, koristi se veća brzina rotacije, dok se za preciznije zahvate na čvršćem tkivu smanjuje brzina kako bi se izbjegla prekomjerna trauma na zdravim strukturama.



**Slika 17. Regulator i pedala mikrodebridera**

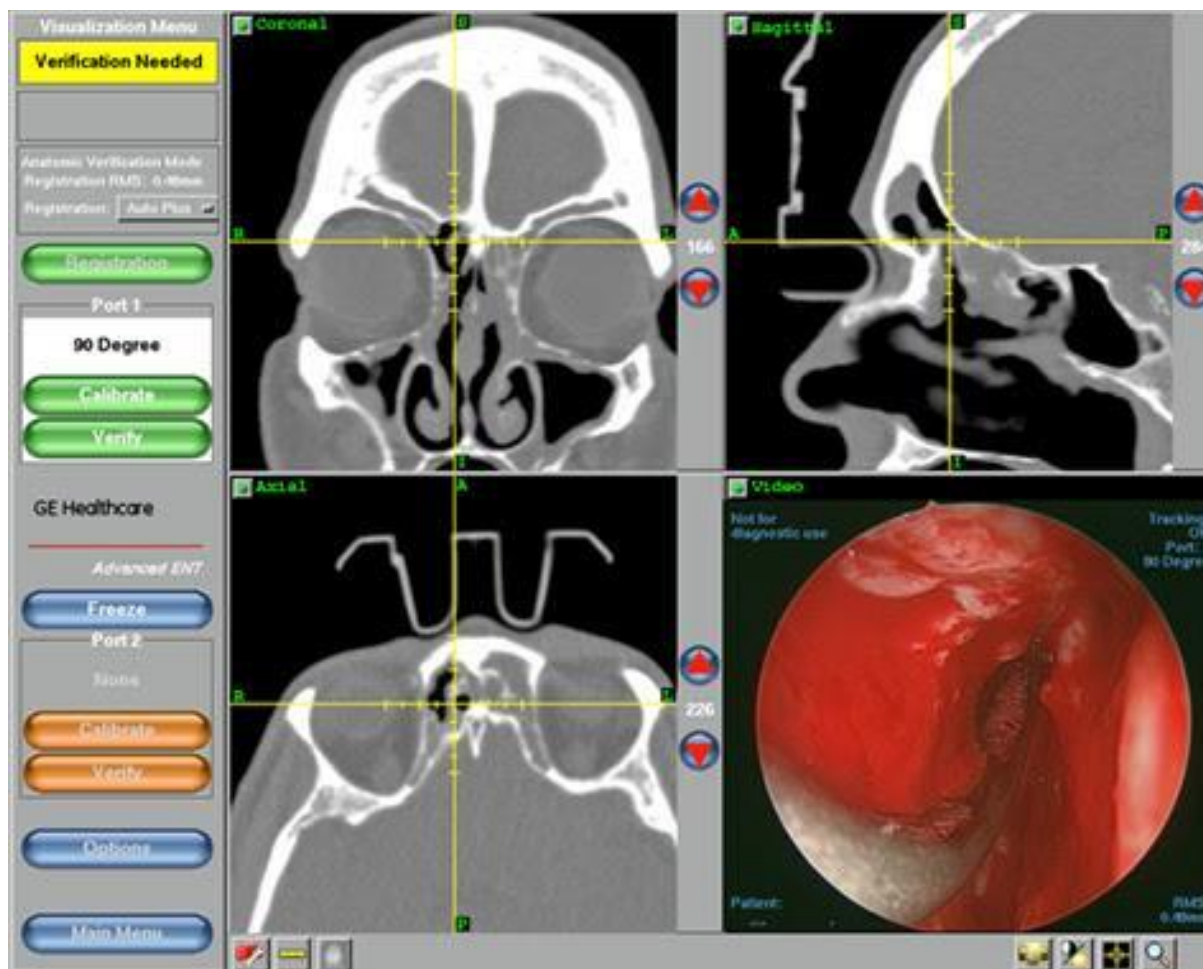
Također, jedan od najvećih izazova u kirurškim zahvatima sinusa je zadržavanje čistog operativnog polja jer svaka prisutnost krvi ili izrezanog tkiva može ometati vidljivost. Mikrodebider se s tim uspješno nosi zahvaljujući svom integriranom sustavu za usisavanje. Ovaj sustav kontinuirano uklanja ostatke tkiva i tekućina, osiguravajući da kirurg uvijek ima jasan pogled na operativno polje. To ne samo da olakšava postupak, već i skraćuje trajanje operacije, smanjujući rizik od komplikacija. Sama konstrukcija mikrodebridera također je pažljivo promišljena. Materijali od kojih je izrađen, poput medicinskog čelika DIN 1.2083, osiguravaju dugotrajnost i otpornost na sterilizaciju, što je ključno s obzirom na čestu upotrebu i visoke higijenske standarde u operacijskim salama. Noževi su vrlo oštri, a usisni sustav snažan, što omogućava efikasan i siguran rad. [12] Osim endoskopa i mikrodebridera, često se koriste i drugi alati, poput bušilice za kosti (Slika 18.),





**Slika 18. Angulirana bušilica**

Izuzetno važan aspekt za razumijevanje endoskopske kirurgije sinusa, jest uloga napredne tehnologije u navigaciji tijekom zahvata. U kompleksnim slučajevima, poput operacija maksilarnog sinusa, anatomija bolesnika može biti toliko specifična i nepravilna da standardna endoskopska vizualizacija nije uvijek dovoljna. Ovdje na scenu stupa kirurška navigacija temeljena na CT skenovima bolesnika. U endoskopskoj kirurgiji sinusa, tehnologija video kirurgije odnosno kirurgije pomoću navigacijskog sustava (engl. *image-guided surgery*) (Slika 19.) omogućava kirurzima da preciznije lokaliziraju anatomske strukture unutar sinusa koristeći trodimenzionalne prikaze bolesnikovih anatomskih podataka, najčešće preuzetih s prethodno učinjenih CT skenova.



Slika 19. Navigacijski sustav za endoskopsku kirurgiju sinusa [14]

Ovaj sustav radi na sličnom principu kao GPS – endoskop i kirurški alati su povezani s računalnim sustavom, koji na ekranu prikazuje trenutnu poziciju alata u stvarnom vremenu u odnosu na anatomske strukture bolesnika. Kirurg na ekranu vidi precizno kretanje svakog instrumenta i njegovo pozicioniranje u odnosu na kosti, krvne žile i šupljine, što omogućuje izbjegavanje oštećenja osjetljivih struktura poput optičkog živca ili moždanih ovojnica. [5] Ovaj sustav može se koristiti i u zahvatima na maksilarnom sinusu. Također, anatomska varijabilnost ovog područja kod bolesnika može biti velika, što dodatno komplicira operaciju. Upravo zato tehnologija kirurške navigacije može značajno smanjiti rizik od ozbiljnih komplikacija i povećati sigurnost i preciznost zahvata. Osim toga, ova vrsta vođenja omogućava kirurzima da se odluče za minimalno invazivne pristupe kada bi inače možda bili prisiljeni na otvorene, klasične zahvate.

### **3.2. Medicinsko osoblje**

Što se tiče medicinskog osoblja, kirurški tim obično se sastoji od nekoliko u operaciju izravno uključenih članova. Osim kirurga i eventualno njegovog asistenta, tu su i medicinski tehničari i sestre koji pomažu u manipulaciji instrumentima, održavanju čistoće operativnog polja, i asistiraju u operacijskoj sali, pripremajući i dezinficirajući instrumente, kao i pomažući u pripremi bolesnika prije zahvata a nakon se brinu o opravku bolesnika. Anesteziolog je također presudan član tima, jer osigurava sigurnu i pravilnu anesteziju bolesnika, a u endoskopskim zahvatima najčešće se koristi opća anestezija kako bi se osigurao miran i stabilan operativan proces. U tijeku operacije, sterilnost je od najveće važnosti.

### **3.3. Potrebni podaci uoči zahvata i način njihovog prikupljanja**

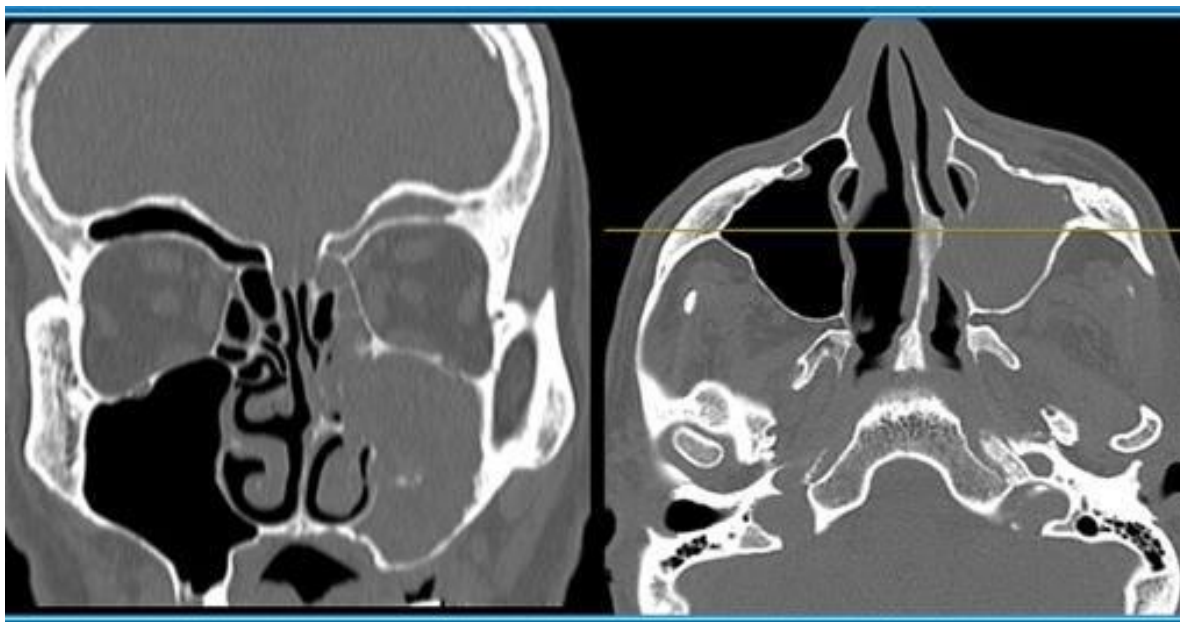
Prije izvođenja endoskopskog zahvata otvaranja čeljusnog sinusa, izuzetno je važno temeljito se pripremiti kako bi se osigurao siguran i učinkovit postupak. Ta priprema obuhvaća detaljno prikupljanje svih relevantnih podataka o bolesniku, što uključuje anamnezu, klinički pregled, dijagnostičke pretrage te procjenu općeg zdravstvenog stanja.

Uzimanje anamneze predstavlja prvi korak u ovom procesu. Potrebno je pažljivo saslušati bolesnika i zabilježiti sve simptome koje navodi. Često se radi o kroničnoj nosnoj opstrukciji, koja podrazumijeva dugotrajnu začepljenost nosa koja otežava disanje. Bolesnik može također prijaviti rinoreju, odnosno iscjedak iz nosa koji može biti gnojan ili vodenast. Bol u licu ili osjećaj pritiska, posebno u području obraza, koji se pojačava pri naginjanju naprijed, također su važni simptomi. Smanjen osjet mirisa ili potpuni gubitak mirisa mogu ukazivati na ozbiljnije promjene u sinusima. Glavobolje su još jedan simptom koji može upućivati na sinusnu infekciju ili upalu. Važno je ispitati bolesnika o prethodnim epizodama sinusitisa, prisutnosti alergija, astme ili drugih respiratornih problema. Informacije o prethodnim kirurškim zahvatima u području nosa i sinusa, kao i o lijekovima koje bolesnik uzima, posebno antikoagulansima, ključne su za planiranje zahvata.

Klinički pregled obuhvaća inspekciju i palpaciju vanjskog nosa i lica, kao i prednju i stražnju rinoskopiju. Najvažniji korak kliničkog pregleda jest endoskopija nosa (najčešće se rabi fleksibilni fiberoptički endoskop) jer omogućuje evaluaciju anatomije i eventualnih patoloških promjena, omogućuje otkrivanje čak i vrlo malih abnormalnosti, može se pratiti učinkovitost

liječenja te indicirati operacija. Endoskopski pregled zahtijeva određenu stručnost i nije svugdje dostupan. Nadalje, njime se i smanjuje se broj ponavljanja radioloških pretraga (na primjer CT), a time i izloženost zračenju bolesnika (kao i nepotrebno opterećenje zdravstvenog sustava).

Nakon anamneze i kliničkog pregleda, pristupa se dijagnostičkim pretragama radi detaljnije procjene stanja sinusa i planiranja zahvata. Od posebne važnosti su radiološke pretrage, među kojima se ističu računalna tomografija (CT) i magnetska rezonancija (MR). CT paranazalnih sinusa (Slika 20.) predstavlja zlatni standard u radiološkoj evaluaciji sinusa.

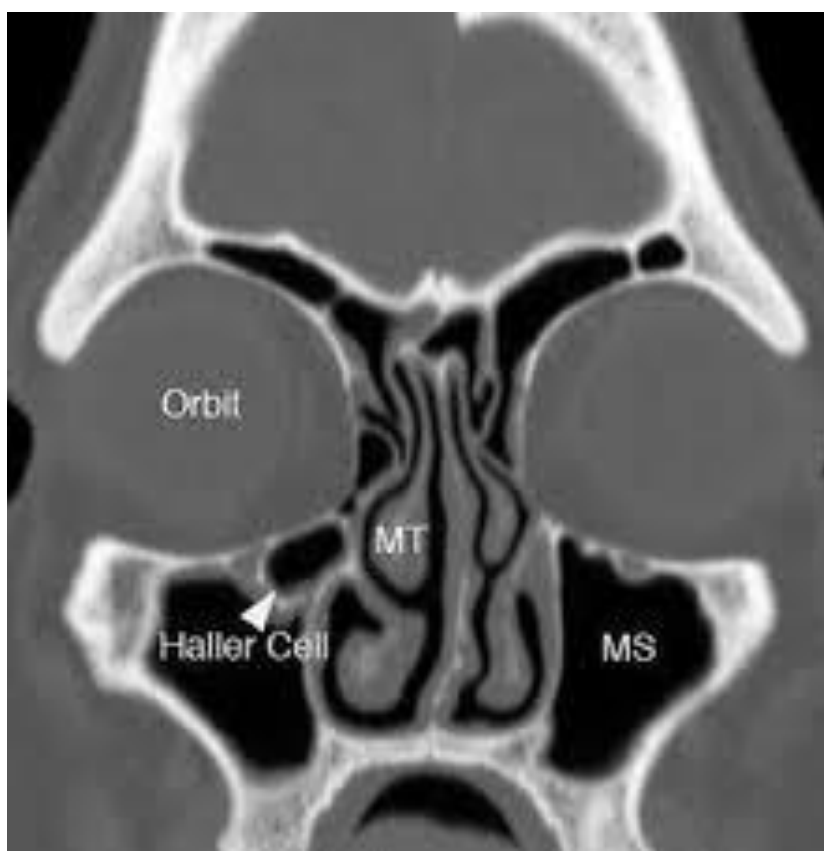


**Slika 20. CT paranazalnih sinusa**

CT omogućuje dobivanje detaljnih, visokorezolucijskih slika koštanih struktura i mekih tkiva u području sinusa. Ova pretraga koristi rendgenske zrake koje prolaze kroz tijelo bolesnika, a detektori mjere količinu apsorbirane energije, što se računalno obrađuje u slike poprečnih presjeka (aksijalnih snimaka). Moderna spiralna ili multidetektorska CT tehnologija omogućuje brzo snimanje s minimalnom dozom zračenja.

CT snimke pružaju ključne informacije za kirurško planiranje poput anatomske strukture i varijacije precizno prikazuje koštane strukture, septum, nosne školjke, ostiomeatalni kompleks i odnos sinusa prema okolnim strukturama poput orbita i lubanjske osnovice. Anatomske varijacije, poput paradoksalnih srednjih nosnih školjki ili Hallerovih ćelija (Slika 21.) koje mogu utjecati na drenažu sinusa i povećati rizik od komplikacija tijekom operacije. Otkriva patološke promjene kao što su zadebljanje sluznice, prisutnost tekućine ili gnoja, polipe, ciste ili tumore unutar sinusa. Procjena prohodnosti ostiomeatalnog kompleksa je ključna za drenažu

sinusa, uključujući čeljusni (maksilarni), prednji etmoidni i frontalni sinus. Opstrukcija u ovom području često dovodi do kroničnog sinuitisa. [15]



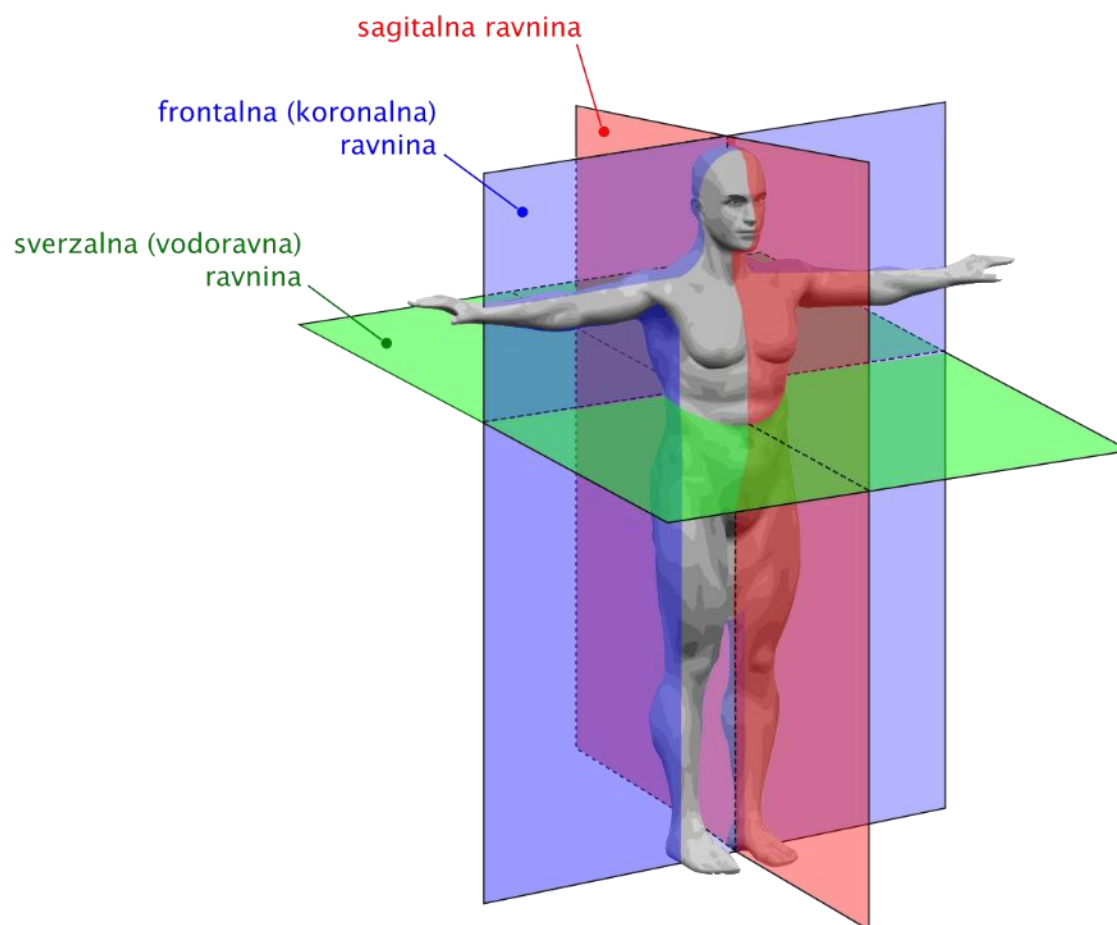
**Slika 21. Hallerove stijenke [16]**

Način rada CT-a osnuje se od rendgenske cijevi koja rotira oko tijela bolesnika i niza detektora koji su postavljeni nasuprot cijevi (Slika 22.). Kada se snimanje započne, rendgenska cijev emitira snop rendgenskih zraka koji prolaze kroz tijelo bolesnika pod različitim kutovima zbog rotacije cijevi. Detektori mjere intenzivnost zraka koje su prošle kroz tijelo i pretvaraju te informacije u električne signale. Rendgenske zrake se apsorbiraju različito ovisno o gustoći i sastavu tkiva kroz koje prolaze. Gusta tkiva poput kostiju apsorbiraju više zraka i stoga se pojavljuju svjetlije na konačnoj slici, dok meka tkiva apsorbiraju manje zraka i prikazuju se tamnije.



**Slika 22. CT uređaj [18]**

Prikupljeni podaci šalju se računalu koje pomoću složenih matematičkih algoritama rekonstruira detaljne slike presjeka tijela. snimanja uključuju korištenje tankih presjeka, obično od 0,2 do 1 mm, za visoku prostornu rezoluciju. Slike se mogu rekonstruirati u različitim ravninama poput koronalnih, sagitalnih i 3D prikaza (Slika 23.), što olakšava kirurško planiranje. Prije snimanja, bolesniku se obično ne zahtijeva posebna priprema, osim uklanjanja metalnih predmeta koji mogu interferirati sa slikom. [17]



**Slika 23. Ravnine po kojima je podijeljeno ljudsko tijelo [19]**

Magnetska rezonancija (MR) koristi snažno magnetsko polje i radiofrekventne valove za stvaranje detaljnih slika mekih tkiva (MRI). Za razliku od CT-a, MR ne koristi ionizirajuće zračenje, što je prednost, posebno kod mlađih bolesnika ili onih koji zahtijevaju ponovljena snimanja.

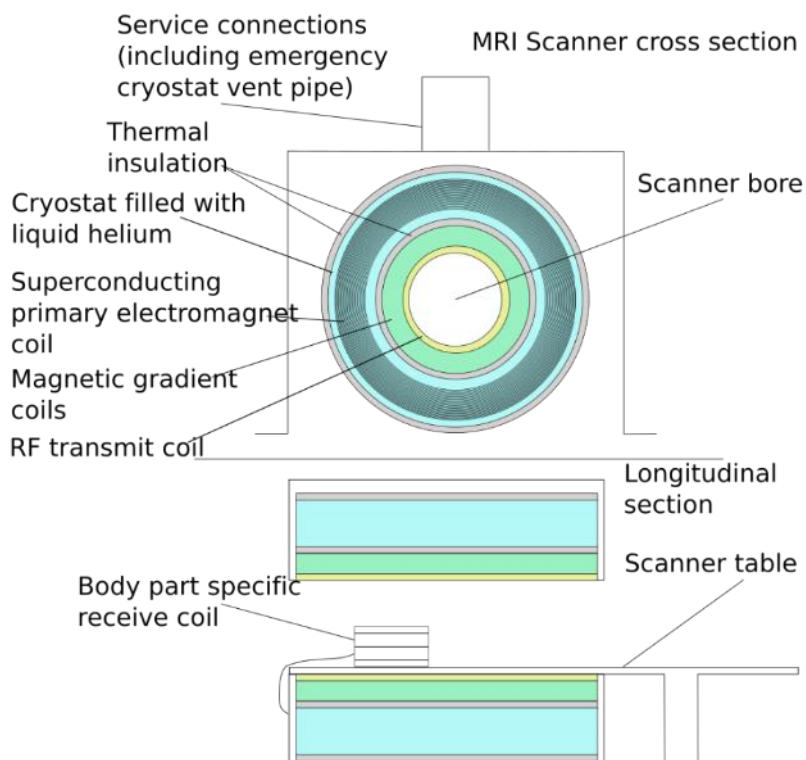
MR skener sastoji se od velikog, snažnog magneta u obliku cijevi s otvorom kroz koji se bolesnik postavlja (Slika 24.).



**Slika 24. MR uređaj [20]**

Osnovni princip rada MR-a temelji se na svojstvima vodikovih protona u tijelu, koji su prisutni u vodi i mastima u tkivima (Slika 25.). Kada se bolesnik smjesti unutar magnetskog polja, protoni se poravnavaju u smjeru tog polja. Primjenom radiofrekventnih impulsa određene frekvencije, protoni apsorbiraju energiju i prelaze u pobuđeno stanje. Kada se radiofrekventni impuls prekine, protoni se vraćaju u svoje početno stanje, oslobađajući energiju u obliku radiofrekventnih signala. Ovi signali se detektiraju i obrađuju pomoću složenih računalnih algoritama kako bi se stvorile detaljne slike unutarnjih struktura. [17]

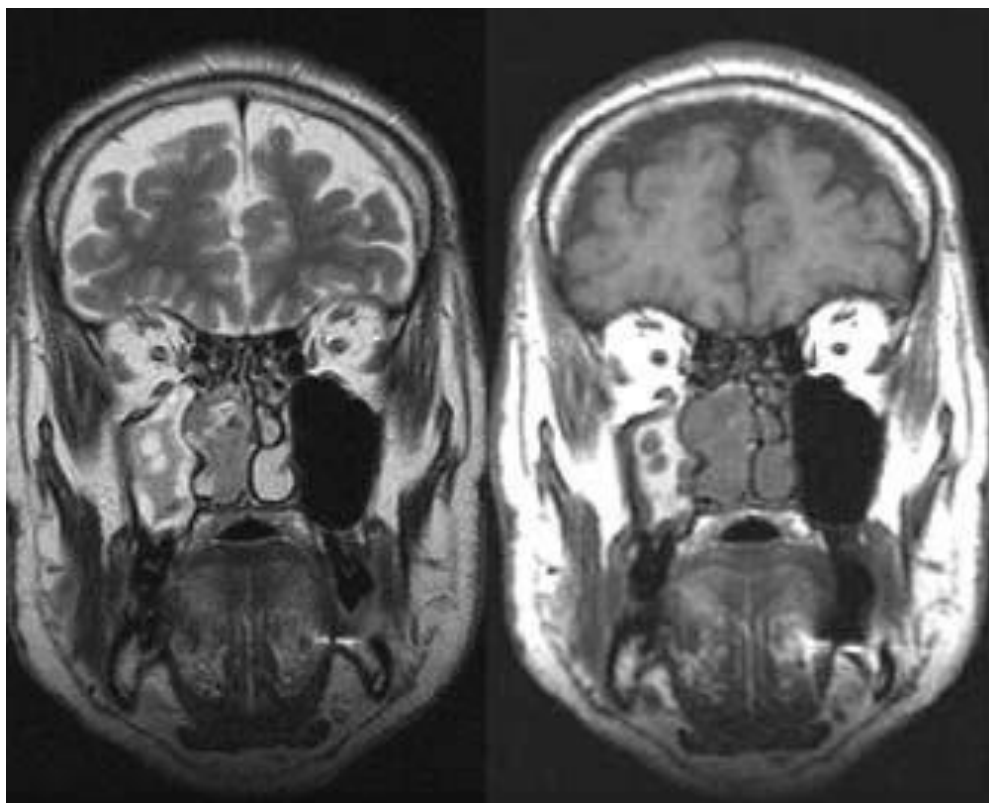




**Slika 25. MR: način rada [21]**

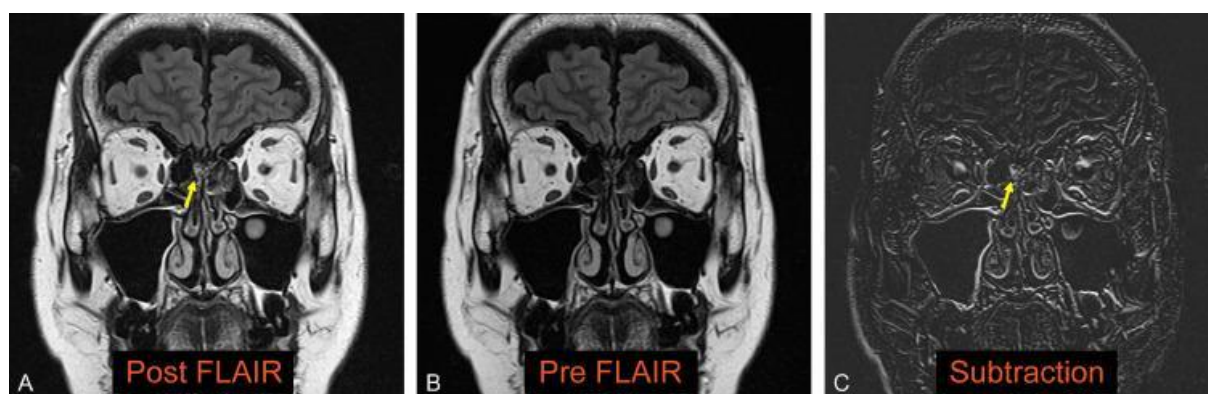
MR je posebno korisna u diferencijaciji tkiva, omogućuje dobivanje različitih vrsta slika koje pružaju detaljan uvid u unutarnju strukturu tkiva, posebno mekih tkiva, što je ključno za dijagnostiku bolesti sinusa.

Različite MRI sekvence koriste se za isticanje različitih svojstava tkiva, a najčešće korištene su T1-ponderirane, T2-ponderirane, FLAIR (eng. *Fluid Attenuated Inversion Recovery*), STIR (eng. *Short Tau Inversion Recovery*) i difuzijski ponderirane slike (DWI). Na T1-ponderiranim slikama, masnoća i proteini daju visok signal, dok je voda tamnija. Na T2-ponderiranim slikama, voda i upalna tekućina daju visok signal, što olakšava detekciju upalnih procesa (Slika 26.). U slučaju proširenja patoloških procesa ako postoji sumnja na proširenja tumora u orbite, baze lubanje ili intrakranijalne strukture, MR pruža bolji prikaz ovih područja. Također je korisna u otkrivanju komplikacija poput meningitisa ili apscesa. [17]



Slika 26. MR: snimka T1 (desno) i snimka T2 (lijevo) [22]

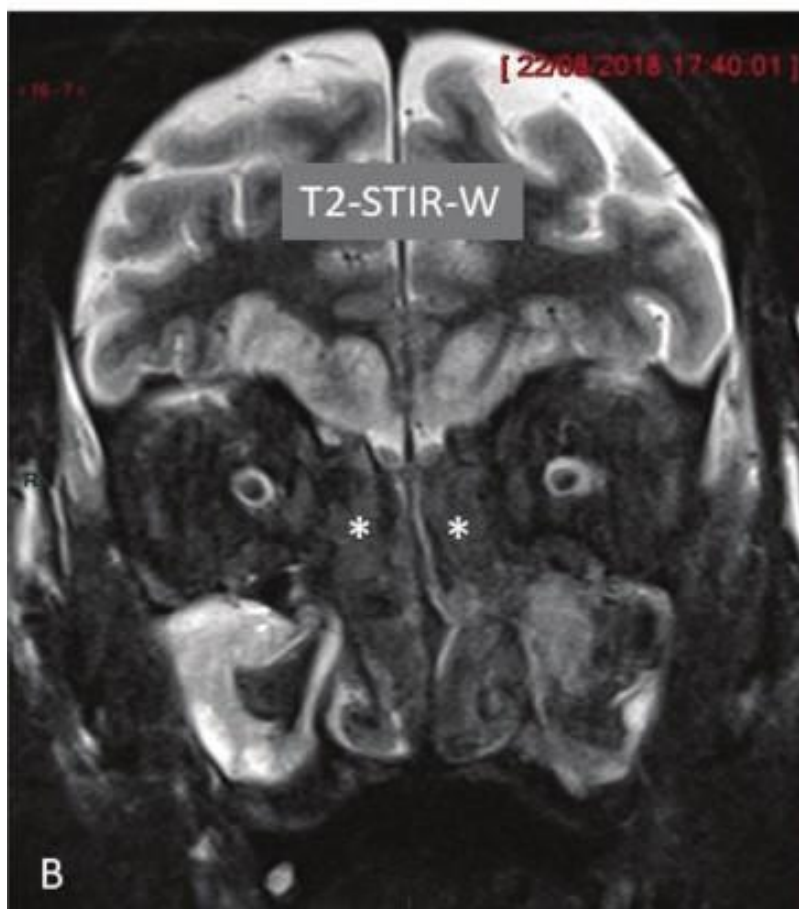
Sekvence FLAIR su modifikacija T2-ponderiranih slika (Slika 27.) gdje se signal slobodne tekućine potiskuje. Ovo je posebno korisno za otkrivanje lezija u blizini cerebrospinalne tekućine jer eliminiira njen visok signal, omogućujući bolju vizualizaciju patoloških promjena. U slučaju sinusa, FLAIR može pomoći u razlikovanju između cista i upalnih promjena.



Slika 27. MR: A – nakon upotrebe FLAIR sekvence, B – prije upotrebe FLAIR sekvence, C – subtrakcija sekvence B od sekvence A [23]

STIR sekvence koriste se za potiskivanje signala masnoće, što omogućuje bolju detekciju edema i upalnih promjena u tkivima bogatim masnoćom (Slika 28.). Ovo je korisno za

otkrivanje patoloških procesa u mekim tkivima oko sinusa, poput orbitalnog celulitisa ili apscesa.



**Slika 28. MR: T2 sekvenca uz primjenu STIR-a [24]**

Difuzijski ponderirane slike (DWI) mjere gibanje molekula vode u tkivima i korisne su za otkrivanje područja ograničene difuzije, što je karakteristično za akutne ishemijske procese ili apscese. U kontekstu sinusa, DWI može pomoći u razlikovanju između apscesa (koji pokazuju ograničenu difuziju) i drugih lezija poput tumora ili upalnih promjena. U usporedbi s CT-om vrijeme snimanja je duže, a bolesnik mora mirno ležati u uskom prostoru, što može biti izazovno za klaustrofobične osobe. Za CT, važno je procijeniti moguće alergije na kontrastno sredstvo ,ako se koristi, i bubrežnu funkciju, budući da kontrast može biti nefrotoksičan. Za MR, kontraindikacije uključuju prisutnost metalnih implantata, *pacemakera* ili drugih uređaja koji mogu reagirati na magnetsko polje.

## **4. SUVREMENI UREĐAJI I MOGUĆNOSTI AUTOMATIZACIJE U ENDOSKOPSKOJ KIRURGIJI SINUSA**

### **4.1. Suvremeni uređaji**

Razvoj tehnologije u području medicinske opreme donio je značajne napretke u kirurškim postupcima, tako i u endoskopskoj kirurgiji sinusa. Navigacijski sustavi i softveri za planiranje postali su neizostavni alati koji povećavaju preciznost i sigurnost zahvata. Sustavi Medtronic StealthStation, Brainlab ENT Navigation System, Stryker NAV3i Image-Guided Surgery System, Fiagon Navigation System i Scopis Hybrid Navigation se primjenjuju u endoskopskoj kirurgiji sinusa.

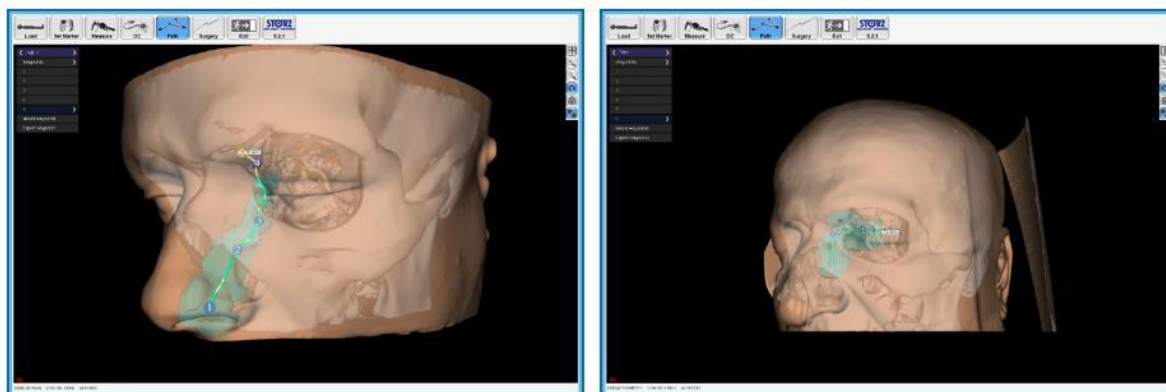
Sustavi omogućuju integraciju CT i MRI snimaka, što pruža detaljnu vizualizaciju anatomije bolesnika. U pravilu sustavi sadrže: monitor za vizualizaciju i navigaciju, optički sustav za praćenje, elektromagnetski (EM) sustav za praćenje i računalo. Računalo je opremljeno snažnim procesorom za brzu obradu podataka, dok velik dodirni zaslon visoke rezolucije predstavlja interaktivno korisničko sučelje (Slika 29.). Optički sustav za praćenje koristi infracrvene kamere visoke brzine osvježavanja i preciznosti za praćenje položaja kirurških instrumenata opremljenih reflektirajućim markerima. Optički sustav može pratiti više instrumenata istovremeno s visokom točnošću, obično od 1 do 2 mm. Alternativno ili komplementarno optičkom sustavu, EM praćenje koristi elektromagnetsko polje za praćenje instrumenata s ugrađenim EM sensorima. Ovo je korisno u situacijama kada je linija vidljivosti ograničena ili kada se rade minimalno invazivni zahvati.



**Slika 29. Medtronic StealthStation Surgical Navigation System [25]**

Glavni nedostaci ovih sustava su visoka cijena. Sustavi utječu na trajanje zahvata, njihovo postavljanje produžuje operaciju za otprilike 10 minuta, a s druge strane može značajno skratiti samu operaciju. Također, njihova kompleksnost zahtijeva posebnu obuku osoblja, što povećava troškove i vrijeme implementacije [25].

Dakle, u vezi zahvata otvaranja maksilarnog sinusa, opisani sustavi načelno omogućuju planiranje trajektorije i označavanje kritičnih točaka te ukomponiranost proširene stvarnosti (Slika 30.).



Slika 30. Prijeoperacijsko planiranje kirurške putanje

## 4.2. Mogućnosti automatizacije

Automatizacija kirurških zahvata predstavlja jedno od najzbudljivijih područja upotrebe modernih tehnologija u medicini. Razvoj robotske tehnologije donio je nove mogućnosti za povećanje točnosti, preciznosti, sigurnosti i učinkovitosti kirurških postupaka. Postavlja se pitanje može li se endoskopski zahvat otvaranja čeljusnog sinusa automatizirati te je li moguće da robot izvede takav zahvat.

Trenutačno, robotska kirurgija već ima primjenu u raznim medicinskim disciplinama. Sustavi poput *da Vinci Surgical System* [27] široko se koriste u otorinolaringologiji, ginekologiji i općoj kirurgiji, omogućujući kirurzima upravljanje robotskim instrumentima uz pomoć konzole, što pruža veću preciznost i kontrolu. U području otorinolaringologije, robotska kirurgija primjenjuje se u transoralnoj robotskoj kirurgiji za uklanjanje tumora u području ždrijela, grkljana i usne šupljine.

Endoskopska kirurgija sinusa zahtijeva visoku razinu preciznosti zbog složene anatomije i blizine važnih struktura poput orbite, optičkog živca i baze lubanje. Automatizacija ovog zahvata predstavlja izazov iz nekoliko razloga.

Prvo, složena i varijabilna anatomija sinusa znači da svaki bolesnik ima jedinstvene anatomske karakteristike, s mogućim varijacijama koje mogu utjecati na pristup i izvođenje zahvata. Robot bi morao biti sposoban prilagoditi se ovim varijacijama u realnom vremenu.

Drugo, potrebna je taktilna osjetljivost; kirurzi se oslanjaju na taktilni *feedback* kako bi osjetili otpor tkiva i prilagodili svoje pokrete, a robotski sustavi trenutačno nemaju sposobnost pružanja adekvatne haptike koja bi zamijenila ljudski dodir.

Treće, sigurnosni rizici su značajni; automatizacija nosi rizik od pogrešaka koje bi mogle dovesti do oštećenja kritičnih struktura, a u slučaju neočekivanih situacija ljudski faktor je ključan za donošenje brzih odluka.

Unatoč navedenim izazovima, značajan napredak ostvaren je u robotskoj asistenciji tijekom endoskopskih zahvata. Sustavi poput *Medrobotics Flex Robotic System* omogućuju kirurzima korištenje fleksibilnih endoskopskih instrumenata uz robotsku pomoć, povećavajući preciznost i stabilnost, smanjujući umor kirurga te omogućujući pristup teško dostupnim područjima. Kombinacija navigacijskih sustava i robotske tehnologije predstavlja obećavajući smjer razvoja. Navigacijski sustavi pružaju *real-time* informacije o položaju instrumenata u odnosu na bolesnikovu anatomiju, dok robotski sustavi omogućuju precizno vođenje instrumenata duž unaprijed definirane trajektorije. Ovo može povećati sigurnost zahvata, smanjujući rizik od pogrešaka uzrokovanih ljudskim faktorom.

Za postizanje potpune automatizacije potrebno je razviti napredne algoritme umjetne inteligencije koji mogu donositi odluke u stvarnom vremenu, prepoznati anatomske strukture i prilagoditi se neočekivanim situacijama. Trenutno se istražuju modeli strojnog učenja koji bi mogli omogućiti robotima da prepoznaju tkiva i planiraju kirurške korake. Međutim, ova tehnologija još nije prilagođena složenosti endoskopske kirurgije sinusa. Postoje značajni izazovi i ograničenja.

Tehnički izazovi uključuju potrebnu preciznost za sigurno izvođenje zahvata u blizini kritičnih struktura, što zahtijeva tehnologiju koja trenutno nije dostupna u potpuno autonomnim robotskim sustavima.

Regulatorni i etički aspekti uvođenja autonomnih robota u kirurgiju postavljaju pitanja odgovornosti, sigurnosti bolesnika i etičkih implikacija.

Potreba za ljudskim nadzorom ostaje ključna za reagiranje na nepredviđene okolnosti i donošenje složenih odluka.

Budući smjerovi razvoja uključuju poboljšanje robotske asistencije s fokusom na razvoj sustava koji povećavaju sposobnosti kirurga, poput haptičke povratne informacije, filtriranja tremora i povećanja preciznosti pokreta. Istraživanja u području umjetne inteligencije i strojnog učenja usmjerena su na razvoj algoritama koji mogu pomoći u prepoznavanju anatomije i

planiranju zahvata u realnom vremenu. Razvoj sustava koji omogućuju intuitivnu interakciju između kirurga i robota, gdje robot djeluje kao produžetak kirurških ruku, također je važan.

Iako je potpuna automatizacija endoskopskog otvaranja čeljusnog sinusa trenutno izvan dosega dostupne tehnologije, napredak u robotskoj asistenciji obećava poboljšanja u točnosti, preciznosti i sigurnosti zahvata. Robotski sustavi mogu djelovati kao pomoć kirurzima, povećavajući njihovu sposobnost izvođenja složenih postupaka. Daljnja istraživanja i razvoj u području umjetne inteligencije, robotske tehnologije i navigacijskih sustava ključni su za budućnost automatizacije u kirurgiji.

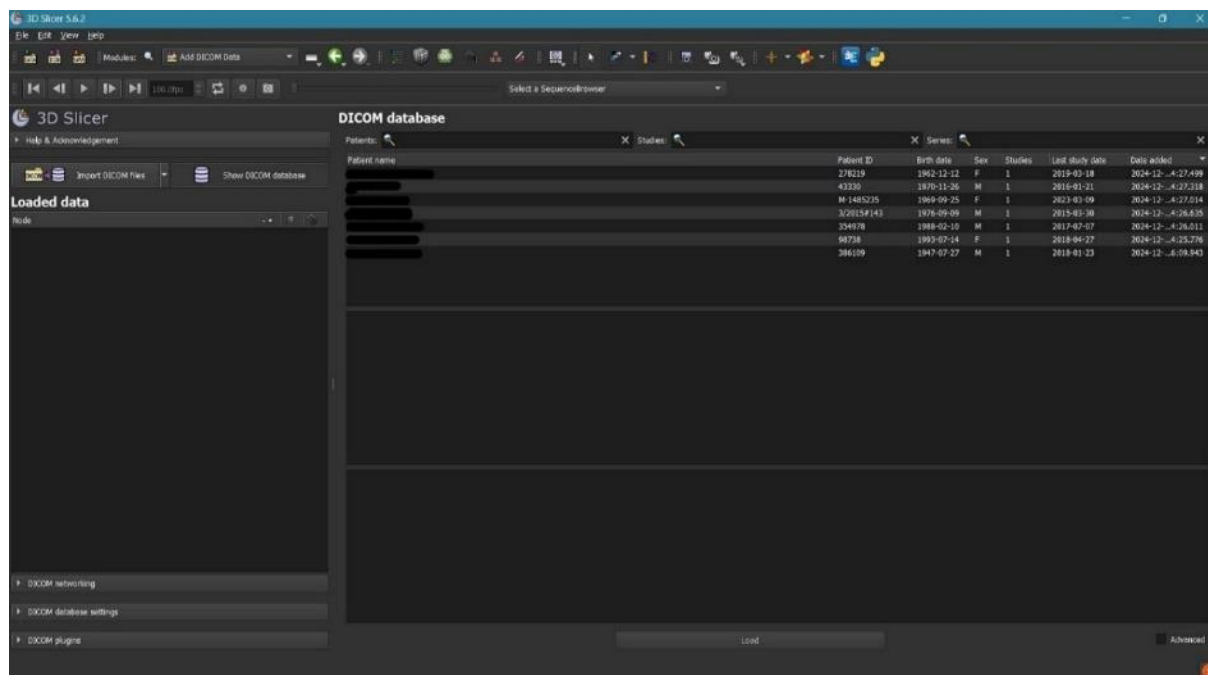
**U nastavku ovoga rada nastojat će se istražiti mogućnost digitalizacije endoskopskog zahvata otvaranja maksilarnog sinusa korištenjem tehnologije virtualne stvarnosti. Na taj način pokušalo bi se, barem posredno, pridonijeti rješavanju nekih od gore navedenih izazova, u smislu: boljeg razumijevanja, snimanja, iznalaženja pogodnih metoda, stabilizacije i normiranja rada kirurga.**



## 5. OTVARANJE ČELJUSNOG SINUSA U VIRTUALNOJ STVARNOSTI

U ovom poglavlju opisat će se izvedba kirurškog zahvata otvaranja čeljusnog (maksilarnog) sinusa primjenom tehnologije virtualne stvarnosti.

Modeli bolesnika odnosno lubanje bolesnika su zasnovani na CT-ovima stvarnih bolesnika. CT snimci se spremaju u obliku datoteka DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*). Općenito, datoteke DICOM sadrže digitalne slike bolesnika iz MRI i CT uređaja te metapodatke koje sadrže informacije o bolesniku, pregledu, postavke uređaja i datuma snimanja. Za obradu datoteka DICOM korišten je softver Slicer (Slika 31.) koji omogućava čitanje, vizualizaciju i modificiranje unošenih podataka. Slicer je *open source* program koji radi na bazi modula, koje bilo tko može napraviti i koristiti. Za rukovanje 3D modelima korišten je softverski paket SOLIDWORKS.



Slika 31. Naslovni prozor softvera Slicer s bazom podataka

## 5.1. Definiranje trajektorije otvaranja maksilarnog sinusa

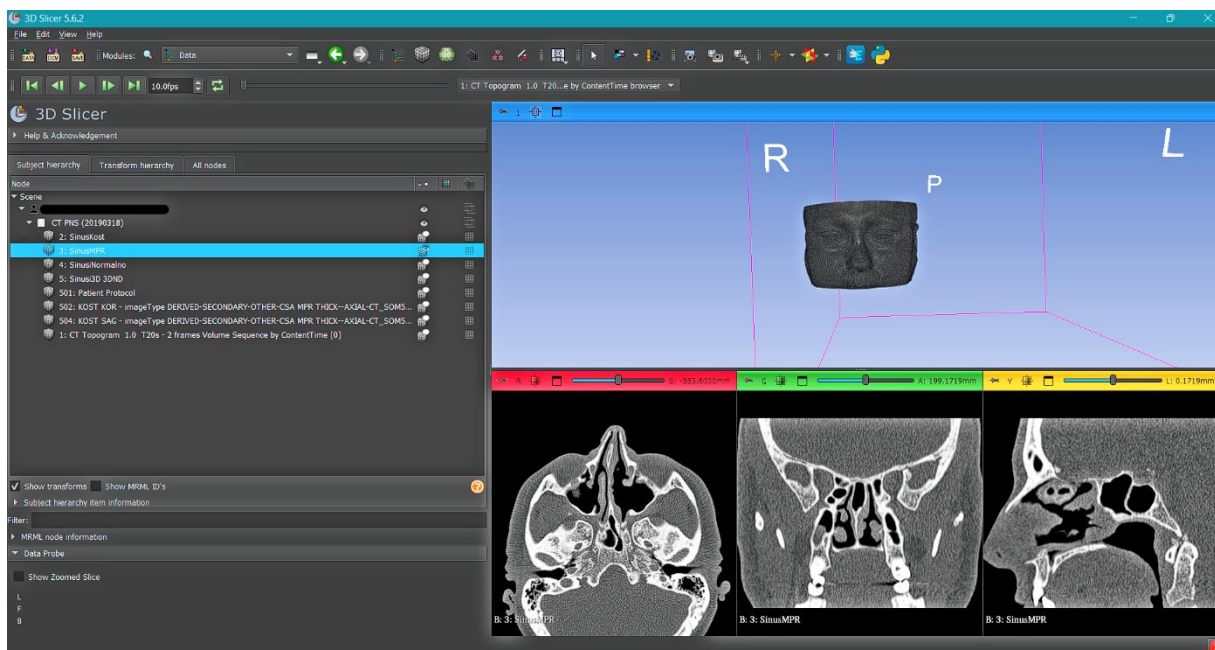
Trajektorija otvaranja čeljusnog sinusa je definirana anatomijom bolesnika i vještinom kirurga. Poznavanje trajektorije od suštinskog je fizikalnog značaja za zahvat, premda nije prioritet pri planiranju zahvata. Naime, kirurg planira zahvat prije svega na osnovi anatomije bolesnika, pri čemu je podrazumijevano da svojim znanjem, iskustvom i vještinom ostvaruje odgovarajuću trajektoriju.

Za digitalnu virtualizaciju zahvata, trajektorija će se određivati na osnovi podataka o šestoro bolesnika.

Obradom bolesnika iz baze vidjet će se razlike u njihovoj anatomiji, te posebno kako anatomija utječe na trajektoriju za otvaranje čeljusnog sinusa.

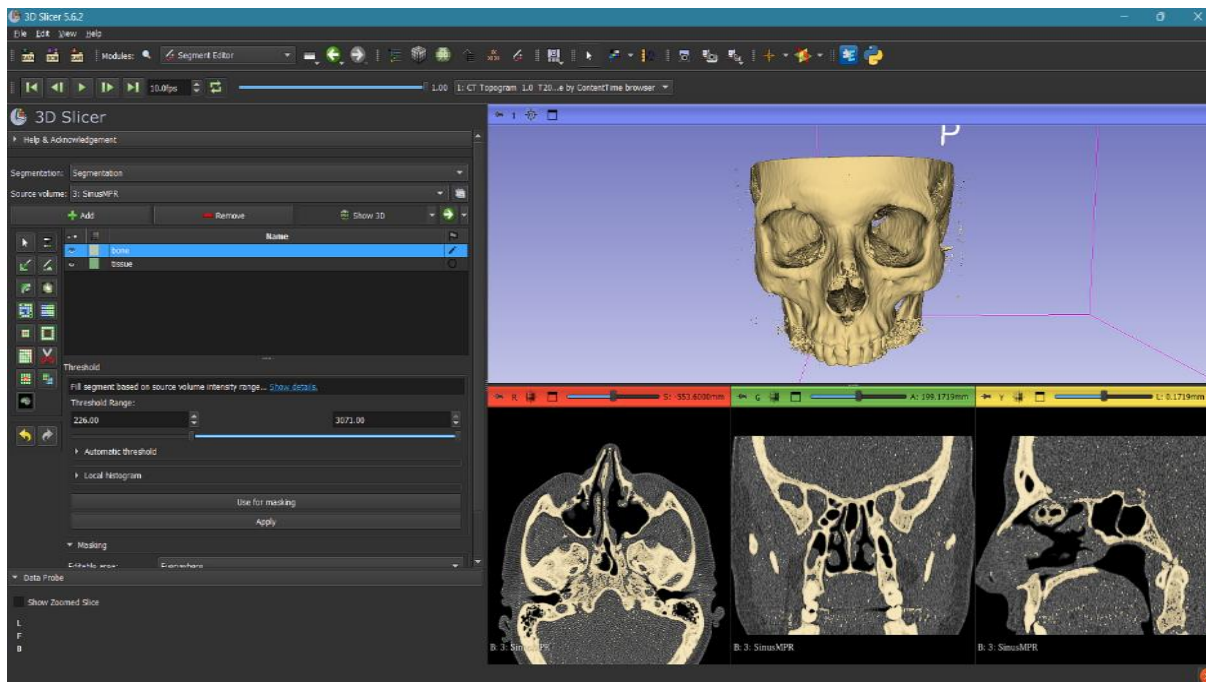
Bolesnici variraju po spolu i znatno u godinama: najstariji bolesnik ima 77 godina dok najmlađi 31.

U softveru Slicer, biranjem prvog bolesnika s liste, otvara se podatkovni modul (*Data modul*) gdje se mogu vidjeti sve snimke koje su napravljene na dotičnom bolesniku (Slika 32.).

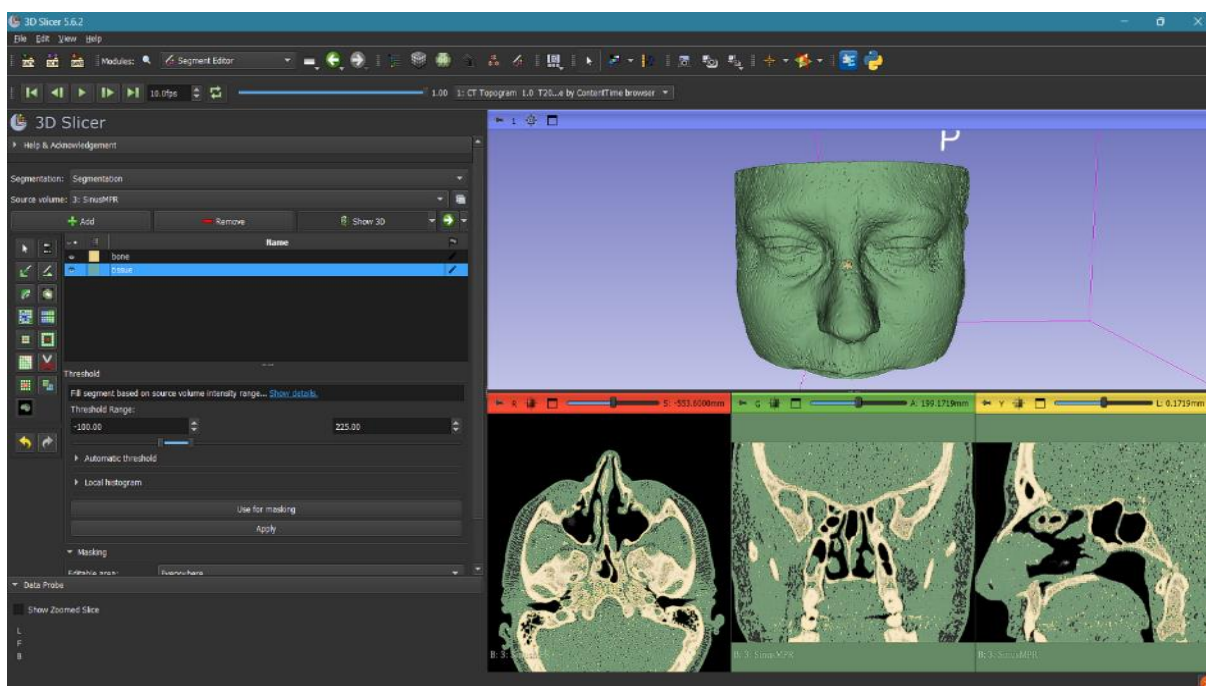


**Slika 32. Data modul u softveru Slicer**

Ovdje se može vidjeti prikaz sagitalne (žuta), koronalne (zelena) i transverzalne (crvena) ravnine te 3D model generiran spajanjem tih ravnina. Radi lakše vizualizacije glava će biti podijeljena u dvije boje pomoću modula za segmentaciju. Segmentacije služi za pridodavanje boje jednom intervalu intezivnosti sive boje, pa je tako za vrijednosti [226,3071] pridodana žuta boja koja prikazuje kosti glave (Slika 33.), dok je za vrijednosti [-100,225] pridodana zelena boja koja će pokazati svo meko tkivo glave (Slika 34.).



Slika 33. Segmentacija glave za prikaz kosti u softveru Slicer



Slika 34. Segmentacija glave za prikaz mekog tkiva i kosti u softveru Slicer

Nakon segmentacije je onda moguće u modulu *Markups* označiti točke značaja na temelju kojih se onda može iscrtati krivulja koja će biti prikaz trajektorije otvaranja čeljusnog sinusa. Trajektorija obuhvaća ulazak i prolazak instrumenta kroz nosnu šupljinu u dubinu do razine fontanele.

Nakon odabira točaka značaja moguće je u istom modulu tablicu točaka eksportirati u obliku tablice. Tablica 1. daje koordinate točaka s obzirom na LPS (*left, posterior, superior*) koordinatni sustav glave u prostoru.

**Tablica 1. Karakteristične točke krivulje za bolesnika 1**

label	l	p	s	defined	selected	visible
T1-1	-101.157	-258.235	-590.787	1	1	1
T1-2	-77.094	-256.351	-579.481	1	1	1
T1-3	-63.344	-250.698	-576.843	1	1	1
T1-4	-530.315	-246.929	-565.914	1	1	1
T1-5	-752.137	-243.118	-559.867	1	1	1
T1-6	-977.778	-236.93	-557.987	1	1	1
T1-7	-116.581	-229.712	-552.346	1	1	1
T1-8	-135.385	-215.618	-555.73	1	1	1
T1-9	-188.034	-207.024	-552.722	1	1	1

Nakon odabira točaka, pomoću Python skripte se najprije transformira LPS koordinate u RAS (*right, anterior, superior*) odnosno  $x$ ,  $y$  i  $z$ , a zatim se zadavanjem točaka iscrtava interpolacijska krivulja za koju je uzeto da izbjegava za 1,5 mm sve što je definirano segmentacijom kao kost. U nastavku je izlist korištene skripte (Slika 35.).

```

import slicer
import numpy as np
import vtk

reference_points = []
ras_points = np.array([[x, -y, z] for x, y, z in reference_points])
spline_node = slicer.mrmlScene.AddNewNodeByClass('vtkMRMLMarkupsCurveNode')
for point in ras_points:
    spline_node.AddControlPoint(point.tolist())
safety_margin = 1.5
segmentation_node = slicer.util.getNode('Segmentation')

if segmentation_node:
    segmentation = segmentation_node.GetSegmentation()
    segmentation_display_node = segmentation_node.GetDisplayNode()
    bone_model = segmentation_node.GetModelNode()
    poly_data = bone_model.GetPolyData() # This should be the surface of the bone
    cell_locator = vtk.vtkCellLocator()
    cell_locator.SetDataSet(poly_data)
    cell_locator.BuildLocator()

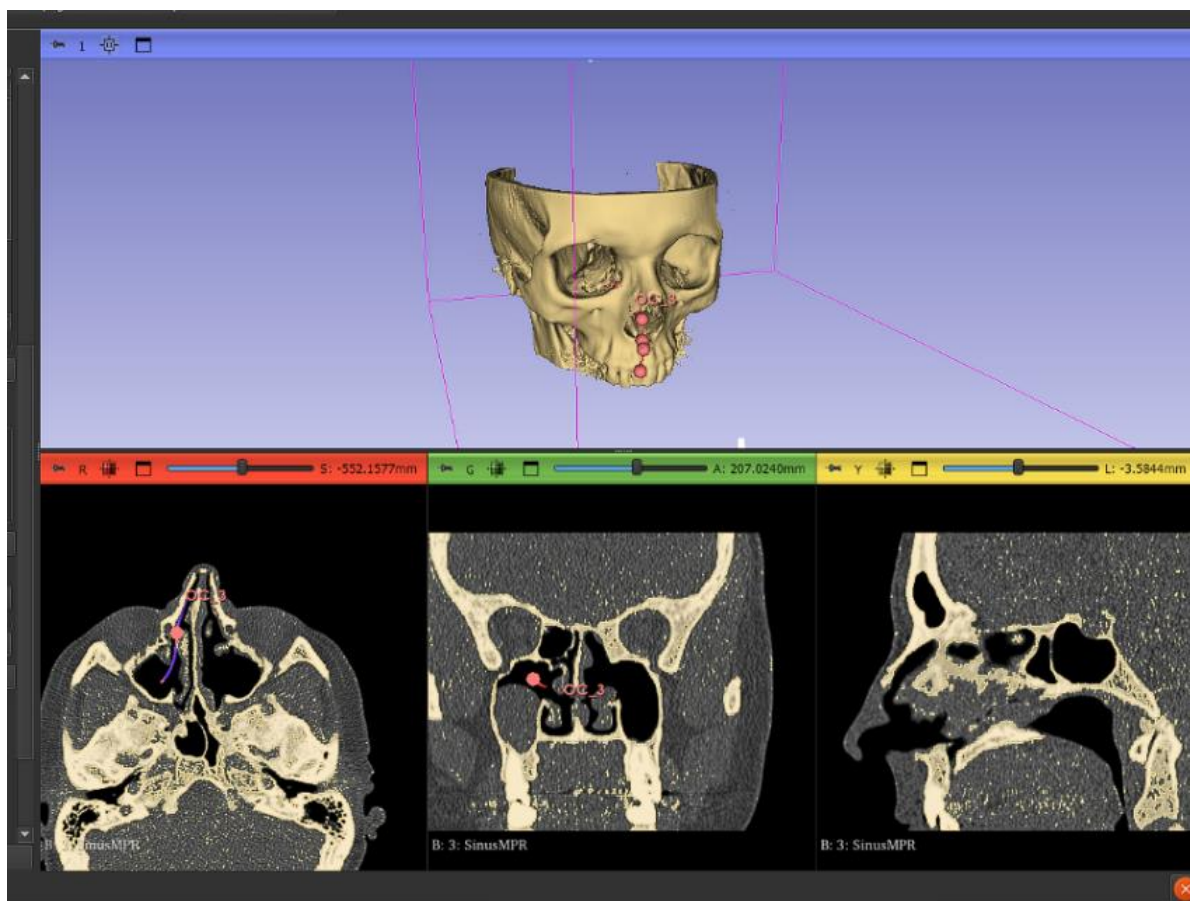
    for i, point in enumerate(ras_points):
        closest_point = [0, 0, 0]
        closest_cell_id = cell_locator.FindClosestPoint(point)
        cell_locator.GetCellCenter(closest_cell_id, closest_point)
        distance = np.linalg.norm(np.array(point) - np.array(closest_point))
        if distance < safety_margin:
            print(f'Collision detected near point {point}. Adjusting position...')

            direction_vector = np.array(closest_point) - np.array(point)
            direction_unit_vector = direction_vector / np.linalg.norm(direction_vector)
            new_point = point + direction_unit_vector * (safety_margin - distance)
            ras_points[i] = new_point
            spline_node.SetNthControlPointPosition(i, new_point.tolist())
            print(f'Adjusted point {i}: {new_point}')
        else:
            print(f'Point {point} is safe from collision.')
    else:
        print("Segmentation node 'Segmentation' not found. Please verify its name in the scene.")
    spline_node.SetAndObserveDisplayNodeID(spline_node.GetDisplayNode().GetID())
    print("Spline successfully created.")

```

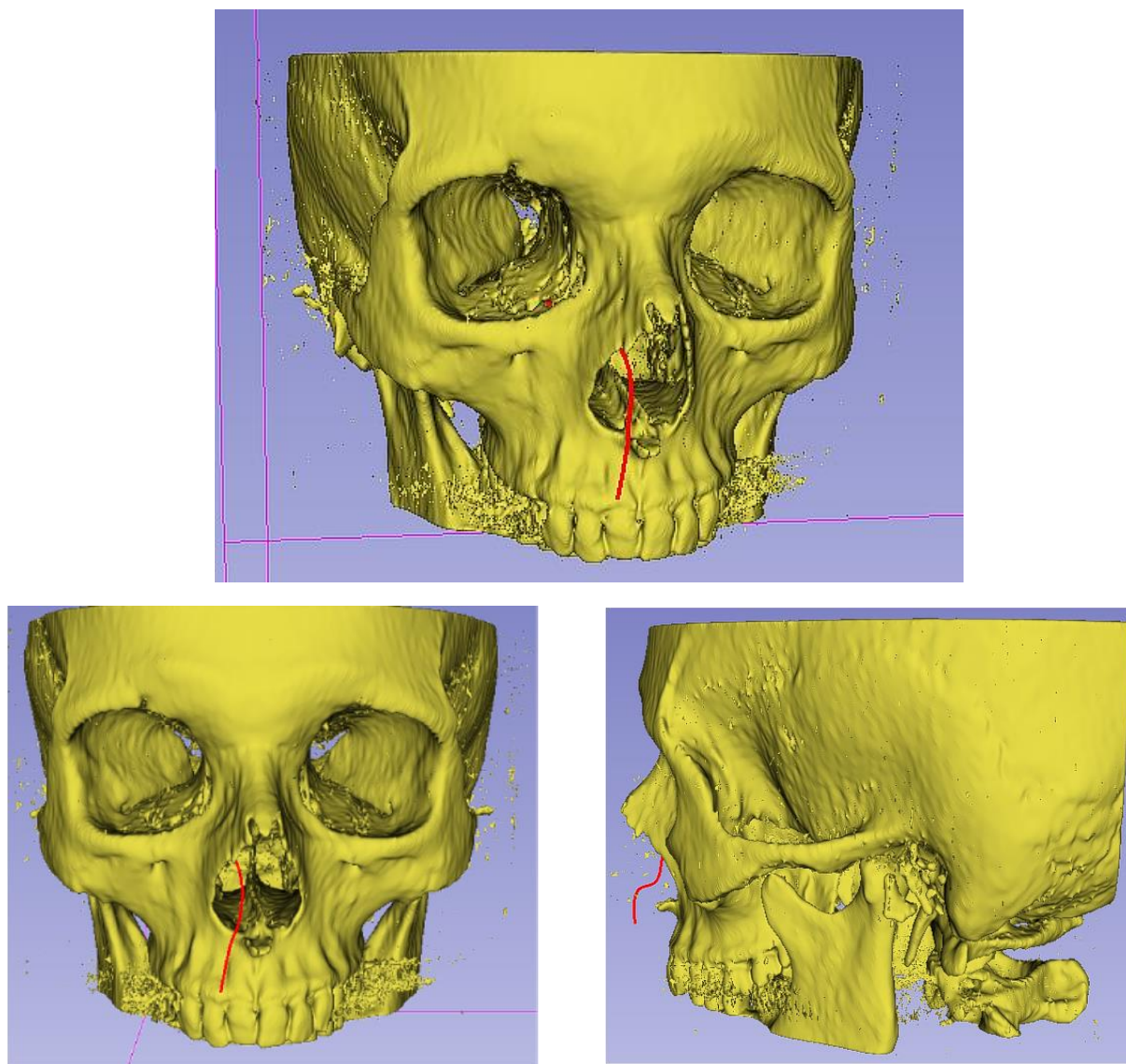
**Slika 35. Izlist Python skripte za iscrtavanje trajektorije odnosno krivulje otvaranja maksilarnog sinusa**

Na slici 36. može se vidjeti prikaz krivulje s obzirom na 2D ravnine te na 3D model segmentacije.



**Slika 36. Krivulja bolesnika 1**

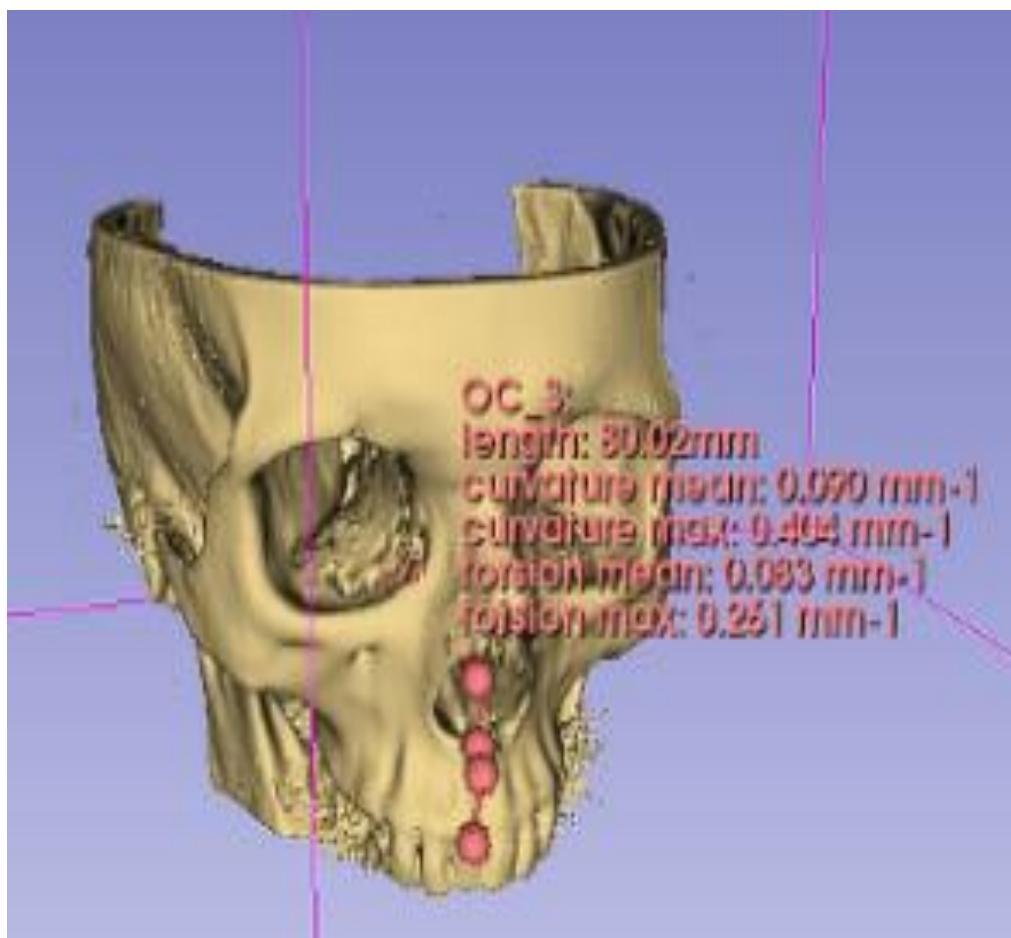
Dio krivulje prekriven koštanim strukturama, slikama 37 i 38 prikazan je model u izometriji odnosno nacrt bokocrt i tlocrt modela i krivulje. prikazana je krivulja no samo djelomično.



**Slika 37. Trajektorija bolesnika 1 prikazana na njegovoj lubanji, u koronalnoj (lijevo) i sagitalnoj (desno) ravnini**

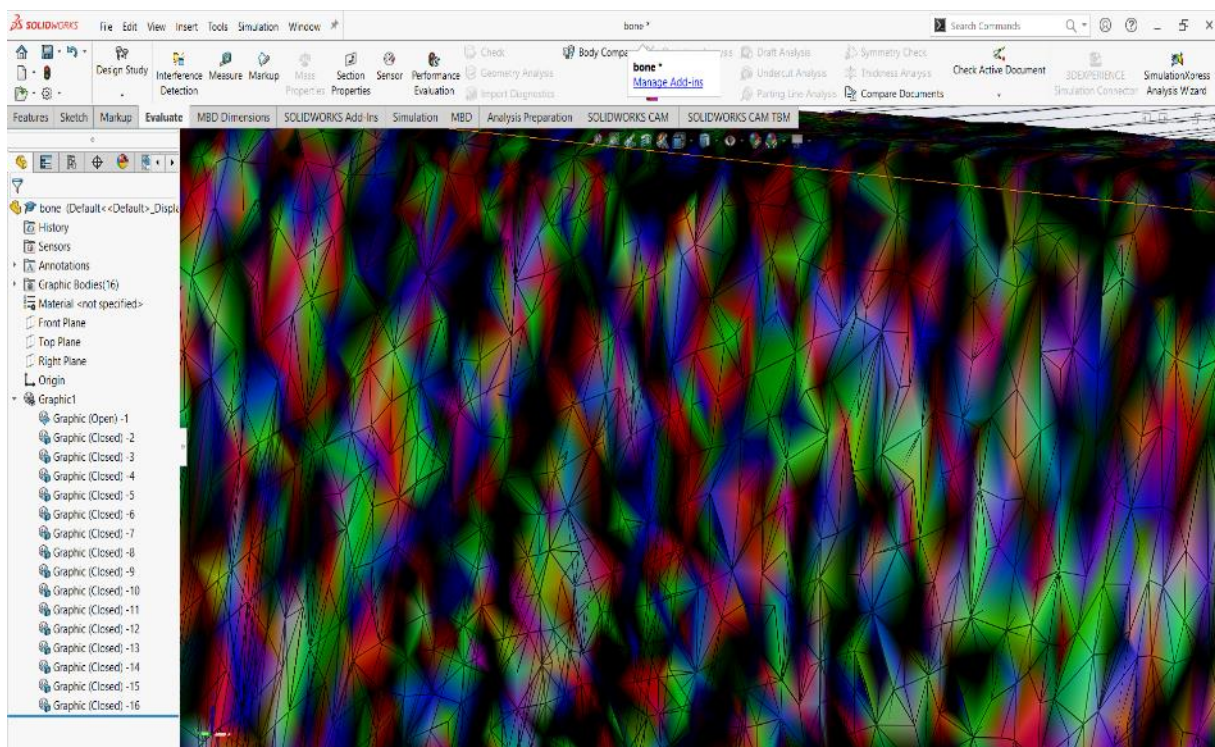
Softver Slicer također daje detalje o krivulji, poput: njene dužine, srednjeg i maksimalnog nagiba krivulje te srednje i maksimalne zakrivljenost krivulje (Slika 39.)





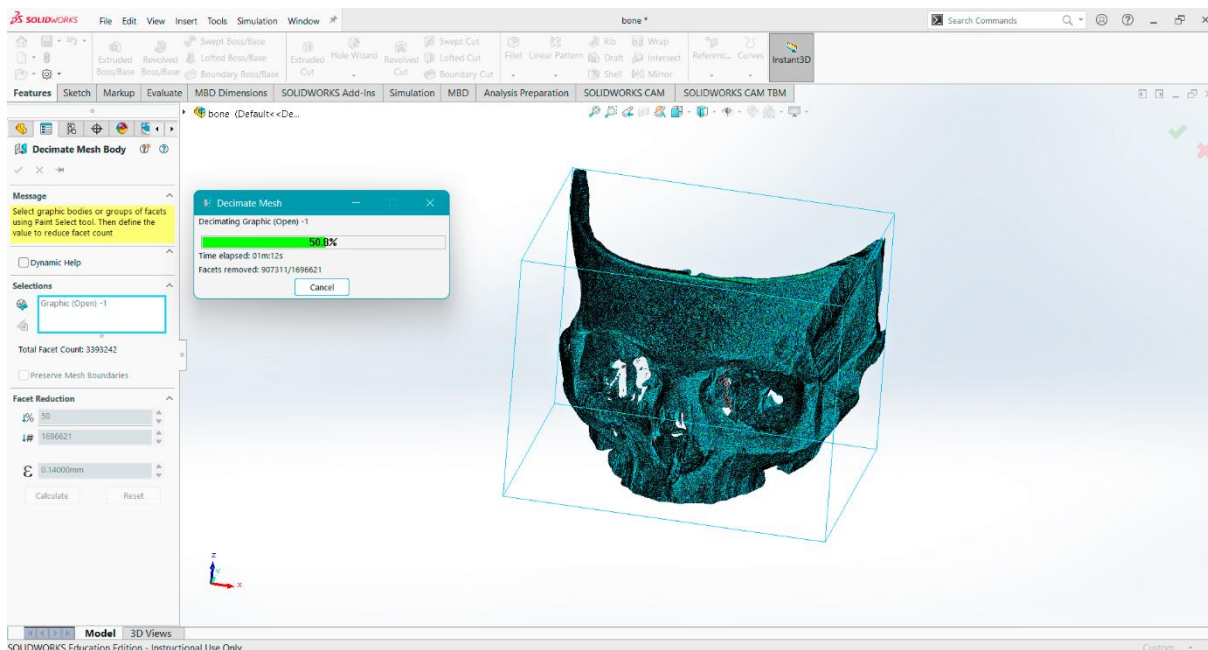
**Slika 38. Detalji krivulje bolesnika 1**

Segmentacije se također mogu eksportirati u obliku 3D modela tj. formata datoteke koji se može koristiti u CAD softverskim paketima kao što su: .ply, .obj, .stl. Nakon otvaranja 3D modela u SOLIDWORKS-u modeli su prikazani kao veliki skup trokutića (Slika 40.) koji imaju funkciju plohe te spajanjem svih njih dobije se model. Zbog velikog broja trokutića u 3D modelu ~14 milijuna trokutića, i datoteka je proporcionalno velika 1,5 GB.



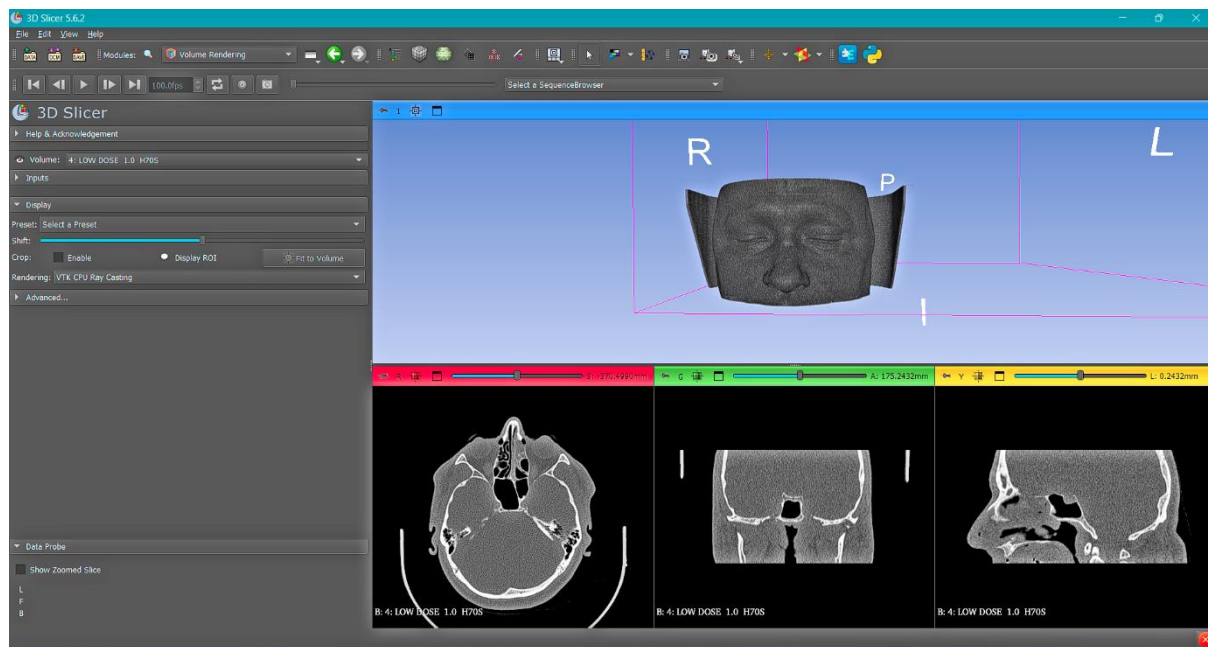
**Slika 39. Detalj 3D lubanje reprezentiran trokutićima**

Pomoću naredbe *decimate mesh body* (Slika 41.) može se smanjiti broj trokutića te tako smanjiti veličinu datoteke i omogućiti lakše upravljanje njome. U naredbi se može odabrati postotak ukupnih trokutića koje se želi ukloniti te maksimalna dozvoljena greška. No, i nakon naredbe model je idalje prevelik, 730 MB, i kompliciran za korištenje pa će se u dijelu pokusa s VR-om uzeti model uzeti opći model lubanje i znatno pojednostavnjen, 23 MB, sa stranice SketchFab. U daljnjem dijelu će biti prikazani CT-ovi drugih bolesnika i komentirane eventualne razlike.

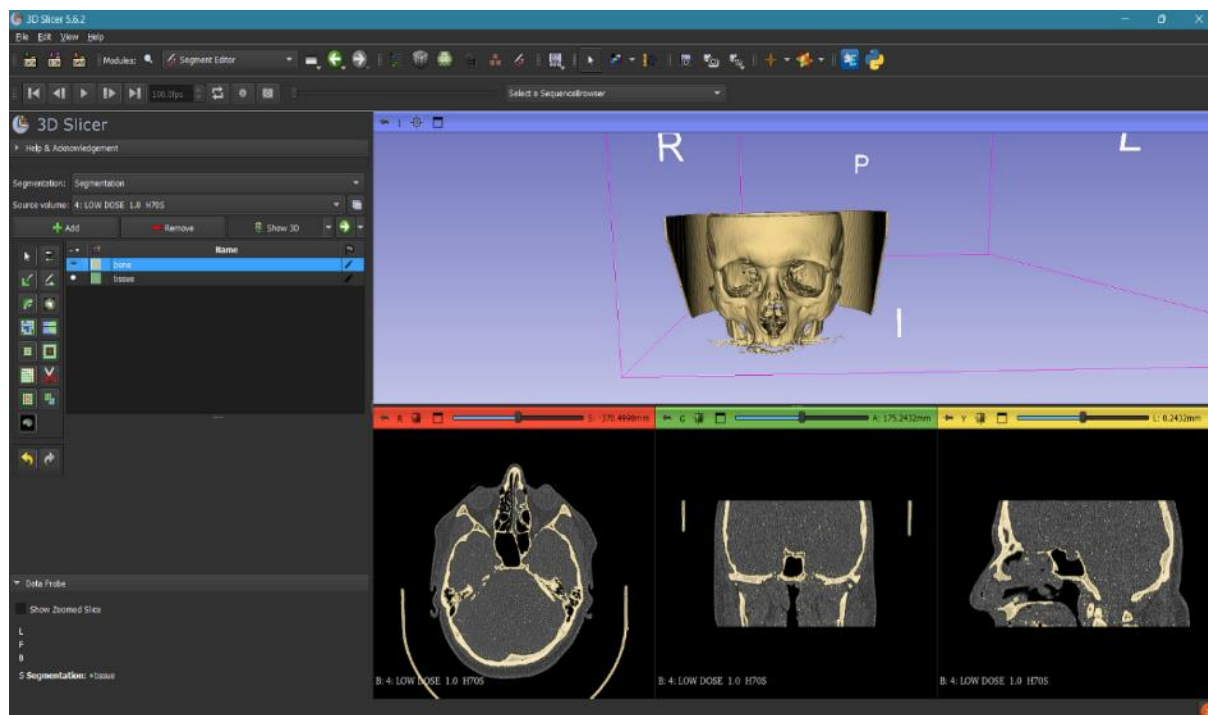


Slika 40. Decimate mesh body

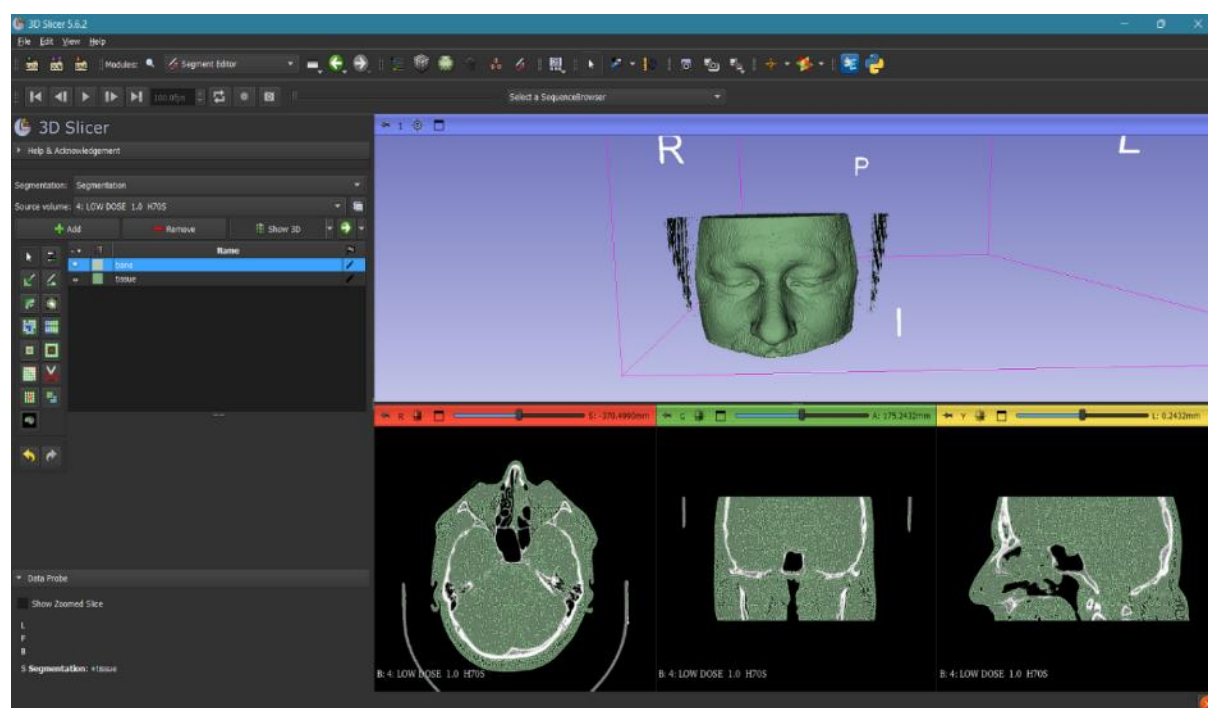
Slika 42. prikazuje CT snimak bolesnika 2. gdje se može vidjeti da za razliku od bolesnika 1 ima desni maksilarni sinus zasjenjen pun sluzi. Slike 43. i 44. pokazuju segmentaciju glave na kosti i na meko tkivo.



Slika 41. CT i 3D prikaz bolesnika 2



Slika 42. Segmentacija kosti bolesnika 2

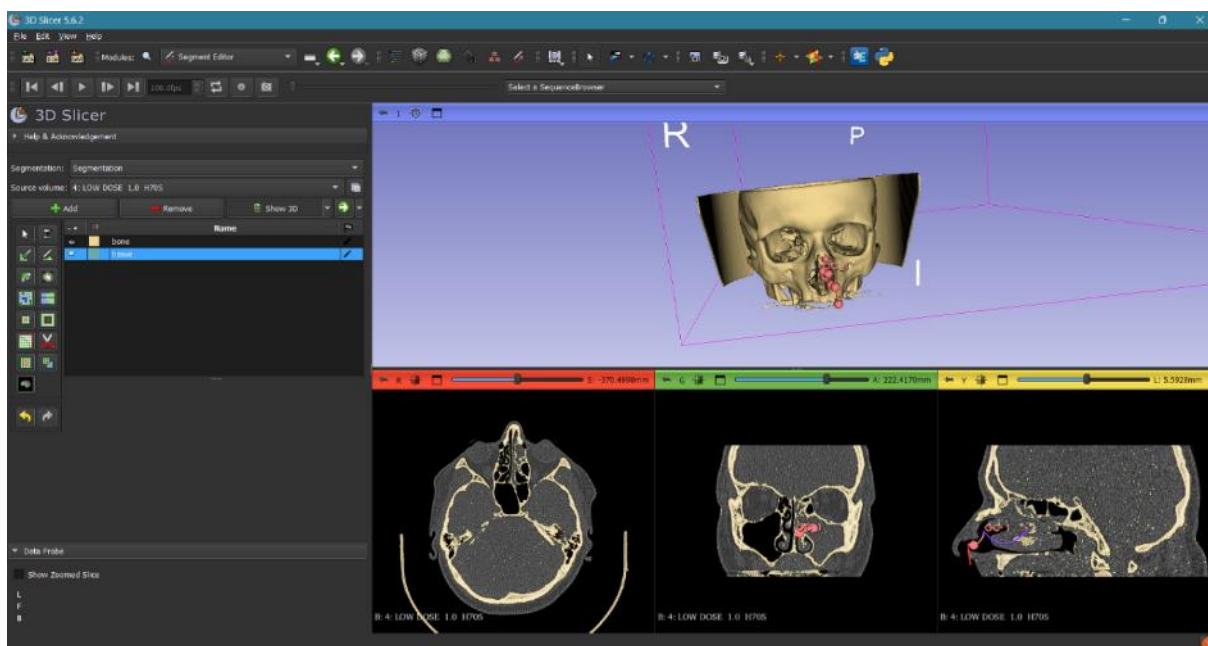


Slika 43. Segmetacija mekog tkiva bolesnika 2

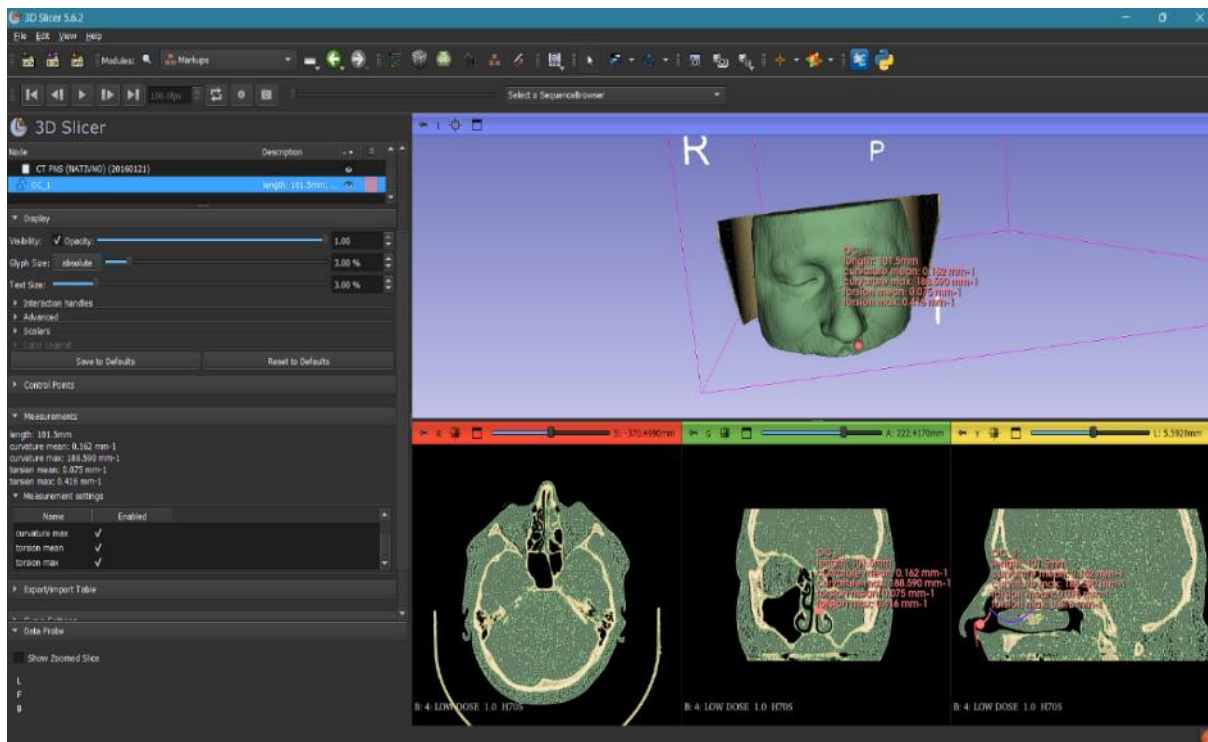
U tablici 2. su prikazane točke krivulje za bolesnika 2. Za razliku od bolesnika 1, čije koordinate su u LPS koordinatnom sustavu, za bolesnika 2 kao i za ostale bolesnike koordinate su u RAS koordinatnom sustavu. Istom Python skriptom, samo bez transformacije koordinatnog sustava, dobivena je krivulja za bolesnika 2 (Slika 44.). Detalji krivulje naznačeni su slikom 46.

**Tablica 2. Karakteristične točke za bolesnika 2**

label	r	a	s	defined	selected	visible
T1-1	-996.973	270.534	-417.919	1	1	1
T1-2	-851.074	272.762	-401.765	1	1	1
T1-3	-559.277	267.748	-400.651	1	1	1
T1-4	-462.012	259.393	-392.295	1	1	1
T1-5	-0.558296	257.919	-389.552	1	1	1
T1-6	-279.148	241.384	-399.043	1	1	1
T1-7	-279.148	222.417	-389.552	1	1	1
T1-8	-781.614	222.417	-385.086	1	1	1
T1-9	-15.074	222.417	-385.644	1	1	1

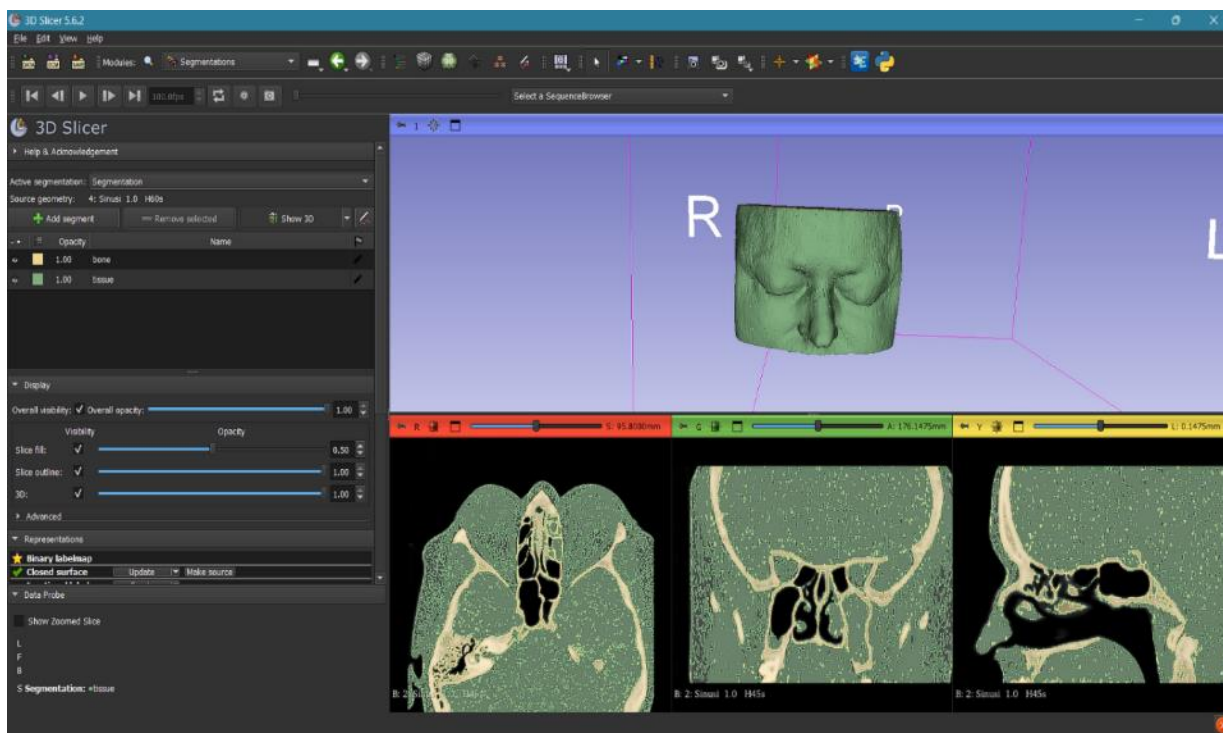


**Slika 44. Prikaz krivulje za bolesnika 2**



Slika 45. Krivulja s mjerama za bolesnika 2

Isto kao i kod bolesnika 2, bolesnik 3 ima u cijelosti zasjenjen desni maksilarni sinus (Slika 47.).

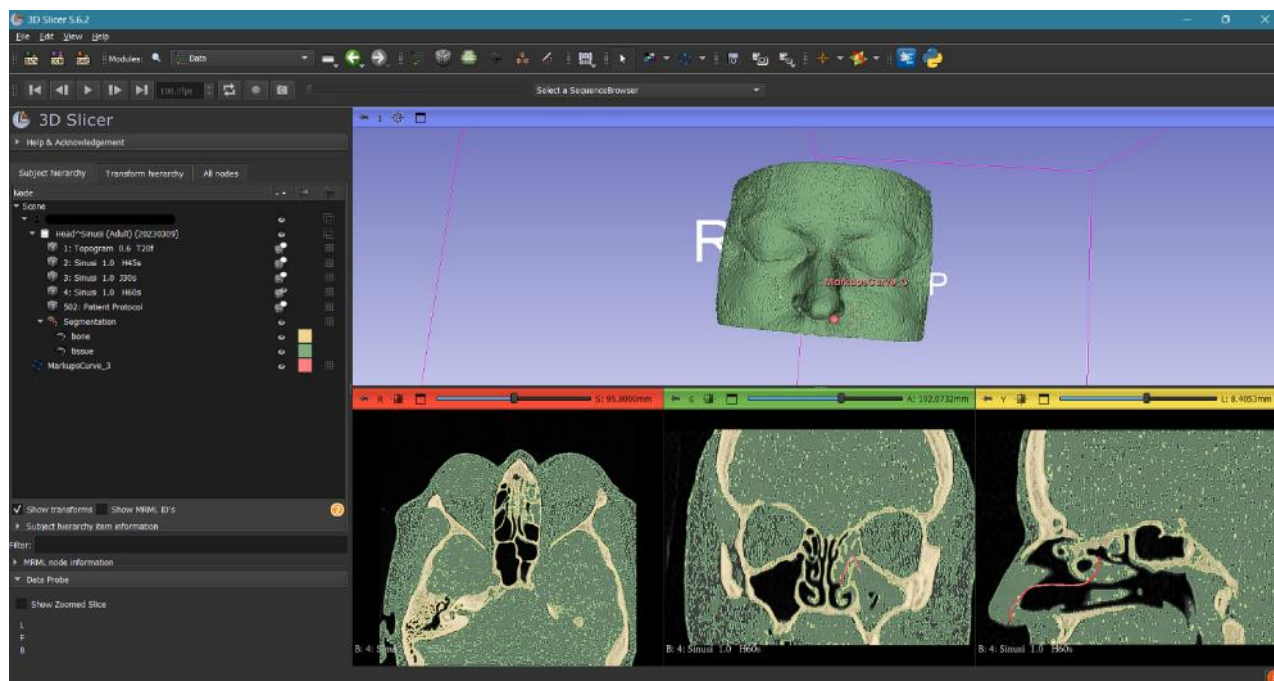


Slika 46. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 3

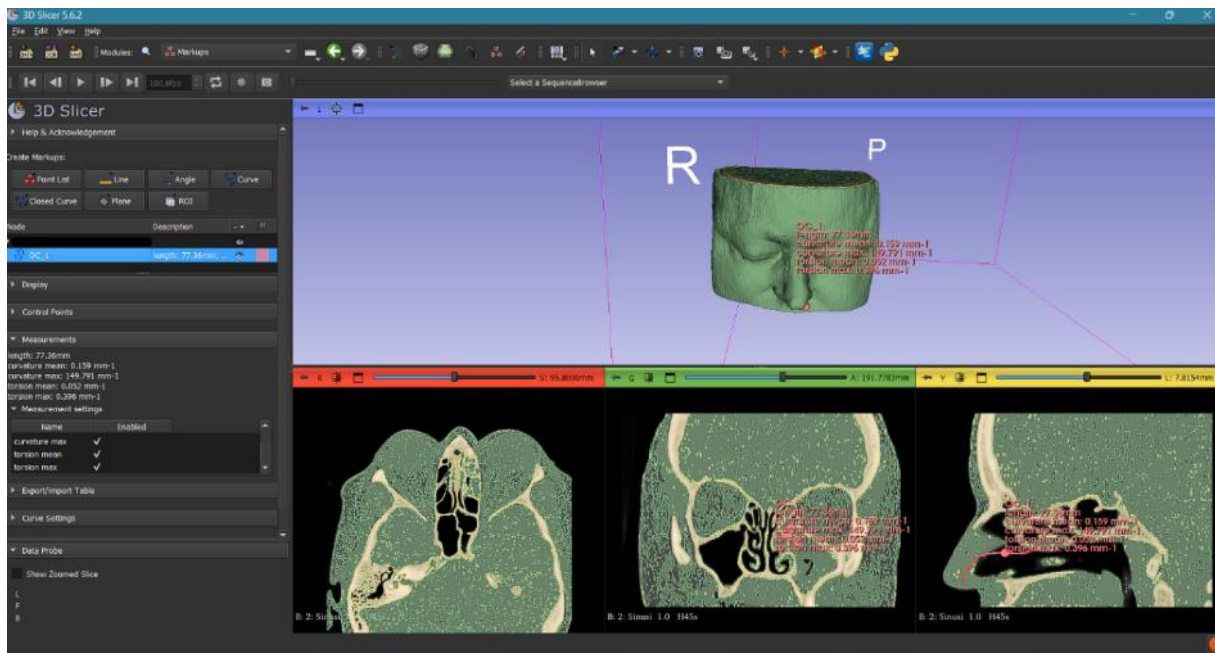
U tablici 3. su prikazane koordinate točaka krivulje bolesnika 3 u RAS koordinatnom sustavu. U nastavku Slika 48. i Slika 49., prikazana je krivulja te mjere krivulje.

**Tablica 3. Karakteristične točke za bolesnika 3**

T1-1	-157.783	233.483	544.466	1	1	1
T1-2	-104.697	234.512	595.943	1	1	1
T1-3	-101.748	230.737	654.284	1	1	1
T1-4	-958.496	225.59	712.625	1	1	1
T1-5	-899.512	219.756	726.352	1	1	1
T1-6	-791.116	212.128	729.264	1	1	1
T1-7	-997.494	197.677	739.583	1	1	1
T1-8	-137.585	191.778	832.453	1	1	1
T1-9	-165.103	191.778	85.997	1	1	1

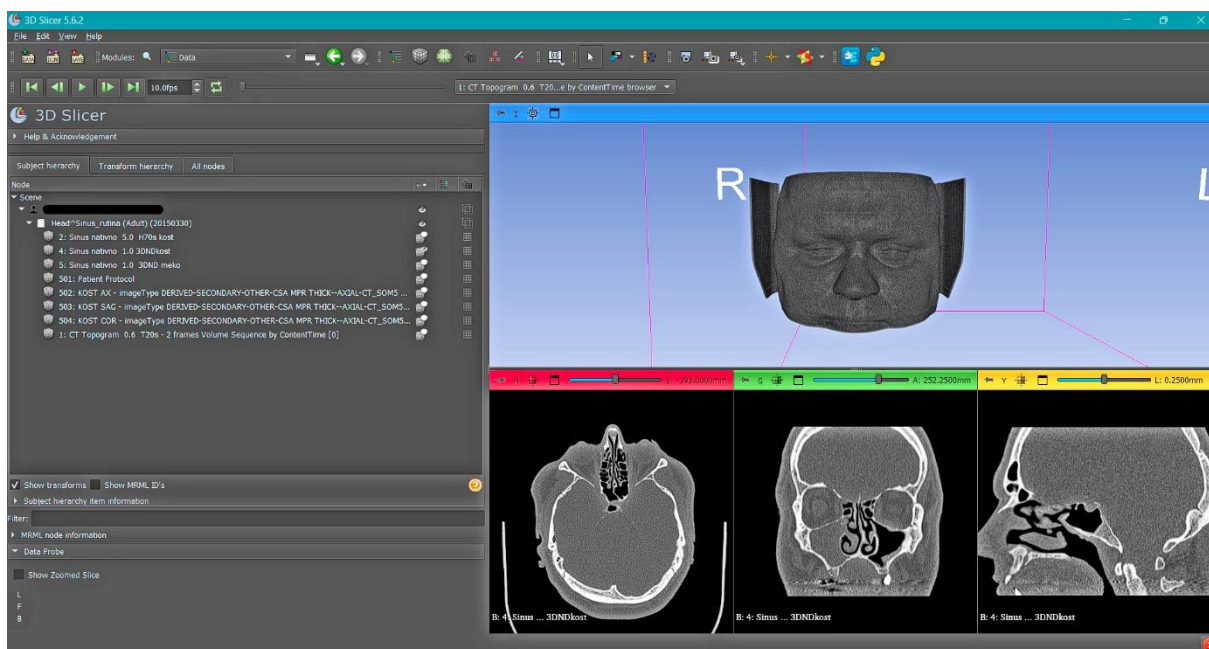


**Slika 47. Krivulja za bolesnika 3.**



Slika 48. Krivulja s mjerama za bolesnika 3

Kod bolesnika 4 pri učitavanju CT-a (Slika 50.) odmah se može primijetiti deformacija nosne pregrade u lijevu stranu (Slika 51.).



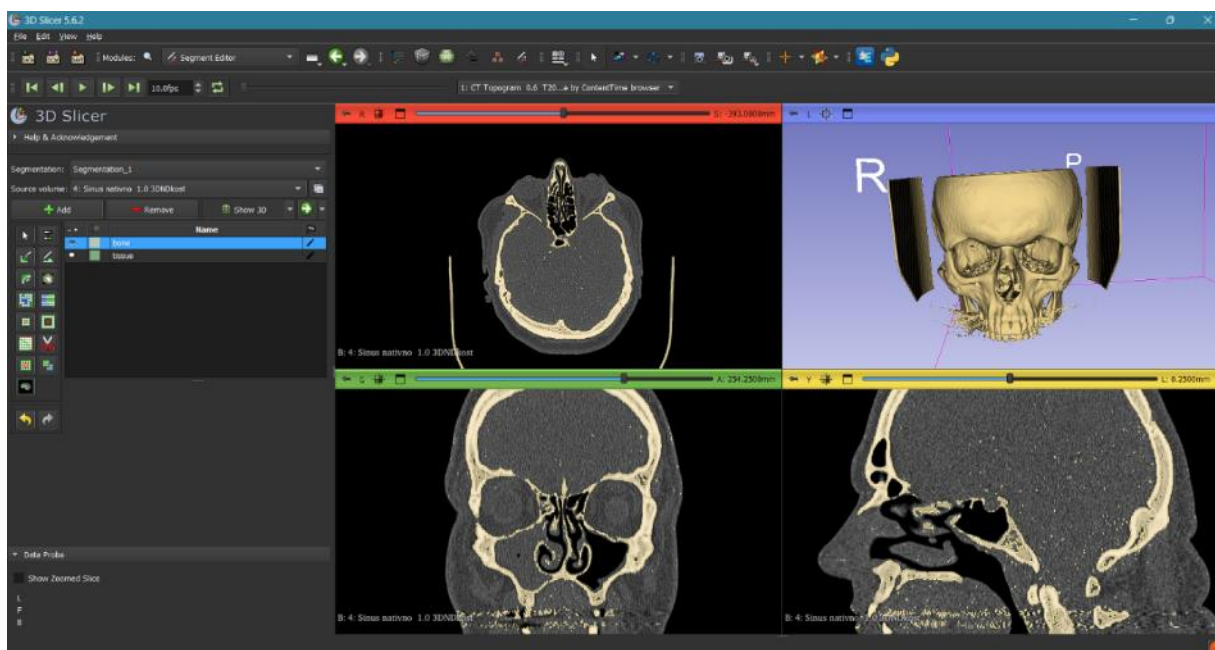
Slika 49. CT i 3D prikaz za bolesnika 4



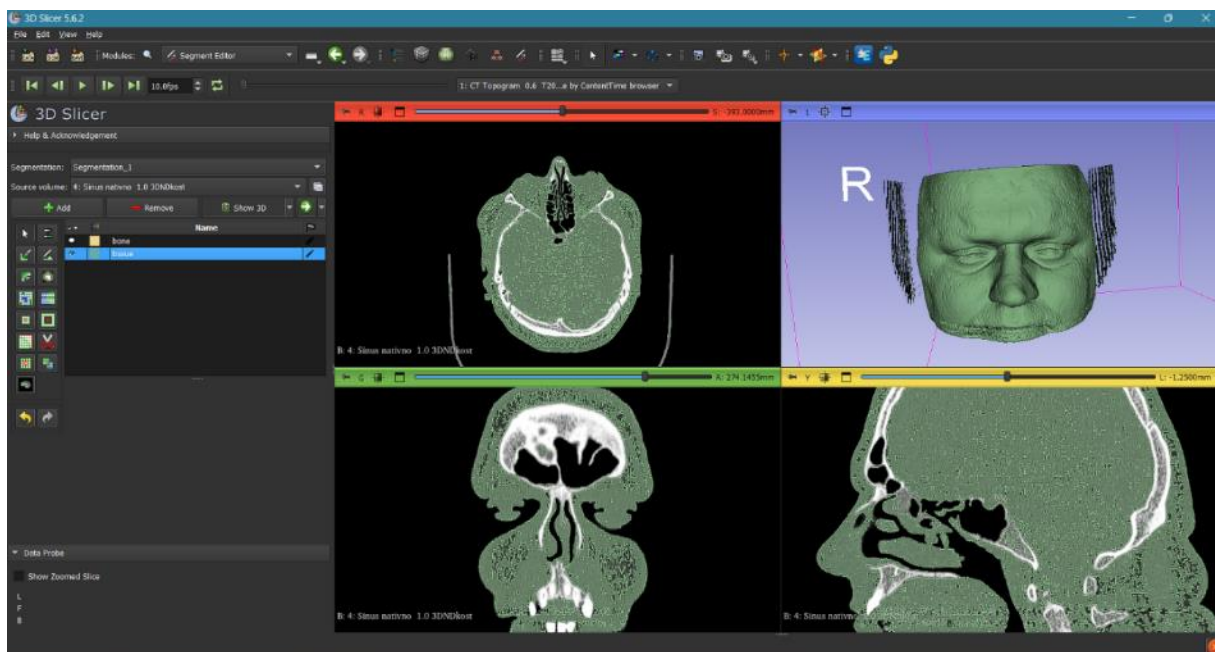


**Slika 50. Prikaz devijacije nosa bolesnika 4**

Isto kao i bolesniku 1, bolesniku 4 je lijevi maksilarni sinus zasjenjen. Nakon segmentacije kosti (Slika 52.) i mekog tkiva (Slika 53.) nacrtana je krivulja po točkama iz tablice 4. pomoću Python skripte.



**Slika 51. Segmentacija kosti bolesnika 4**

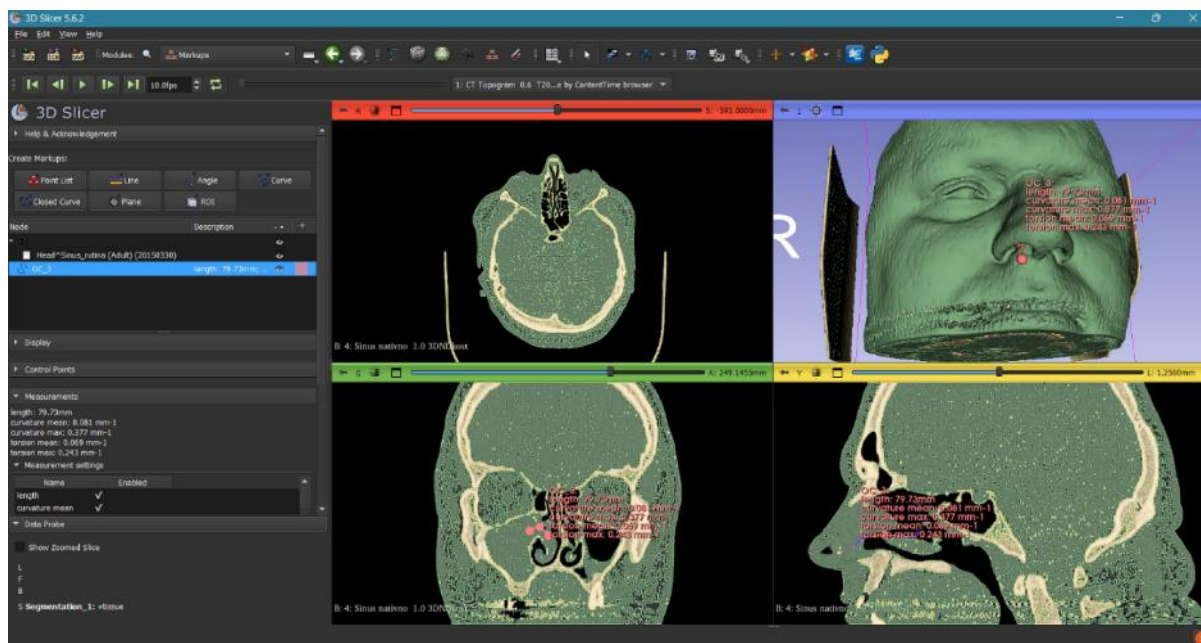


Slika 52. Segmentacija mekog tkiva bolesnika 4

Iz tablice 4. se može vidjeti da su točke već u RAS koordinatnom sustavu pa nema potrebe za transformacijom. Izgled krivulje s mjerama su prikazane na slici 54.

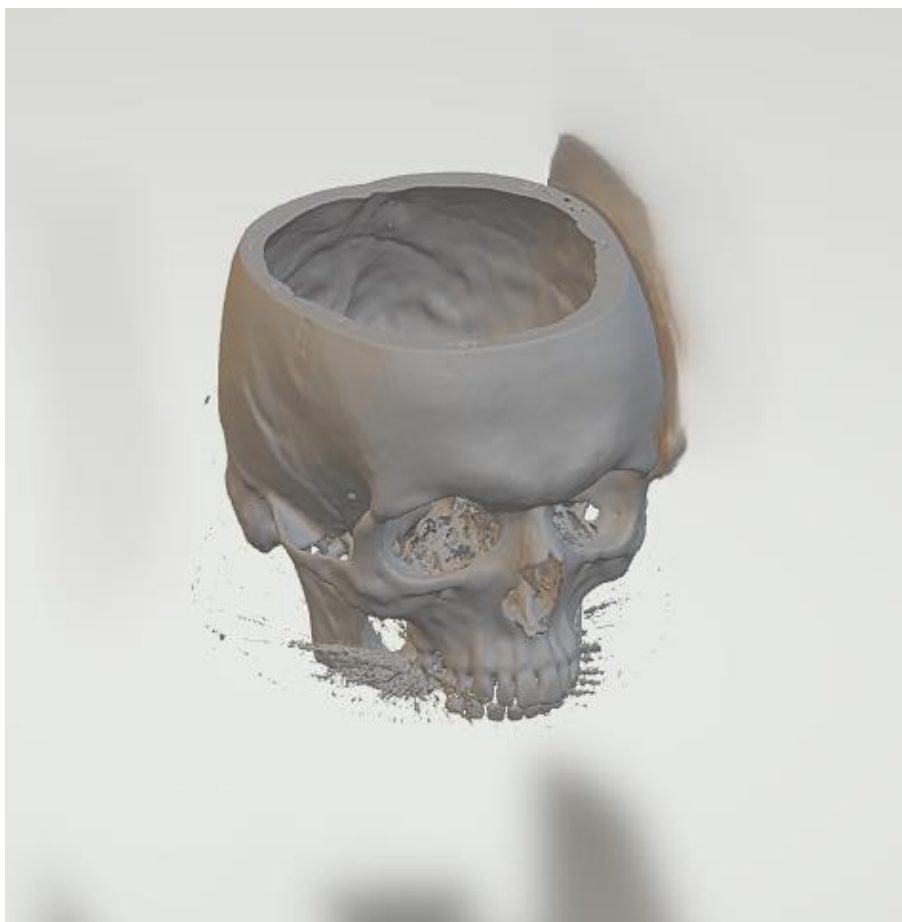
Tablica 4. Karakteristične točke za bolesnika 4

label	r	a	s	defined	selected	visible
T1-1	9.75	299.47	-434.99	1	1	1
T1-2	9.25	296.81	-425.87	1	1	1
T1-3	7.25	287.69	-419.79	1	1	1
T1-4	1.75	281.99	-414.85	1	1	1
T1-5	-1.25	267.55	-412.19	1	1	1
T1-6	2.28	249.145	-412.57	1	1	1
T1-7	7.6	249.145	-407.25	1	1	1
T1-8	13.68	249.145	-409.53	1	1	1



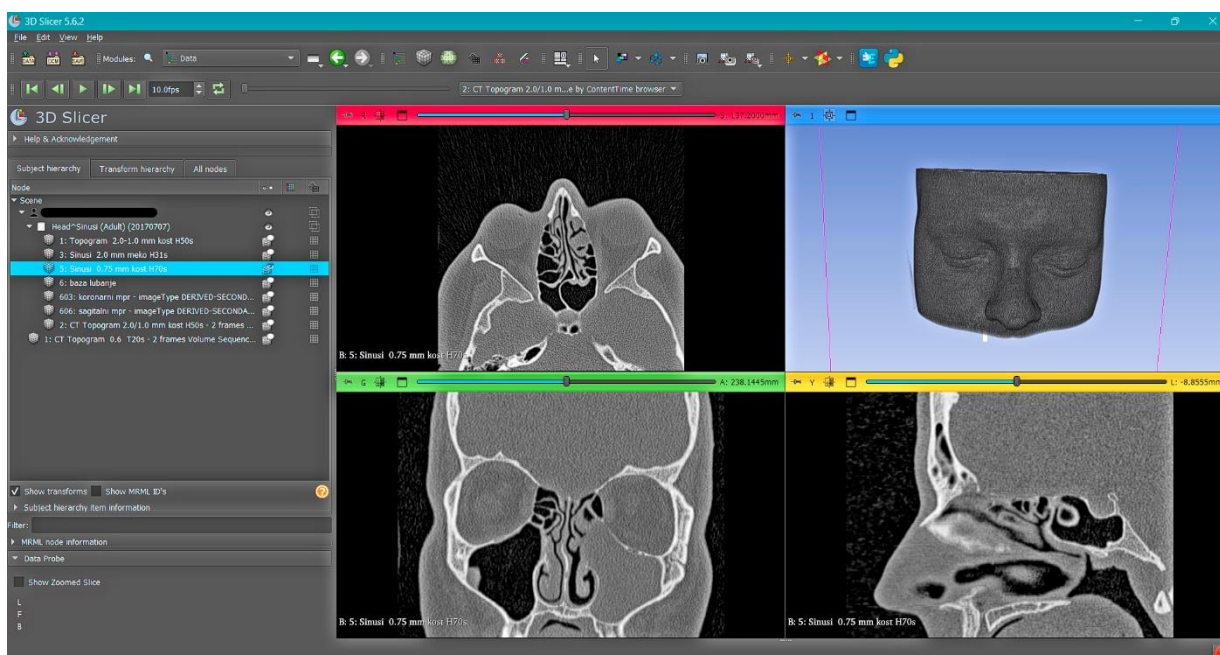
Slika 53. Prikaz krivulje i njene vrijednosti

Za bolesnika 4 nakon izvoza u SOLIDWORKS i naredbe *decimate mesh body* dobije se model koji je relativno malen s obzirom na druge prijašnje bolesnike (250 MB) ali je došlo do pogrešaka u procesu pa je tako nastao donekle deformiran model (Slika 55.).



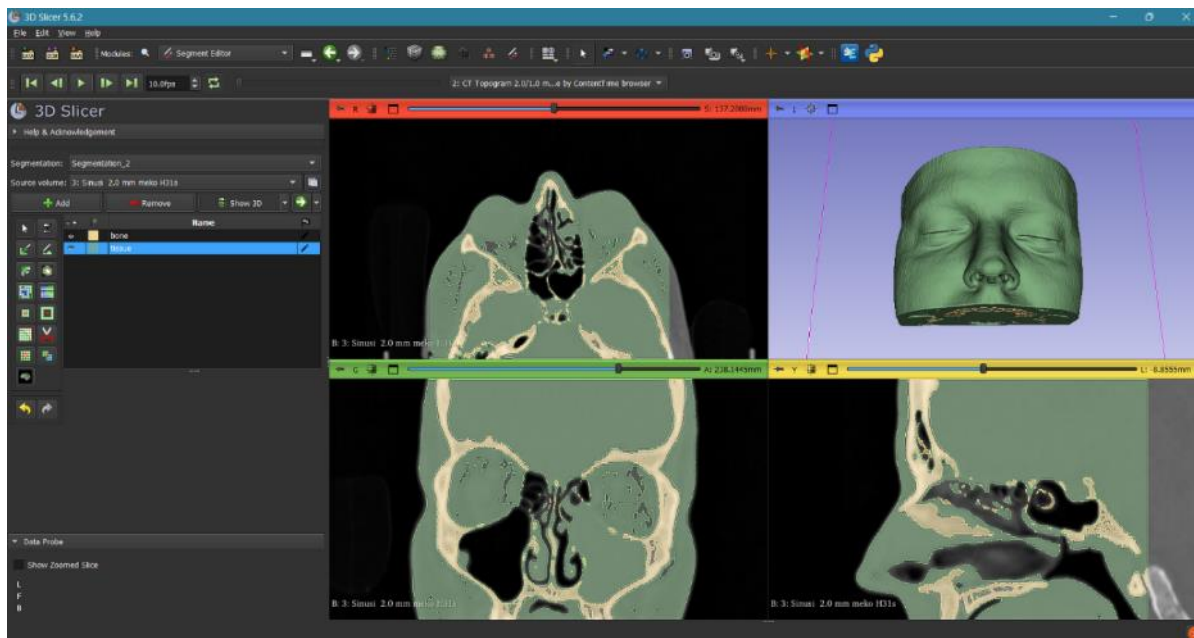
Slika 54. 3D model bolesnika 4

Nadalje, za bolesnika 5, vidi se (Slika 56.) da je desni maksilarni sinus zasjenjen.



Slika 55. CT i 3D prikaz bolesnika 5

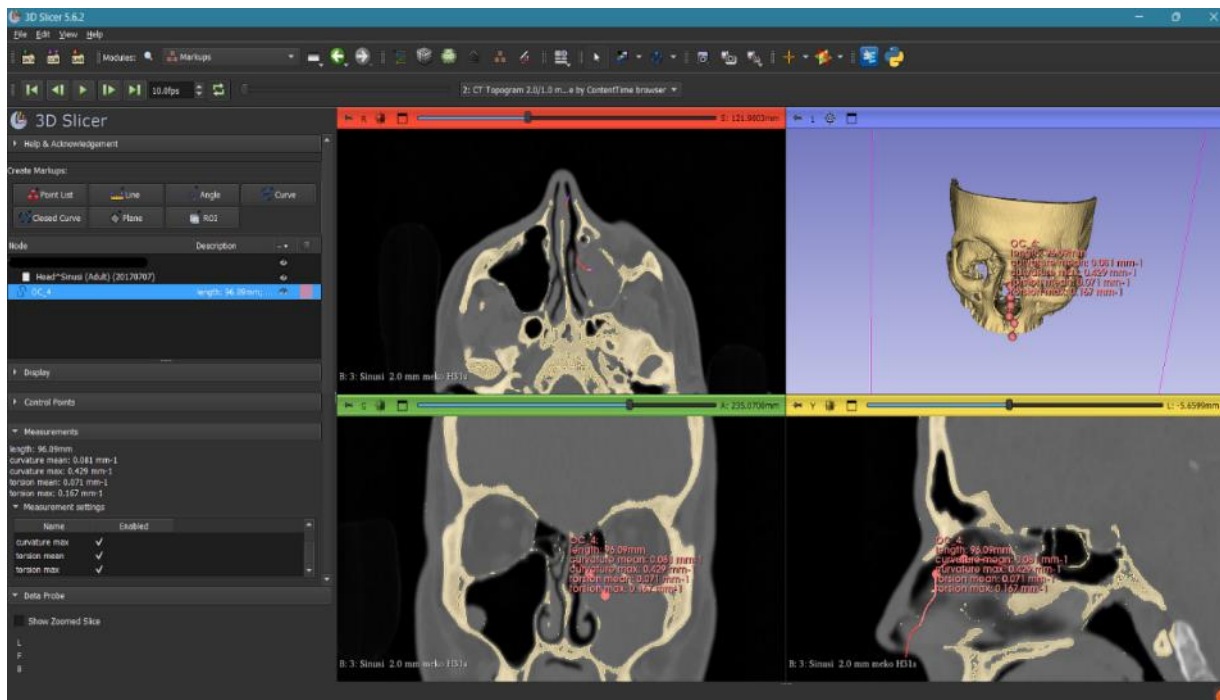
Segmentacijom dobiva se jasan prikaz 3D modela i CT-a (Slika 57.). U tablici 5. vide se koordinate karakterističnih točaka u RAS koordinatnom sustavu za bolesnika 5 te na slici 58. krivulja s vlastitim vrijednostima.



Slika 56. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 5

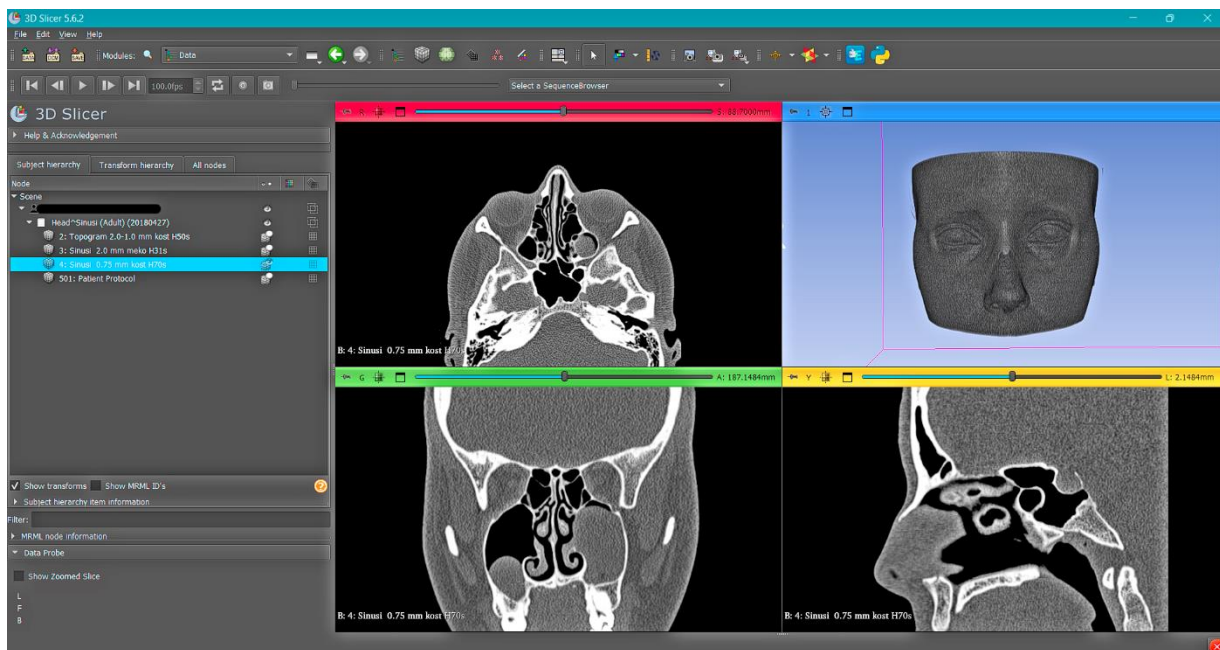
Tablica 5. Karakteristične točke bolesnika 5

label	r	a	s	defined	selected	visible
T1-1	0.39621	285.351	912.968	1	1	1
T1-2	-0.082305	283.034	101.433	1	1	1
T1-3	457.726	279.055	105.09	1	1	1
T1-4	422.433	275.794	112.728	1	1	1
T1-5	518.137	272.029	118.231	1	1	1
T1-6	565.988	271.45	126.629	1	1	1
T1-7	565.988	258.997	133.001	1	1	1
T1-8	-374.286	235.07	127.208	1	1	1
T1-9	-109.831	235.07	117.651	1	1	1



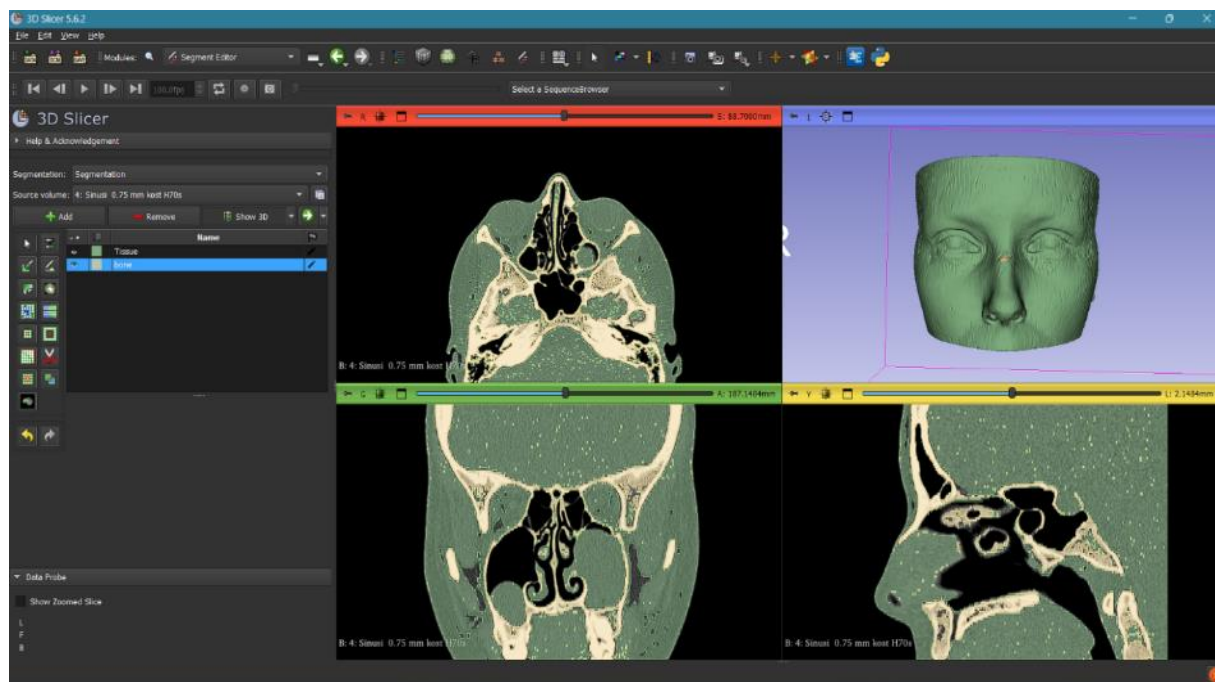
Slika 57. Prikaz krivulje i njenih vrijednost bolesnika 5

Zadnji primjer je bolesnik 6, može se vidjeti da bolesnik 6 također ima manju deformaciju nosne pregrade i zasjenjen desni maksilarni sinus (Slika 59.).



Slika 58. CT i 3D model bolesnika 6

Na slici 60. je prikazana segmentacija modela bolesnika 6, a na tablici 6 su prikazane karakteristične točke bolesnika 6 u RAS koordinatnom sustavu.

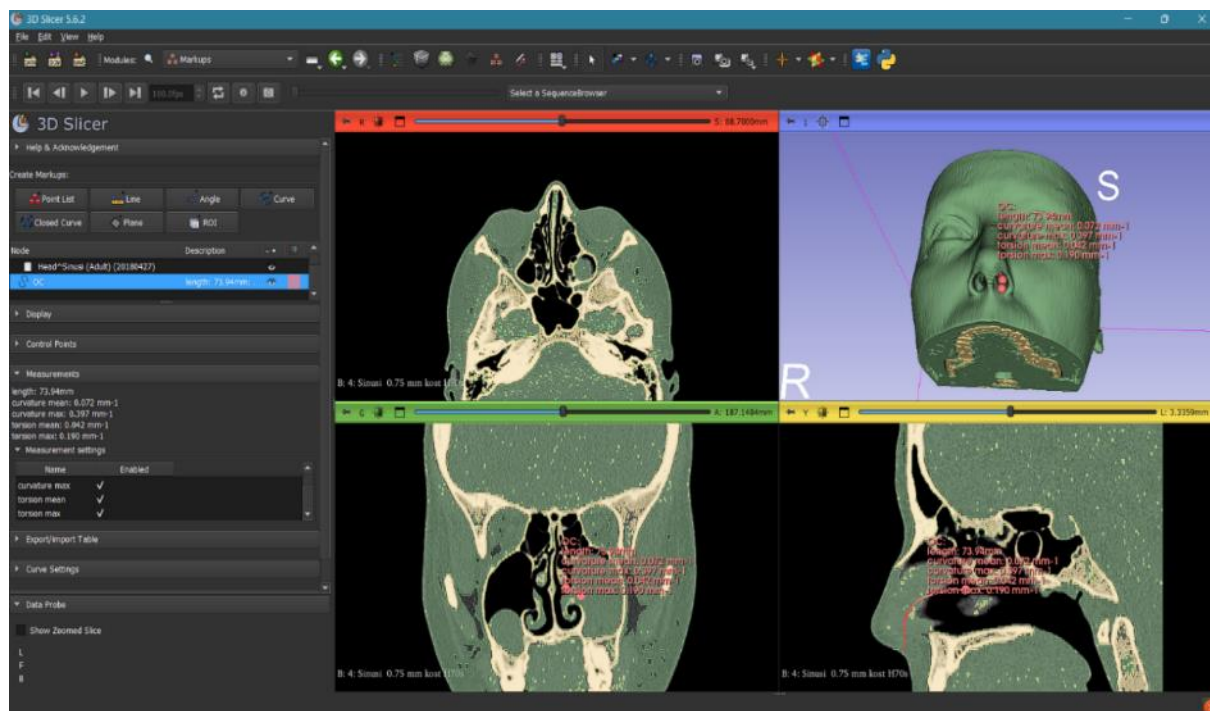


Slika 59. Segmentacija kosti i mekog tkiva bolesnika 6

Tablica 6. Karakteristične točke bolesnika 6

label	r	a	s	defined	selected	visible
T1-1	-957.031	232.949	481.045	1	1	1
T1-2	-957.031	232.056	537.552	1	1	1
T1-3	-630.469	232.354	614.877	1	1	1
T1-4	-482.031	227.595	689.227	1	1	1
T1-5	-422.656	221.647	721.942	1	1	1
T1-6	-363.281	214.51	739.786	1	1	1
T1-7	-363.281	209.156	751.682	1	1	1
T1-8	-333.594	203.506	748.708	1	1	1
T1-9	-616.364	187.148	754.656	1	1	1

Krivulja s njenim vrijednostima prikazana je na slici 61.



**Slika 60. Prikaz s krivulje i njenih vrijednosti bolesnika 6**

Nakon obrade svih bolesnika, u tablici 7. su prikazane sve vrijednosti za njihove krivulje.

**Tablica 7. Vrijednosti veličina krivulja po bolesnicima**

Bolesnik	Dužina krivulje [mm]	Medijan zakrivljenosti [ $\text{mm}^{-1}$ ]	Maksimalna zakrivljenost [ $\text{mm}^{-1}$ ]	Medijan nagiba [ $\text{mm}^{-1}$ ]	Maksimalan nagib [ $\text{mm}^{-1}$ ]
1	80,02	0,09	0,404	0,083	0,261
2	101,5	0,162	188,59	0,075	0,416
3	77,36	0,159	149,791	0,052	0,396
4	79,73	0,081	0,377	0,069	0,243
5	96,09	0,081	0,429	0,071	0,167
6	73,94	0,072	0,397	0,042	0,19
SREDNJA VRIJEDNOST	84,77333333	0,1075	56,66466667	0,065333333	0,278833333

Tako se može vidjeti da je za bolesnika 6 sa 73,94 mm krivulja najkraća, dok je za bolesnika 2 najduža s dužinom od 101,5 mm – razlika je oko 27 %. Srednja vrijednost među svim bolesnicima iznosi 84,773 mm.

Najveći medijan zakrivljenosti se odnosi na bolesnika 2 koji iznosi  $0,162 \text{ mm}^{-1}$  dok najmanji medijan zakrivljenosti ima bolesnik 6 koji iznosi  $0,072 \text{ mm}^{-1}$ , a srednja vrijednost medijana zakrivljenosti iznosi  $0,1075 \text{ mm}^{-1}$ .



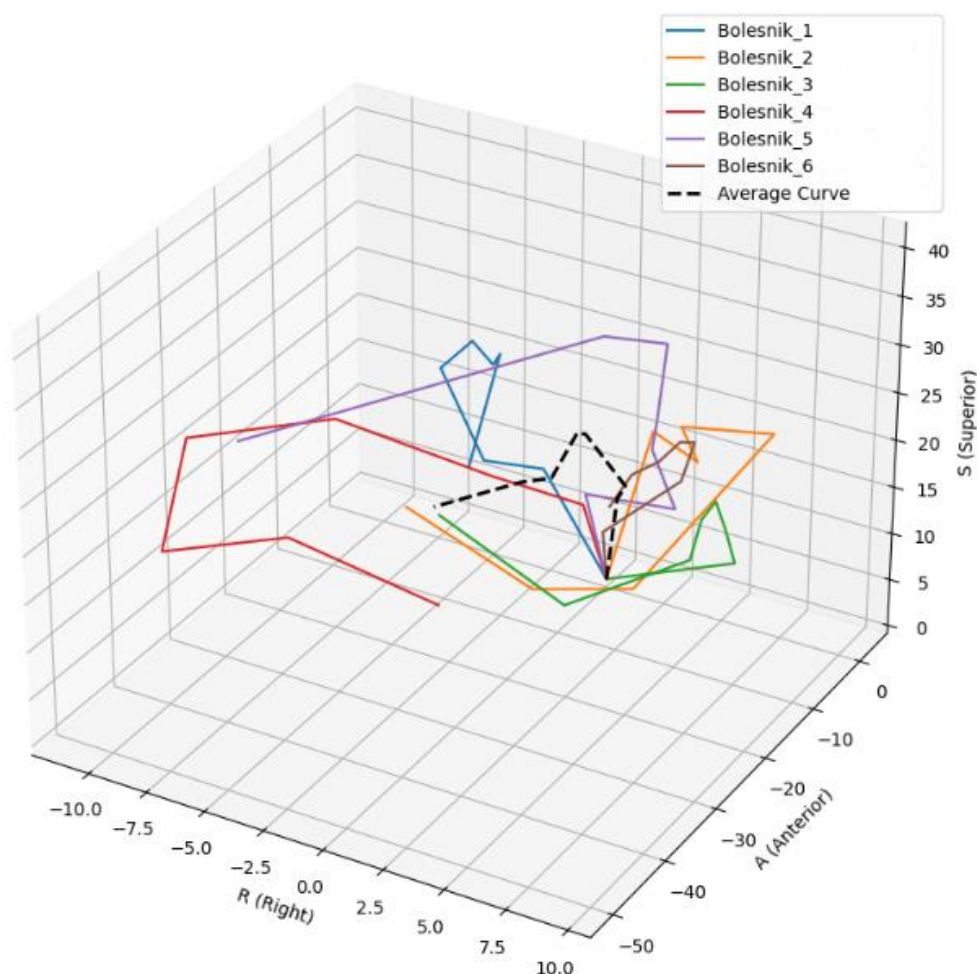
Maksimalna zakrivljenost je najveća kod bolesnika 2 i iznosi  $188,59 \text{ mm}^{-1}$  dok najmanja maksimalna zakrivljenost se pojavljuje kod bolesnika 4.

Za bolesnike 2 i 3 vrijednosti znatno odskaku od neke srednje vrijednosti drugih bolesnika, do toga može doći zbog razlike u anatomiji, iz tog razloga srednje vrijednosti sa i bez bolesnicima 2 i 3 znatno odskaku od  $0,40175 \text{ mm}^{-1}$  do  $56,665 \text{ mm}^{-1}$ .

Medijan nagiba je najveći kod bolesnika 1 s  $0,083 \text{ mm}^{-1}$  dok je najmanji kod bolesnika 6 s  $0,042 \text{ mm}^{-1}$ , a srednja vrijednost iznosi  $0,0653 \text{ mm}^{-1}$ .

Maksimalna nagib krivulje se pojavljuje kod bolesnika 2 s  $0,416 \text{ mm}^{-1}$  dok najmanji maksimalni nagib kod bolesnika 5 s  $0,167 \text{ mm}^{-1}$ , a srednja vrijednost maksimalnog nagiba iznosi  $0,27883 \text{ mm}^{-1}$ .

U softveru MATLAB, nakon što su ubačene sve točke za bolesnike, ucrtane su, u istom 3D grafu u RAS koordinatama, krivulje te je dodatno ucrtana uprosječna krivulja (Slika 62.).



Slika 61. Krivulje otvaranja maksilarnog sinusa svih bolesnika te uprosječna krivulja

## 5.2. Simulacija otvaranja maksilarnog sinusa u virtualnoj stvarnosti

U ovoj točki rada opisat će se najprije oprema za izvođenje zahvata u virtualnoj stvarnosti, a potom daljnje neophodne pripremne radnje, da bi se napokon izveli pokusi u okruženju virtualne stvarnosti.

Koristit će se virtualne naočale HTC Vive 1 (Slika 63.), koje se stavljaju na glavi te daju vizualni podražaj i upuštanje (imerziju) u virtualno okruženje.



Slika 62. Naočale HTC Vive 1 [40]

Kontroleri (Slika 64.) služe korisniku kao virtualne ruke u okruženju, pomoću njih se mogu odabirati željeni predmeti u okruženju te imaju i funkciju kao miš računala.

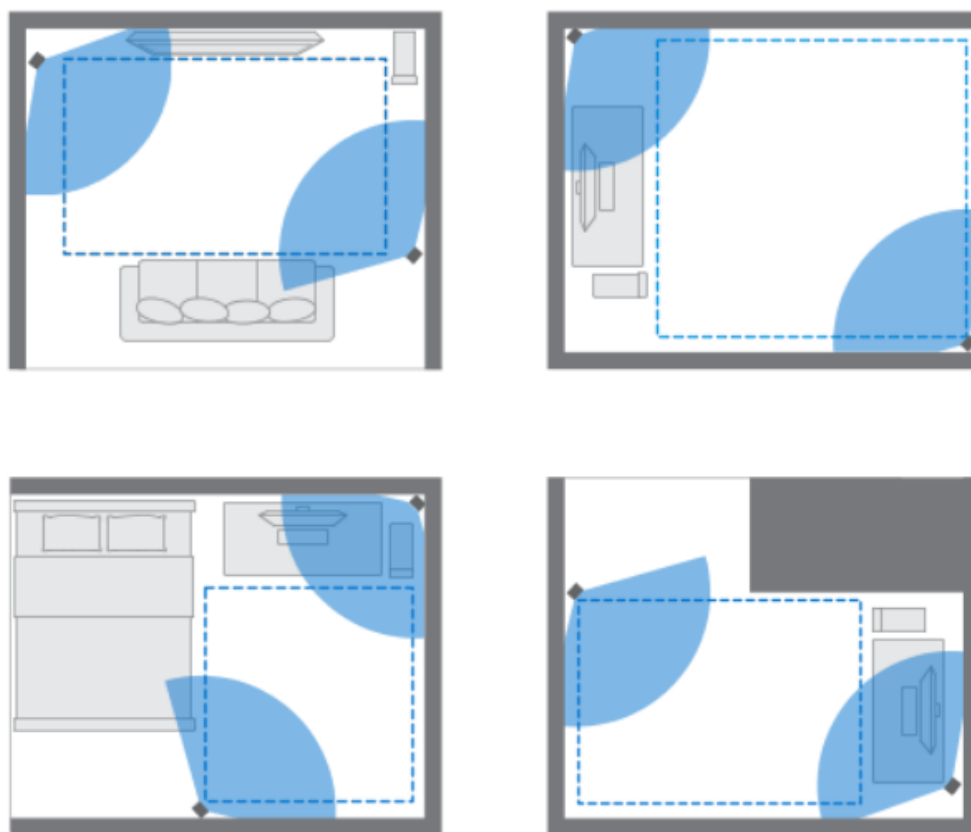


**Slika 63. Kontroler HTC Vive 1 [41]**

Naočale i kontroleri se prate pomoću senzora (Slika 65.) koji snimaju pokrete kontrolera i naočala te ih onda prebacuju u program SteamVR na računalo. Postavljaju se na slobodnim mjestima (Slika 66.), gdje je dobra vidljivost, po mogućnosti na suprotnim krajevima sobe da bi mogli što bolje pratiti pokrete i dati realne kretnje u virtualnom okružju.



**Slika 64. Senzor HTC Vive 1 [41]**



Slika 65. Postavljanje senzora u prostoriji [42]

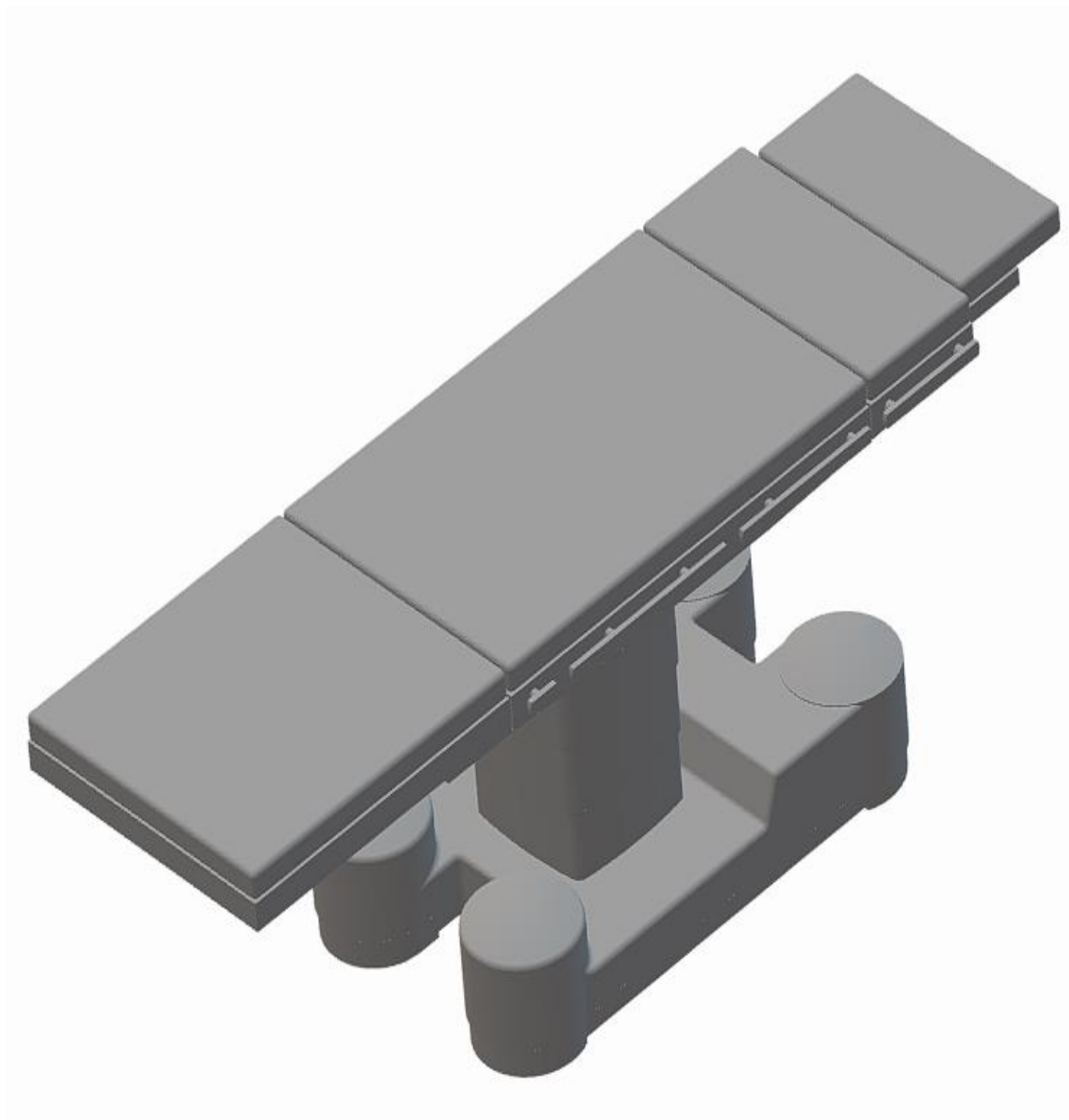
Sa softverske strane korišten je softver Steam VR i VR *model viewer*. Osim generičkog modela lubanje, također su sa stranica Sketchfab i Grabcad preuzeti i drugi 3D modeli radi simuliranja okružja u operacijskoj sali. Prvo se u aplikaciji VR model viewer može odabrati kakvo će okružje biti (Slika 67.): odabrano je jednostavno okružje s crnom podlogom, “*Blank black calibration floor*“.



**Slika 66. Odabir okruŕja u virtualnoj stvarnosti**

Nakon odabira okruŕja, ubačeni su 3D modeli u prostor: operacijski stol (Slika 68.), instrument koji je obojen radi jasnijeg prikaza u VR-u (Slika 69.), model medicinskog tehničara (Slika 70.), model zaslona za navigaciju kroz endoskopiju (Slika 71.), set medicinskih stolova za odlaganje alata (Slika 72.), te gore spomenuti generični model lubanje (Slika 73.).

Korisnik VR naočala bit će u ulozi kirurga. Pokreti kirurga bit će reprezentirani gibanjem vrha instrumenta (TCP). Valja naglasiti da je instrument pojednostavnjen, te da u simulaciju nije uključen endoskop.



**Slika 67. Model operacijskog stola [43]**

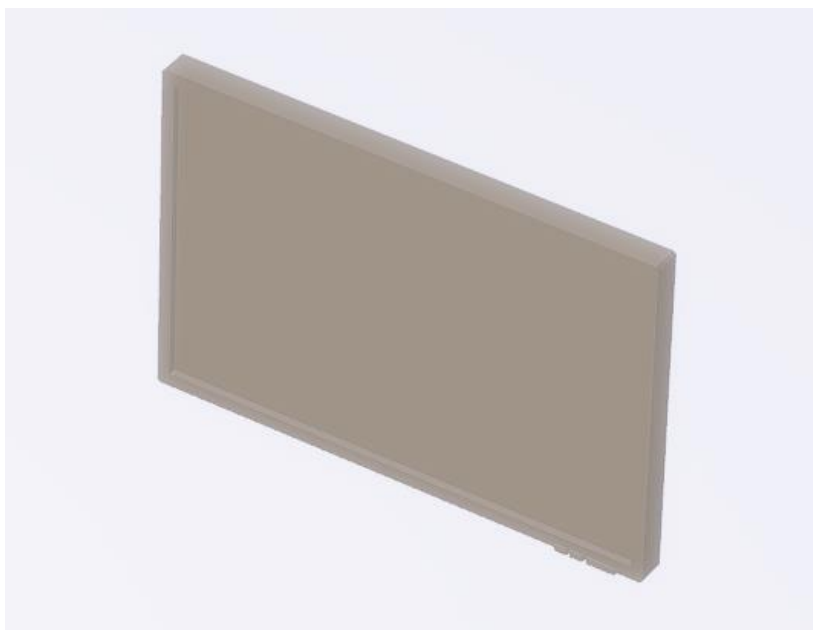


**Slika 68. Model instrumenta [44]**



**Slika 69. Model medicinskog tehničara [45]**





**Slika 70. Model zaslona za navigaciju endoskopa [46]**



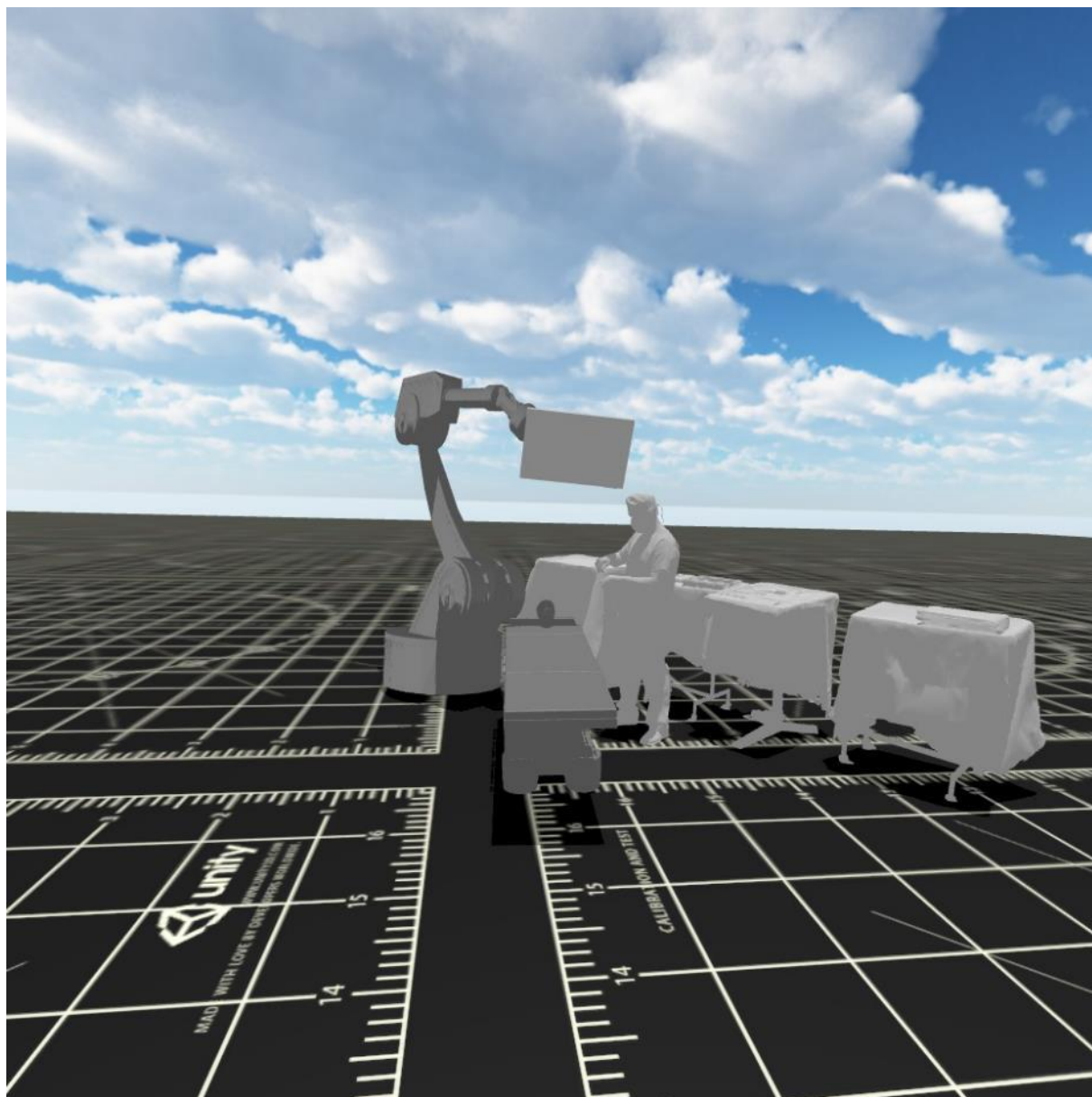
**Slika 71. Model seta stolova za odlaganje alata [47]**



**Slika 72. Opći model lubanje [48]**

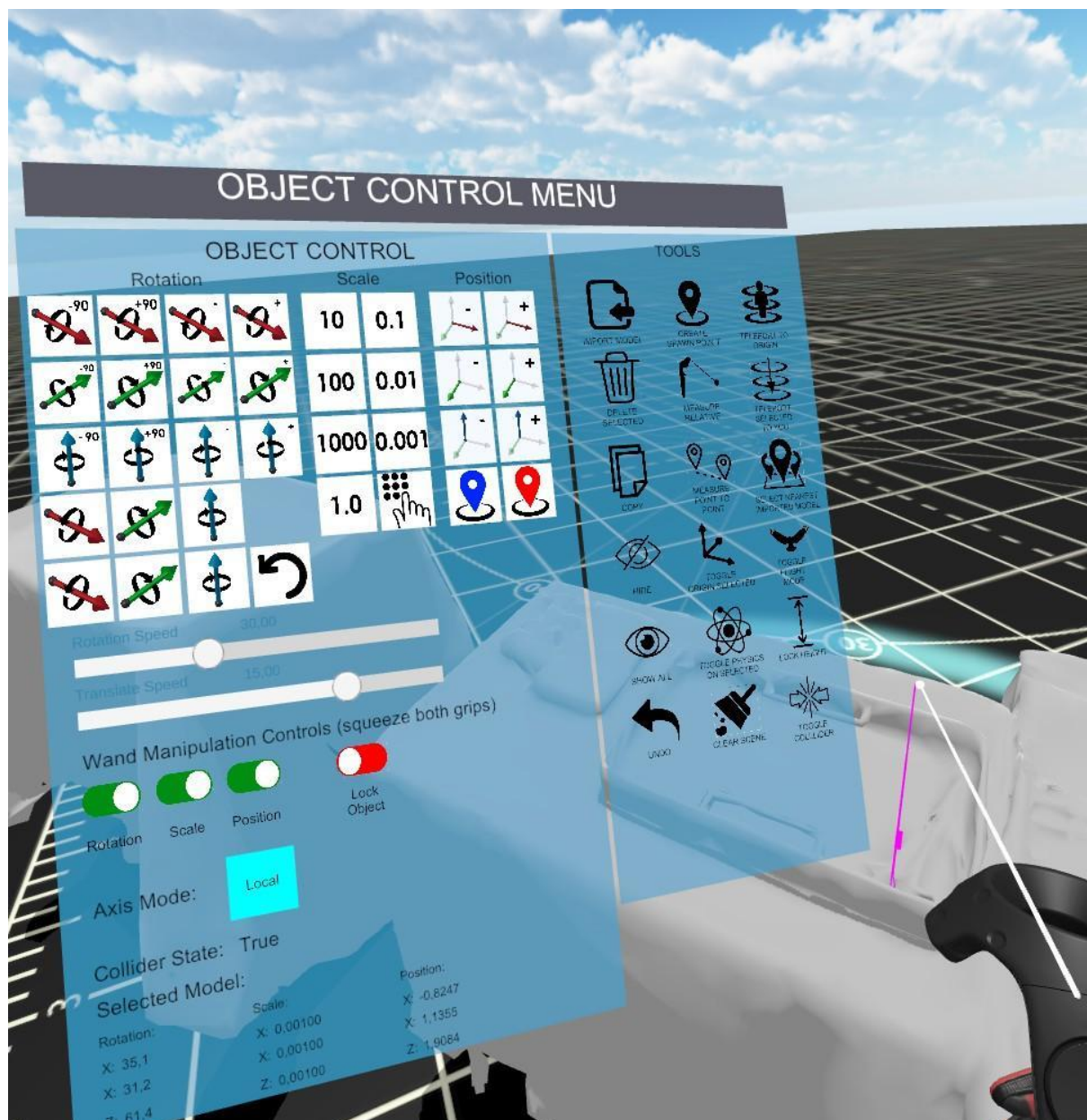
Već postojeće trajektorije iz softvera Slicer nije moguće izravno prebaciti u virtualan prostor. Stoga je upravo u virtualnom prostoru simuliran pojednostavnjen postupak otvaranja maksilarnog sinusa. Na kraju dobivena trajektorija u virtualnom okružju uspoređena je s dobivenom trajektorijom u softveru Slicer.

Postavom scene (Slika 74.), bolesnik je prikazan svojom lubanjom na operacijskom stolu, endoskop je u početnom položaju odložen na stolu kod na medicinskog tehničara. Slika 75. prikazuje početan položaj instrumenta za otvaranja maksilarnog sinusa



**Slika 73. Virtualna scena zahvata iz vizure kirurga koji prilazi operacijskom stolu, desno medicinski tehničar**

Kirurg uobičajeno obavlja zahvat bivajući s pacijentove desne strane. Na slikama 75. do 81. zahvat se pak obavlja s lijeve strane pacijenta. Važno je napomenuti da ta razlika u položaju kirurga nema utjecaja na virtualiziranu trajektoriju otvaranja maksilarnog sinusa.



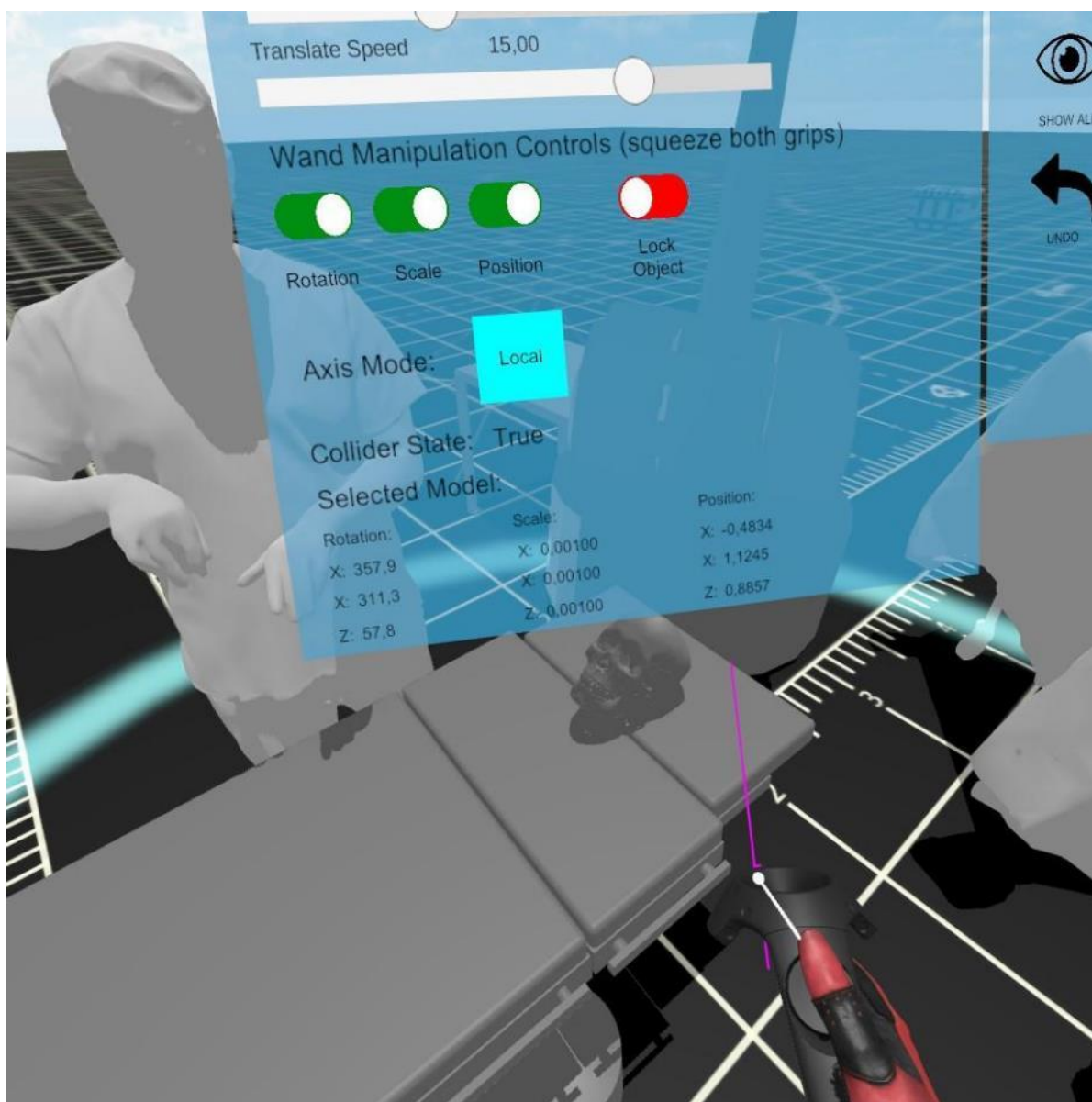
Slika 74. Početan položaj endoskopa – položaj 1

Na slici 75. su vidljive koordinate vrha instrumenta kao i rotacije po osima  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Vrijednosti su jasnije prikazane u tablici 8.

Tablica 8. Podaci o poziciji i orijentaciji vrha instrumenta (TCP) u početnom položaju

Koordinatna os	Koordinata [mm]	Rotacija [°]
$x$	-0,8247	35,1
$y$	1,135	31,2
$z$	1,9084	61,4

Nakon što kirurg uzme endoskop iz početnog položaja, okreće se prema operacijskom stolu: mijenjaju se pozicija i orijentacija instrumenta – Slika 76. i Tablica 9.

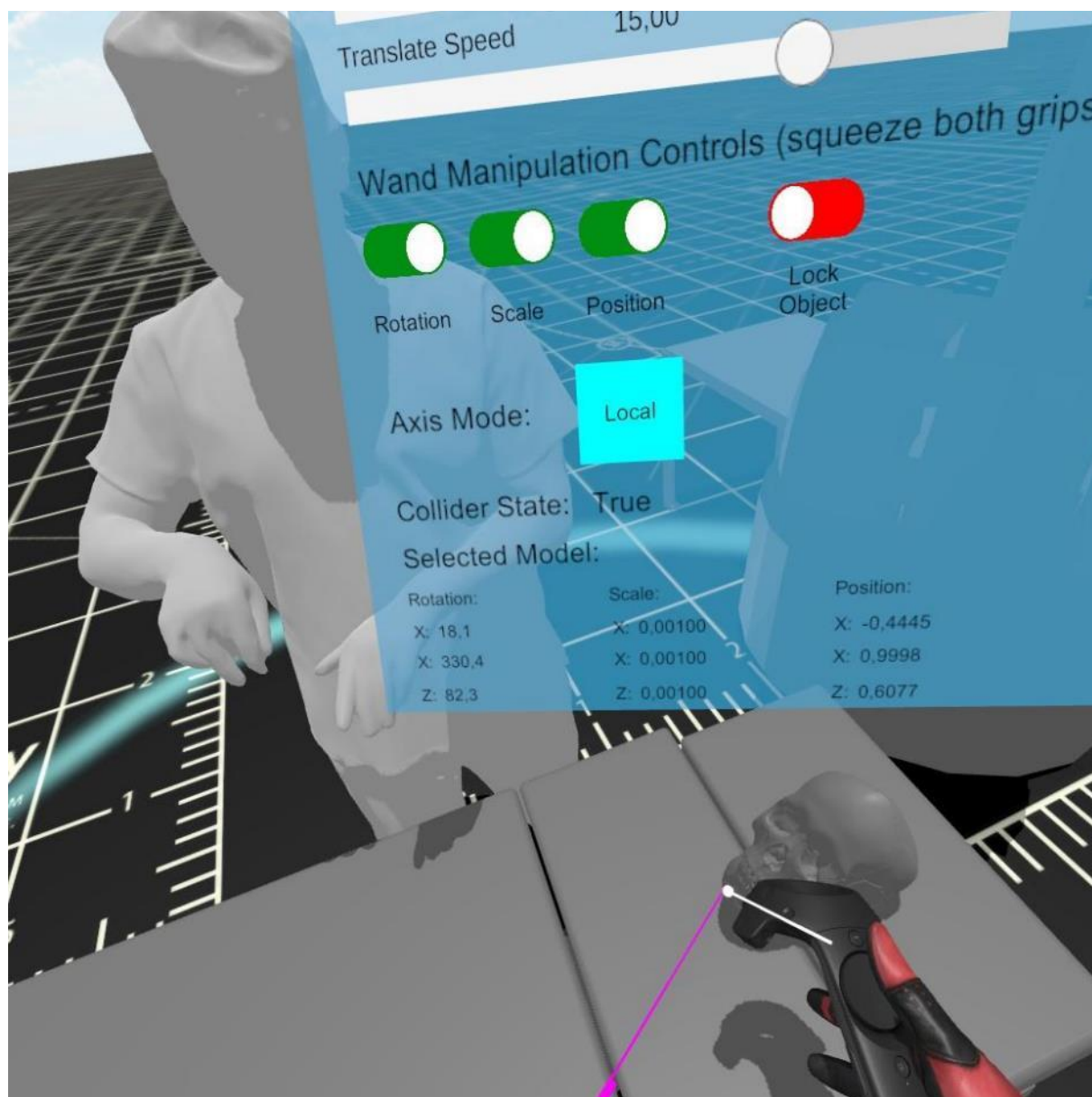


**Slika 75. Instrument u ruci kirurga – položaj 2**

**Tablica 9. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 2**

Koordinatna os	Koordinata [mm]	Rotacija [°]
$x$	-0,4834	357,9
$y$	1,1245	311,3
$z$	0,8857	57,8

Kirurg pomiče endoskop u blizini lubanje: Slika 77. i Tablica 10.

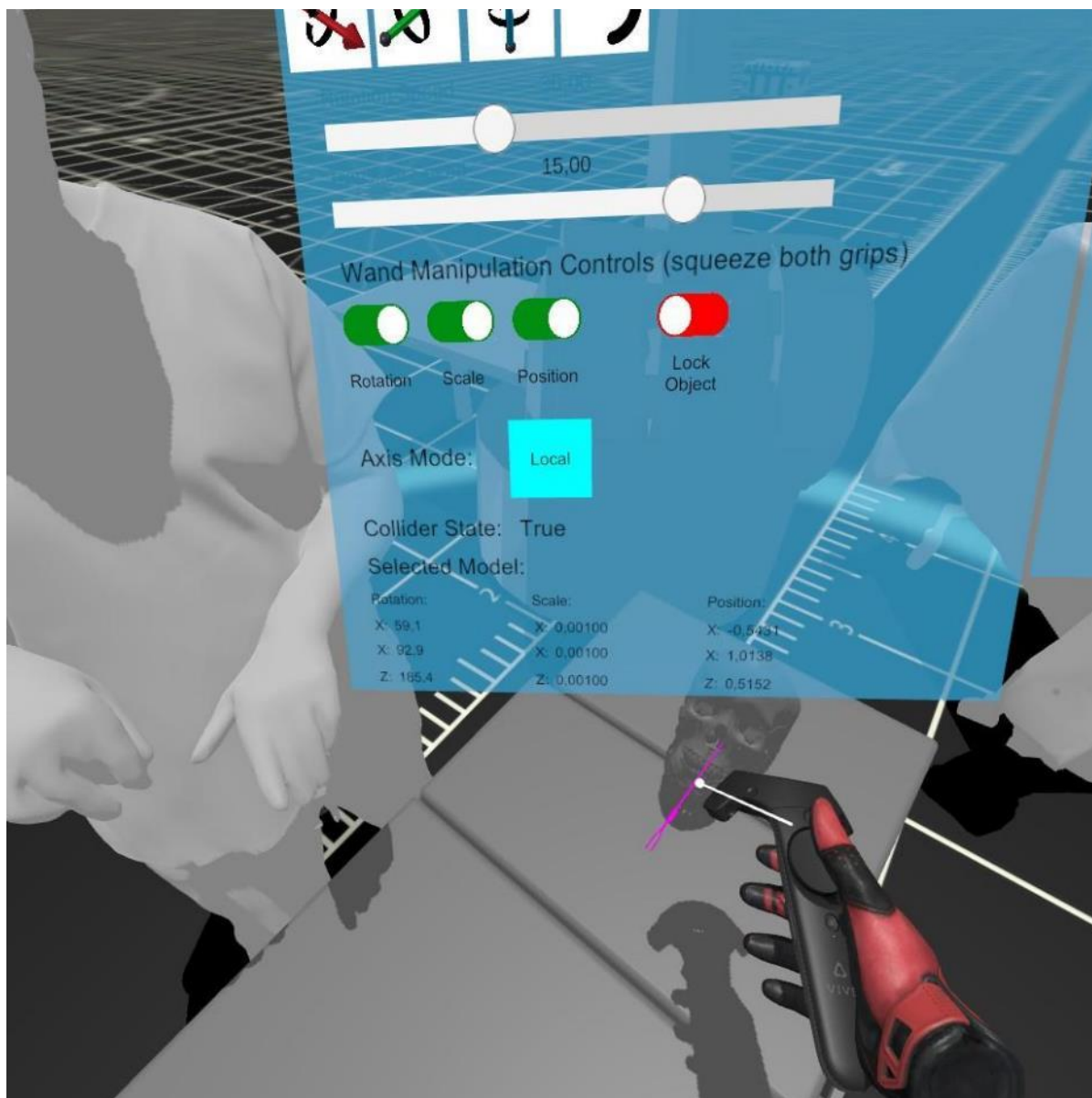


Slika 76. Instrument u blizini lubanje – položaj 3

Tablica 10. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 3

Koordinatna os	Koordinata [mm]	Rotacija [°]
$x$	-0,4445	18,1
$y$	0,9998	330,4
$z$	0,6077	82,3

Kirurg počinje sami zahvat, instrument ulazi u nosnu šupljinu: Slika 78. i Tablica 11.

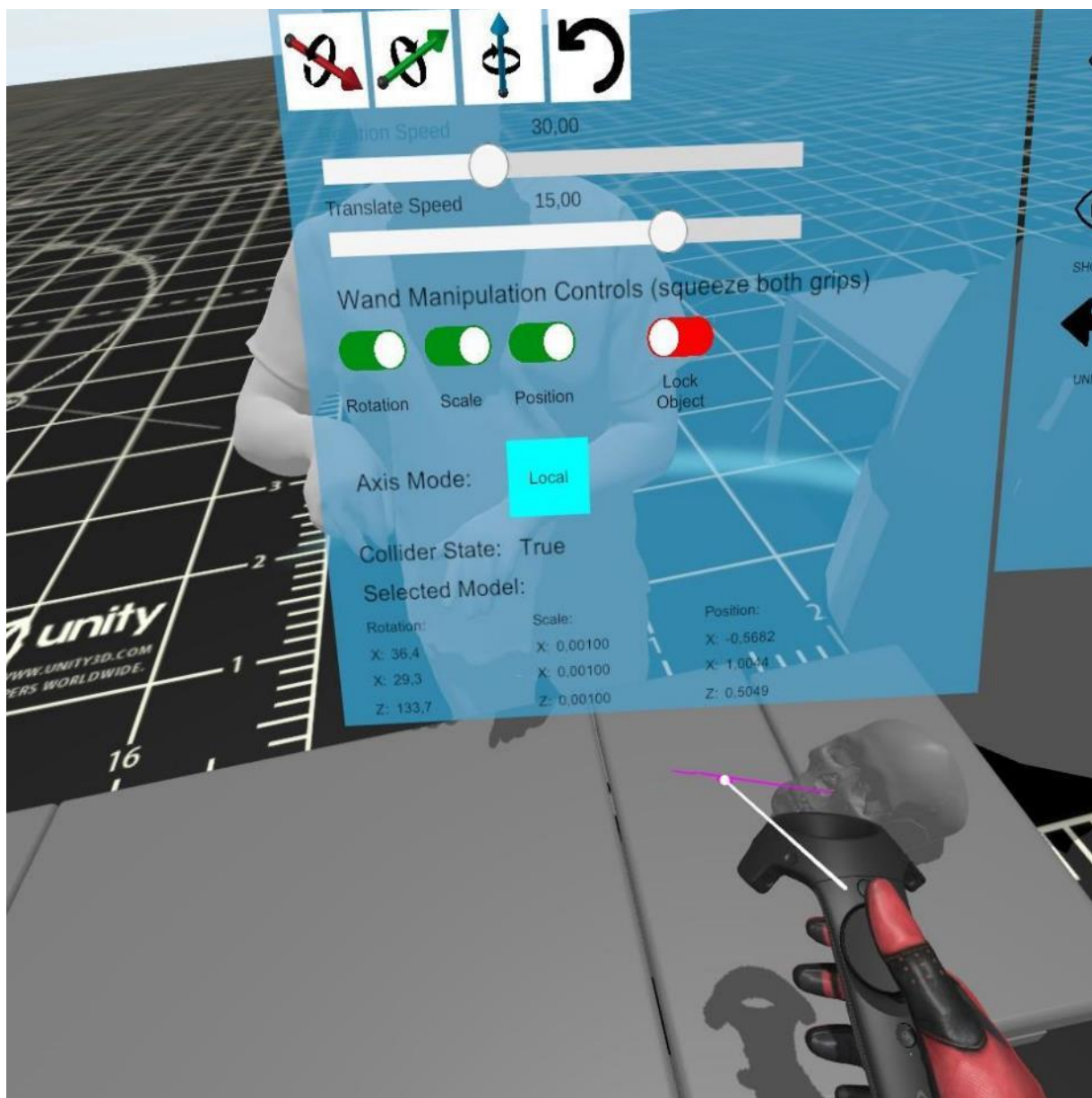


Slika 77. Instrument pri ulazu u nosnu šupljinu – položaj 4

Tablica 11. Podaci o poziciji i orijentaciji instrumenta u položaju 4

Koordinatna os	Koordinata [mm]	Rotacija [°]
$x$	-0,5431	59,1
$y$	1,0138	92,9
$z$	0,5152	185,4

Kirurg instrumentom dolazi do prednje fontanele, mjesta otvaranja maksilarnog sinusa – Slika 79. i Tablica 12.



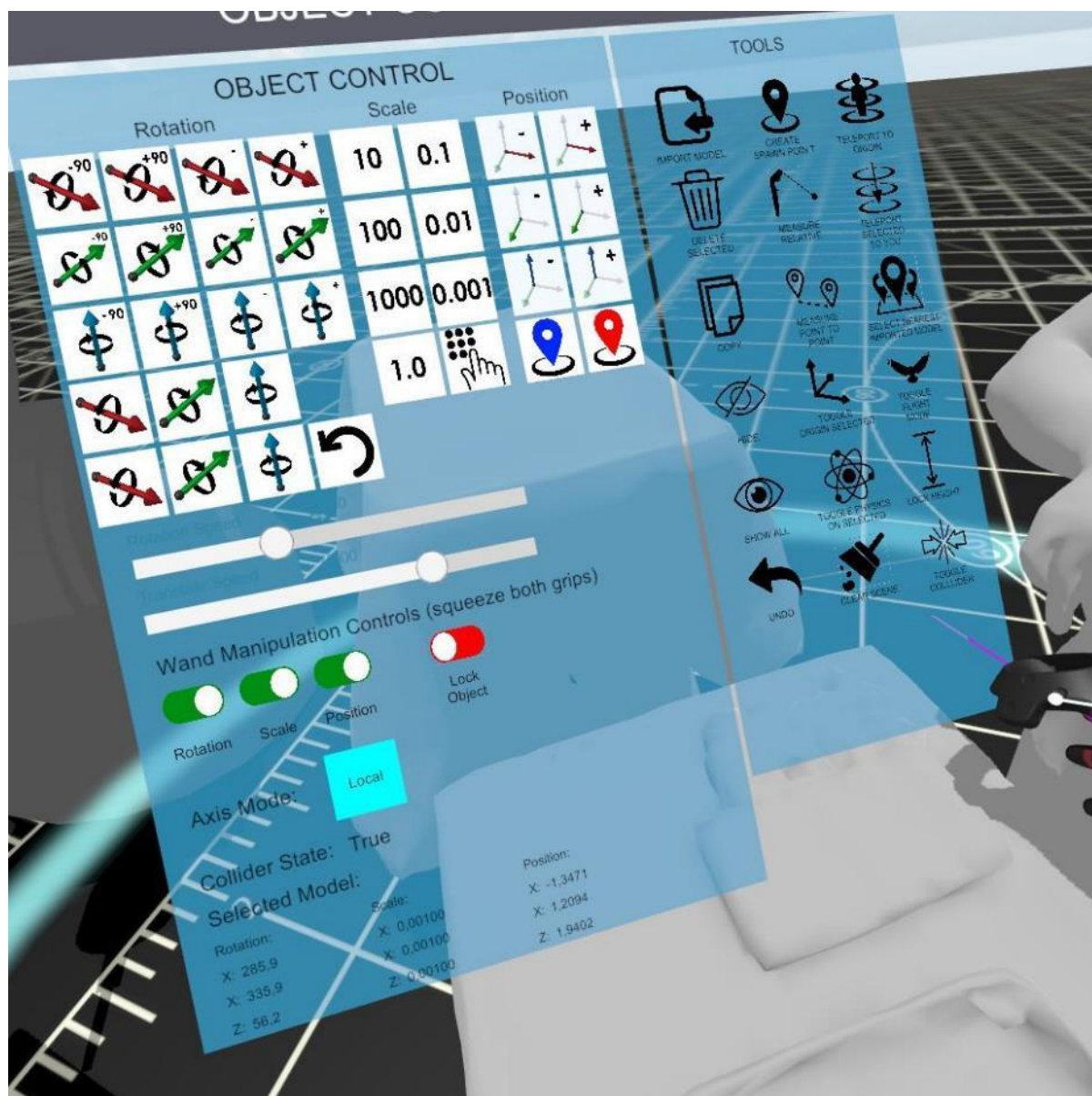
Slika 78. Instrument pri otvaranju maksilarnog sinusa – položaj 5

Tablica 12. Podaci o poziciji i orijentaciji endoskopa u položaju 5

Koordinatna os	Koordinata [mm]	Rotacija [°]
$x$	-0,5680	18,1
$y$	1,0044	330,4
$z$	0,5049	82,3

Nakon otvaranja maksilarnog sinusa, instrument se vraća po prijašnjim točkama (Tablica 10. i 11.) te se vraća tehničaru u ruku (Slika 80.) koji ga ostavlja na stolu (Slika 81.).





Slika 79. Kirurg predaje instrument tehničaru – položaj 6



**Slika 80. Koordinate TCP-a instrumenta odloženog na stol**

Ukupno prijedeni put je vektorski zbroj razlike koordinata TCP-a, te se tako može dobiti približno prijedeni put otvaranja maksilarnog sinusa. S obzirom na vrijednosti iz tablice 8. do 12. treba uzeti u obzir i faktor skaliranja. Faktorom skaliranja kalibriraju se veličine modela u virtualnom prostoru da bi se dobili realni omjeri veličina objekata, budući da objekti potječu iz različitih softvera gdje su modelirani u različitim mjernim jedinicama. Tako je uzet faktor skaliranja od 0,01 za sve objekte osim endoskopa gdje iznosi 0,001.

**Postavljanje scene i uzimanje snimaka zaslona trajalo je 30 minuta. Sama simulacija obuhvatila je: tehničarovo uzimanje instrumenta sa stola i dodavanje kirurgu, kirurgovo**

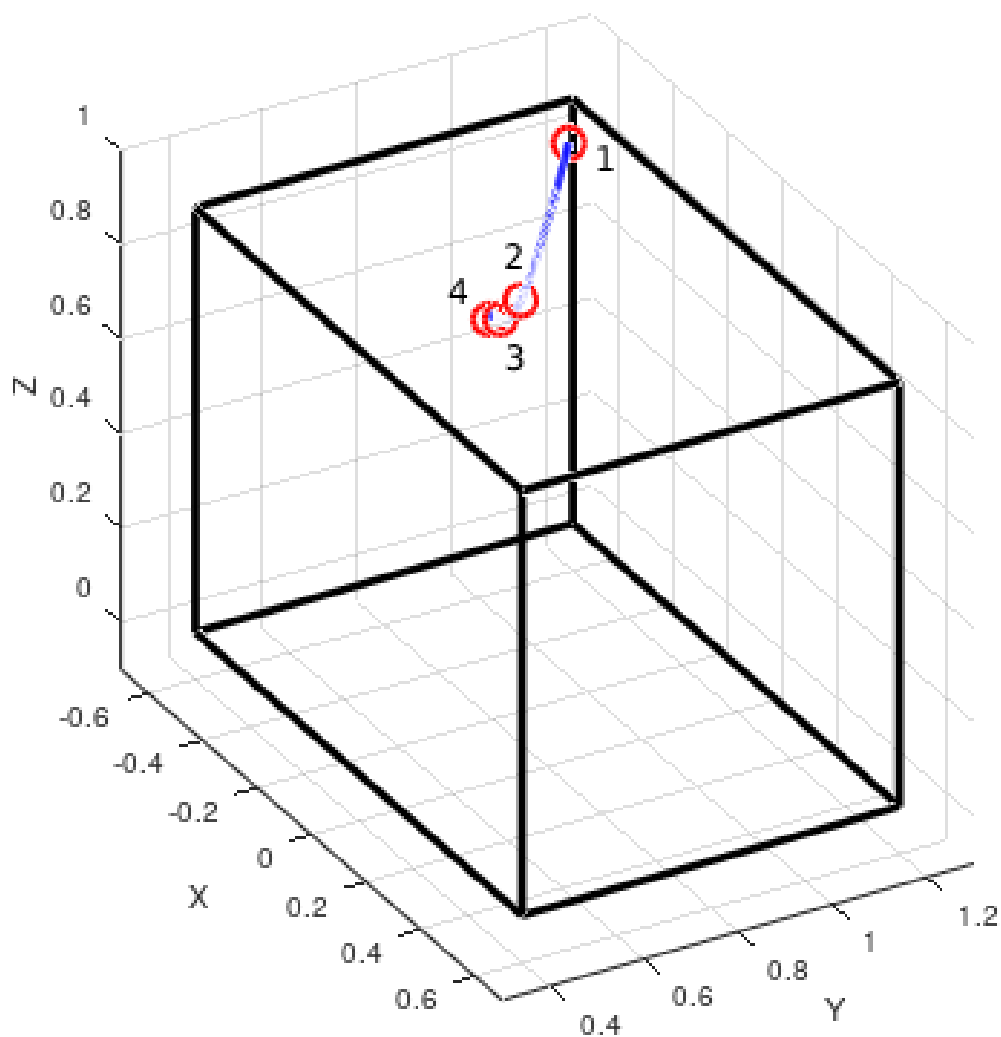
otvaranje maksilarnog sinusa, povrat instrumenta iz operacijskog polja te njegovo vraćanje tehničaru koji ga odlaže na stol. U stvarnosti zahvat otvaranja maksilarnog sinusa traje do 5 minuta. U simulaciji to vrijeme nije posebno određivano: bilo je kraće nego u stvarnosti ali treba uzeti u obzir da je pri simulaciji anatomija pojednostavnjena (na primjer, nema ograničenja pri gibanju instrumenta kroz nosnu šupljinu) te nema haptičke povratne veze. Prijedeni ukupni put TCP-a instrumenta u simulaciji iznosi 1659,06 mm.

Trajektorija samog otvaranja maksilarnog sinusa iznosi 91,64 mm, te je usporedbom s prosječnom dužinom krivulje iz tablice 7. koja iznosi 84,773 mm, vidljivo da je postignuta podudarnost vrijednosti iz virtualnog prostora i softvera Slicer uz devijaciju od 7,5 %.

Uzimanjem što više točaka, i u softveru Slicer i u virtualnom prostoru, dobila bi se još točnija dužina krivulje.

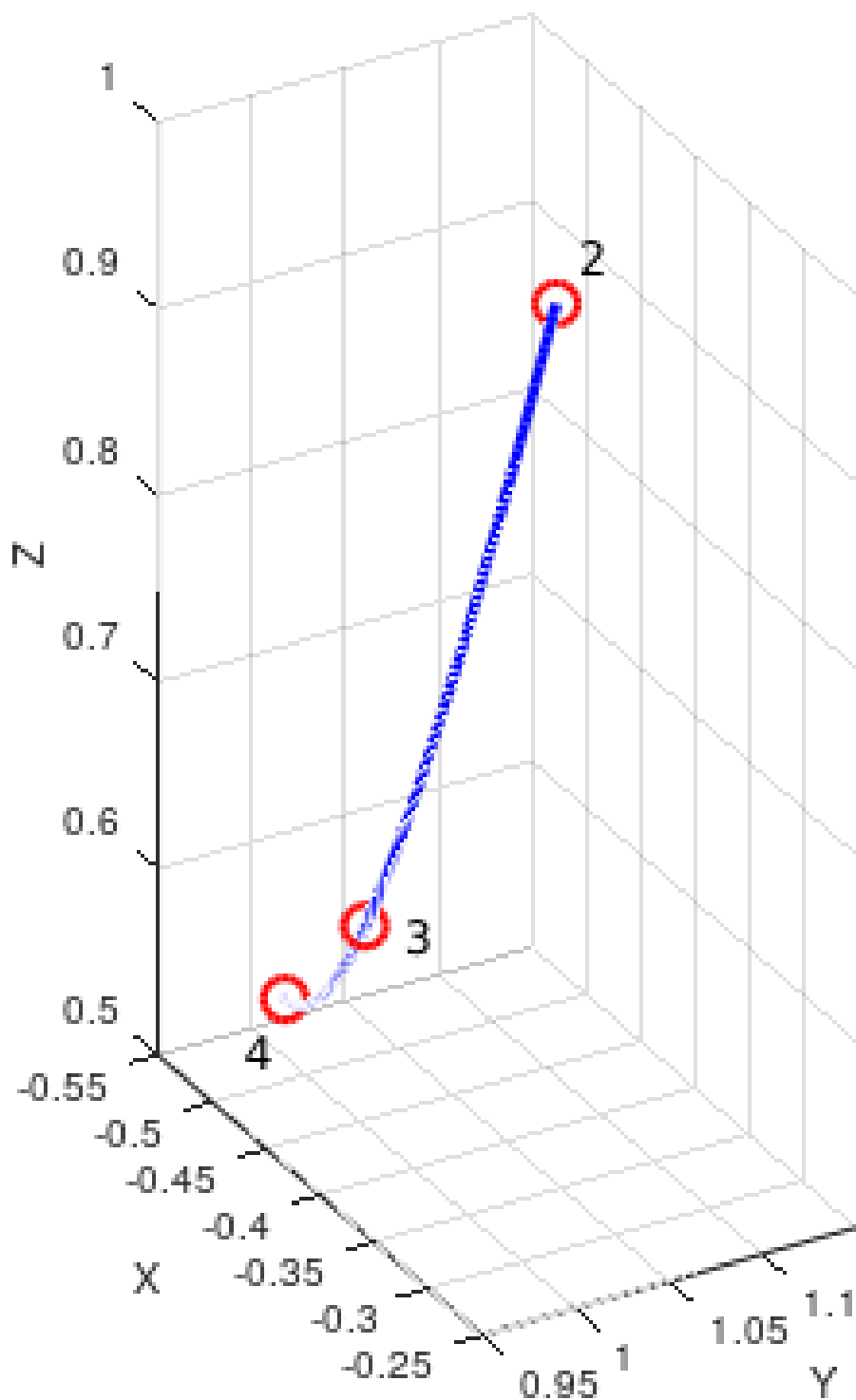
Spajanjem točaka očitanih iz virtualnog prostora dobivena je trajektorija otvaranja maksilarnog sinusa, koja je grafički prikazana pomoću programa MATLAB (Slika 82.). Zbog nemogućnosti prikazivanja lubanje u grafu, uzeti su gabariti modela te je tako dobiven kvadar koji prikazuje prostor koji lubanja zauzima.

Trajektorija je sastavljena od četiri točke: prva točka je kirurgovo preuzimanje instrumenta – položaj 2 (Slika 76., Tablica 9.). Do druge točke se dolazi kirurgovim pomakom instrumenta do bolesnika – položaj 3 (Slika 77., Tablica 10.). U trećoj točki se vrh instrumenta nalazi neposredno ispred ulaza u nosnu šupljinu – položaj 4 (Slika 78., Tablica 11.). Do zadnje točke se dolazi gibanjem instrumenta do mjesta otvaranja maksilarnog sinusa, prednje fontanele. U četvrtoj točki otvara se maksilarni sinus – položaj 5 (Slika 78., Tablica 12.).



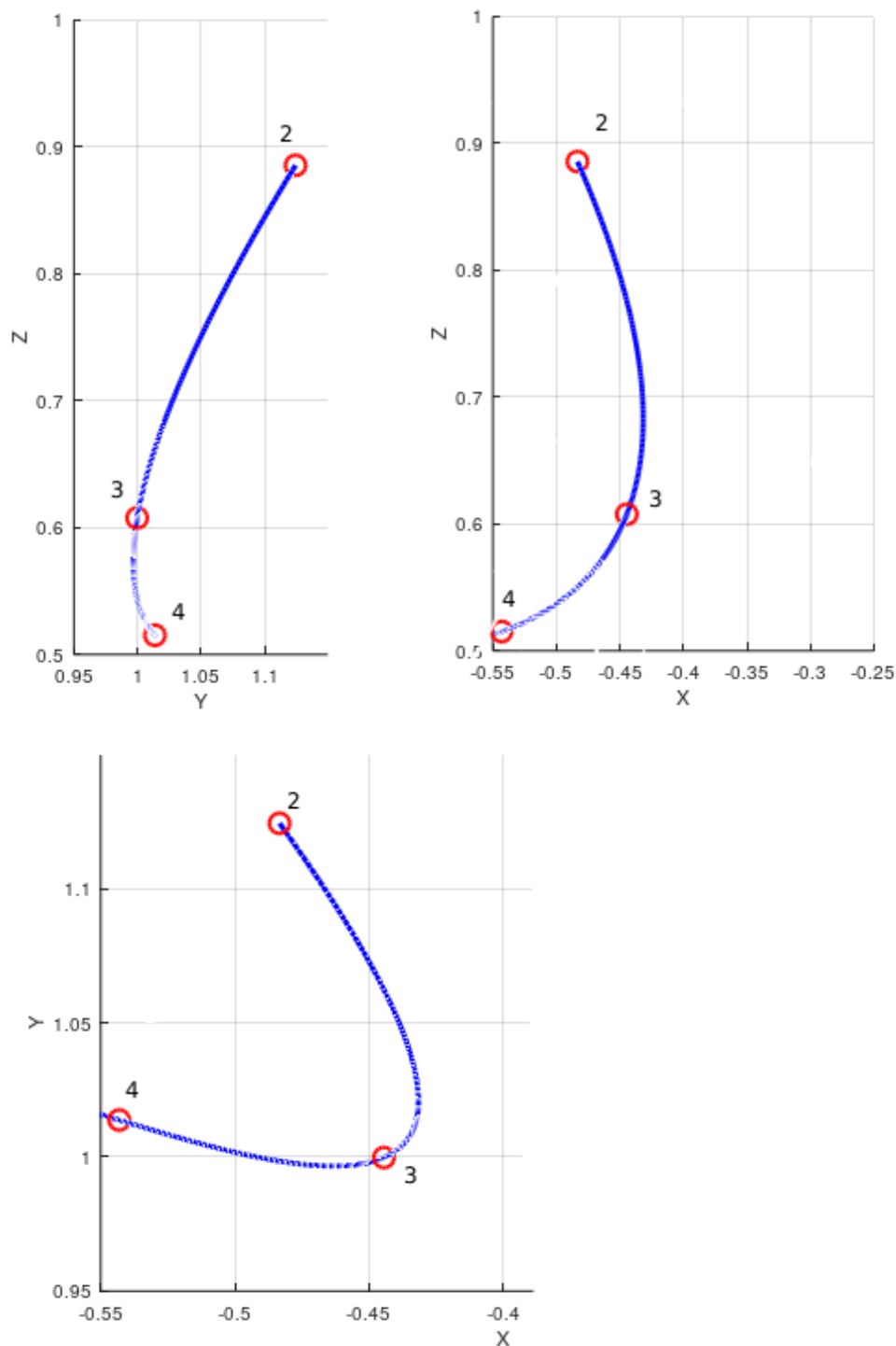
**Slika 81. Trajektorija instrumenta u kirurgovoj ruci, u milimetrima, skalirano 1:100**

Slikom 83. trajektorija, od dijela kada je neposredno ispred nosa do otvaranja maksilarnog sinusa, odnosno trajektorija među točkama 2, 3 i 4 je prikazana uvećano.



Slika 82. Uvećana trajektorija instrumenta u kirurgovoj ruci u nosnoj šupljini, u milimetrima, skalirano 1:100

Za još jasnije razumijevanje krivulje ona je rastavljena po pogledima, odnosno ravninama, pa tako u slici 84. (u skladu s pravilim o tehničkom crtanju) vidljiv je nacrt (ravnina  $yz$ ), bokocrt (ravnina  $xz$ ) i tlocrt (ravnina  $xy$ ).



Slika 83. Projekcije trajektorije (nacrt, bokocrt, tlocrt), 1:100

Za kvalitetniju generalizaciju trajektorije (putanje) instrumenta (alata) bilo bi potrebno analizirati veći skup bolesnika. Na osnovi toga, trajektorije bi se prema svojim anatomsko-geometrijskim svojstvima mogle podijeliti (klasificirati) u razrede, što bi omogućilo da se za njih odrede i skupna kirurško-tehnološka postupanja. Na taj način, za svakog bi se bolesnika temeljem prije zahvata prikupljenih podataka, mogli unaprijed definirati i planirati, pa i simulirati, posebni sadržaji i parametri kirurškog zahvata.

### 5.3. Matematička definija trajektorije otvaranja maksilarnog sinusa

Trajektoriju je moguće matematički definirati korištenjem Lagrangeove interpolacije polinoma.

Neka se definira niz točaka  $t_i$ :

$$t_i = i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

gdje je:  $i$  – brojač točaka.

Ako se svaka točka  $P_i$  definira kao:

$$P_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

pomoću Lagrangeove interpolacije polinoma može se dobiti funkcija:

$$r(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad \text{za } t = i \quad (3)$$

gdje su:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i L_i(t) \quad (4)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i L_i(t) \quad (5)$$

$$z(t) = \sum_{i=1}^n z_i L_i(t). \quad (6)$$

Ako se  $L_i(t)$  definira kao:

$$L_i(t) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{t - t_j}{t_i - t_j} \quad (7)$$

i da je uzeto  $t_j = j$  formula (7) se može zapisati kao:

$$L_i(t) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{t - j}{i - j}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Tako se u konačnici dobije izraz:

$$r(t) = \sum_i^n (x_i, y_i, z_i) L_i(t). \quad (9)$$



## 6. ZAKLJUČAK

Endoskopska kirurgija sinusa predstavlja suvremen pristup liječenju patologija sinusa koji kombinira minimalnu invazivnost s visokim stupnjem točnosti, preciznosti i sigurnosti. Kao metoda, pokazala se izrazito učinkovitom u smanjenju postoperacijskih komplikacija, bržem oporavku bolesnika te smanjenju rizika od potencijalno ozbiljnih posljedica. Zahvaljujući ovom pristupu, bolesnicima se omogućuje značajno manje invazivan zahvat što rezultira kraćim vremenom oporavka i manjom destrukcijom tkiva u odnosu na klasične zahvate.

U ovom radu razmatrana je mogućnost digitalizacije i simulacije kirurškog endoskopskog otvaranja maksilarnog sinusa u virtualnoj stvarnosti. Opisana je zahvatom uključena anatomija, sam zahvat te specifični instrumenti koji se koriste poput endoskopa i mikrodebridera, kao i primjena naprednih sustava za kiruršku navigaciju. Tehnološki napredak, primjerice integracija navigacijskih sustava temeljenih na, pokazuje se ključnim za povećanje sigurnosti i preciznosti zahvata, osobito u anatomske područjima visokog rizika. Digitalizacija i automatizacija kirurških postupaka dodatno unapređuju ovaj proces.

Na uzorku od šest CT snimaka paranazalnih sinusa bolesnika, u softveru Slicer, određene su trajektorije otvaranja njihovih maksilarnih sinusa te identificirana je uprosječna trajektorija otvaranja (84,773 mm). Za određivanje trajektorije korištena je posebno razvijena skripta u programskom jeziku Python.

Potom se u posebnom oblikovanom okruženju operacijske sale u virtualnoj stvarnosti, pomoću opreme HTC Vive 1 te softvera Steam VR i VR model viewer, nastojalo se simulirati radni proces i rekonstruirati trajektoriju sličnu uprosječnoj. Rekonstrukcija je obuhvatila simulaciju pokreta kirurga pri zahvatu te je postignuta trajektorija duljine 91,64 mm.

Rezultati ovog rada, premda postignuti uz izvjesna pojednostavnjenja, pridonose boljem razumijevanju promatranog kirurškog procesa i ostvaruju potencijal virtualne stvarnosti kao

alata za unaprjeđenje kirurške prakse, otvarajući prostor za daljnji razvoj. Tu se prije svega misli na potrebu korištenja haptičkih komponenti, vjerodostojnijih instrumenata te još naprednije virtualizacije anatomije, što bi omogućilo veću točnost i pouzdanost rezultata simulacije.

Automatizacija postupaka, premda još uvijek u eksperimentalnoj fazi, donosi obećavajuće mogućnosti za budućnost. Robotski sustavi, već su pokazali uspješne rezultate u asistenciji tijekom operacija. Potencijalna kombinacija s umjetnom inteligencijom mogla bi omogućiti cjelokupnu automatizaciju kirurških postupaka, što bi povećalo preciznost, skratilo vremena planiranja i trajanja zahvata i smanjilo vjerojatnost kirurških komplikacija. Umjetna inteligencija mogla bi se koristiti da na osnovi anatomske-geometrijskih svojstava generira trajektoriju ali i ostale radne parametre za optimalno otvaranje maksilarnog sinusa.

Zaključno, ovaj rad naglašava kako integracija suvremenih tehnologija, od navigacijskih sustava do digitaliziranih i virtualiziranih radnih okružja, predstavlja daljnji korak u razvoju endoskopske kirurgije. Time bi se ne samo povećala sigurnost i preciznost zahvata, nego i poboljšala prilagodba postupaka specifičnim potrebama svakog bolesnika.

## 7. LITERATURA

- [1] Flint, Paul W., et al. Cummings otolaryngology-head and neck surgery e-book: head and neck surgery, 3-volume set. Elsevier Health Sciences, 2014.
- [2] Oswaldo A Henriquez, Rodney J Schlosser, Jess C Mace, Timothy L Smith, Zachary M Soler. *Laryngoscope*. 2013 May 13;123(11):10.1002/lary.24150. doi: 10.1002/lary.24150
- [3] Stamm, Aldo M. Transnasal endoscopy-assisted skull base surgery. *Annals of Otolology, Rhinology & Laryngology*, 2006, 115.9\_suppl: 45-53.
- [4] <https://pkyzas.com/conditions/head-and-neck-cancer/paranasal-sinus-and-nasal-cavity-cancer/>, pristupljeno 2024-09-02
- [5] Baudoin, Tomislav; Branica, Srećko. *Otorinolaringologija i kirurgija glave i vrata*. [S. l.]: [s. n.], 2024.
- [6] P. Gorazd, Fontanelle defects, 12<sup>th</sup> Congress of the International Rhinologic Society
- [7] <https://bayyahospital.com/septum/>, pristupljeno 2024-09-02
- [8] <https://www.kenhub.com/en/study/the-blood-vessels-of-the-nasal-cavity>, pristupljeno 2025-01-07
- [9] VARADHARAJAN, R., et al. An endoscopic study on the prevalence of the accessory maxillary ostium in chronic sinusitis patients. *Int J Otorhinolaryngol Head Neck Surg*, 2020, 6.1: 40-4
- [10] STAMM, A. C. *Transnasal Endoscopic Skull Base and Brain Surgery: Tips and Pearls*. Stuttgart: Thieme, 2012.
- [11] <https://patents.google.com/patent/EP1322240B1/en>, pristupljeno 2024-09-05
- [12] [www.medtronic.com/](http://www.medtronic.com/), pristupljeno 2024-09-05

- [13] <https://www.arizonasinus.com/image-guided-endoscopic-surgery.htm>, pristupljeno 2024-09-10
- [14] Fatterpekar, Girish M.; Delman, Bradley N.; Som, Peter M. Imaging the paranasal sinuses: where we are and where we are going. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, 2008, 291.11: 1564-1572.
- [15] <https://radiopaedia.org/articles/haller-cells>, pristupljeno 2024-10-06
- [16] Grainger, R. G.; Allison, D. (ur.). *Grainger & Allison's Diagnostic Radiology: A Textbook of Medical Imaging*. 7. izd. Philadelphia: Elsevier, 2021.
- [17] <https://www.lifeguardhospital.com.np/service/ct-scan/detail>, pristupljeno 2024-10-06
- [18] [https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Human\\_anatomy\\_planes-HR.svg](https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Human_anatomy_planes-HR.svg), pristupljeno, 2024-10-06
- [19] <https://www.readyhealthbd.com/product/mri-of-ear>, pristupljeno 2024-10-06
- [20] [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-MR-Scanner\\_fig1\\_366191072](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-MR-Scanner_fig1_366191072), pristupljeno 2024-10-06
- [21] [https://www.researchgate.net/figure/MR-imaging-of-the-paranasal-sinuses-T2-weighted-T1-weighted-and-T1-weighted-post\\_fig3\\_49804623](https://www.researchgate.net/figure/MR-imaging-of-the-paranasal-sinuses-T2-weighted-T1-weighted-and-T1-weighted-post_fig3_49804623), pristupljeno 2024-10-06
- [22] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1930043324006034>, pristupljeno 2024-10-06
- [23] [https://www.researchgate.net/figure/Coronal-post-contrast-T1-W-and-T2-W-images-of-paranasal-sinus-and-nasal-fossa-a\\_fig3\\_347958134](https://www.researchgate.net/figure/Coronal-post-contrast-T1-W-and-T2-W-images-of-paranasal-sinus-and-nasal-fossa-a_fig3_347958134), pristupljeno 2024-10-06
- [24] <https://europe.medtronic.com/xd-en/healthcare-professionals/products/neurological/surgical-navigation-systems/stealthstation.html>, pristupljeno 2024-10-17
- [25] <https://www.intuitive.com/en-us/patients/da-vinci-robotic-surgery/about-the-systems>, pristupljeno 2024-10-17
- [26] P. Gorazd, Nastavni materijal, Medicinski fakultet, Zagreb.
- [27] <https://www.vive.com/eu/product/vive/>, pristupljeno 2024-12-20
- [28] <https://www.vive.com/us/accessory/>, pristupljeno 2024-12-20

- [29] [https://www.vive.com/us/support/vive/category\\_howto/planning-your-play-area.html](https://www.vive.com/us/support/vive/category_howto/planning-your-play-area.html), pristupljeno 2024-12-21
- [30] <https://grabcad.com/library/medical-operating-table--1>, pristupljeno 2024-12-21
- [31] <https://grabcad.com/library/endoscope-tube-1>, pristupljeno 2024-12-21
- [32] <https://www.fab.com/listings/8a551232-896f-4a5d-82f6-b3f0d1e96a60>, pristupljeno 2024-12-21
- [33] <https://sketchfab.com/3d-models/monitor-scp-a21bd4eed2c642eaa7e702269f47b002>, pristupljeno 2024-12-21
- [34] <https://sketchfab.com/3d-models/surgical-instrument-table-collection-a1fcfeab1ad646638089655e8b6f0e2b>, pristupljeno 2024-12-21
- [35] <https://sketchfab.com/3d-models/visible-interactive-human-exploding-skull-252887e2e755427c90d9e3d0c6d3025f>, pristupljeno 2024-12-21
- [36] Kunica, Zoran; Poje, Gorazd; Mlivić, Denis; Topolnjak, Jan Conceptualization of virtual reality experiments for optimized sinus surgery planning and execution // International journal of industrial engineering and management, 14 (2023), 1; 13-24. doi: 10.24867/ijiem-2023-1-321
- [37] Kunica, Zoran; Poje, Gorazd ; Mlivić, Denis; Knežević, Mario; Antunović, Bartol Digital transformation in nose surgery // 8. hrvatski rinološki kongres 8. Croatian rhinologic congress Zagreb, Hrvatska, 01.03.2024-02.03.2024
- [38] Knežević, Mario Virtualizacija kirurških zahvata na nosu, Diplomski rad, Kunica, Zoran; Poje, Gorazd (mentor). Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023