

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

LUKA BALATINEC
ATLAS STRUJANJA U NOSNOJ ŠUPLJINI

ZAGREB, 2018.

Ovaj je rad izrađen na Katedri za turbostrojeve pri Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i okoliš na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Hrvoja Jasaka, dipl. ing te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Hrvoju Jasaku, na strpljenju, čije je znanje i iskustvo uvelike doprinijelo uspješnoj izradi ovog rada, a bez čije pomoći uspješan završetak rada rada ne bi bio moguć. Također se zahvaljujem prof.dr.sc. Davoru Vagiću dr.m., na pomoći oko medicinskog aspekta rada i potrebnim medicinskim podacima. Dodatno se želim zahvaliti Tessi Uroić i Vanji Škuriću, koji su mi pomogli u otkrivanju svijeta CFD-a i pružili nesebičnu pomoć i podršku u svakom trenutku.

Sadržaj

Sadržaj	III
Popis slika	V
Popis tablica	VII
Popis oznaka	1
1. Motivacija	1
2. Nos i nosna šupljina	5
2.1. Anatomija	5
2.1.1. Vanjski nos	6
2.1.2. Nosna šupljina	9
2.1.3. Paranasalni sinusi	11
2.1.4. Vaskularizacija i inervacija nosne šupljine	13
2.2. Fiziologija nosa	14
2.2.1. Respiracijska funkcija i nosni ciklus	14
2.2.2. Termoregulacijska funkcija	15
2.2.3. Zaštitna funkcija i imunologija nosa	16
2.2.4. Olfaktorna funkcija nosa	17
2.2.5. Nazalni refleksi	17
2.3. Oboljenja nosne šupljine	18
2.4. Zaključak uvoda	20

3. Model geometrije nosa	21
3.1. Računalna tomografija – CT	22
3.2. Izrada računalne geometrije modela	24
4. Numerička simulacija	25
4.1. Matematički i numerički model strujanja	25
4.2. Izrada proračunske mreže	28
4.3. Rubni i početni uvjeti	30
5. Rezultati	35
5.1. Simulacija procesa udisanja	35
5.2. Simulacija procesa izdisanja	43
5.3. Simulacija kratkog udisaja	50
5.4. Turbulentna kinetička energija	57
6. Zaključak	63
6.1. Ostvareni rad	63
6.2. Nastavak istraživanja	64
A. Prilog	68
A.1. Izrada geometrije u paketu <i>3DSlicer</i>	68
A.2. Obrada dobivenog modela u paketu <i>Blender</i>	69
A.3. Obrada modela u paketu <i>MeshLab</i>	70
A.4. Obrada rubnih ploha i povezivanje geometrije	71
B. Video zapisi	73
C. Popis izvora slika	74
Literatura	76

Popis slika

2.1	Gornji i donji dišni putevi	6
2.2	Dijelovi vanjskog nosa.	7
2.3	Hrskavični i koštani dio nosa.	8
2.4	Alarna hrskavica.	8
2.5	Područja unutarnjeg nosa.	9
2.6	Građa unutarnjeg nosa.	9
2.7	Šupljine unutar nosa.	11
2.8	Paranasalni sinusi.	12
2.9	<i>Kiesselbachov</i> pleksus.	14
2.10	Devijacija septuma.	19
3.1	Transverzalna (A), frontalna (B) i sagitalna ravnina (C).	23
4.1	Presjek proračunske mreže.	28
4.2	Rubne plohe modela.	30
4.3	Ciklus udisaja i izdisaja.	32
4.4	Kratki i normalni udisaj.	33
5.1	Strujnice pri normalnom udisaju.	36
5.2	Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 0,5$ s.	39
5.3	Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 1$ s.	40
5.4	Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 1,5$ s.	41
5.5	Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 2$ s.	42

5.6	Strujnice pri izdisanju.	44
5.7	Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 0,5$ s.	46
5.8	Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 1$ s.	47
5.9	Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 2$ s.	48
5.10	Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 3$ s.	49
5.11	Strujnice pri kratkom udisaju.	51
5.12	Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,2$ s.	53
5.13	Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,3$ s.	54
5.14	Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,4$ s.	55
5.15	Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,5$ s.	56
5.16	Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri normalnom udisaju za $T = 1$ s.	57
5.17	Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri normalnom izdisaju za $T = 1,5$ s.	59
5.18	Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri kratkom udisaju za $T = 0,25$ s.	59
5.19	Presjek nosnih hodnika pri udisaju za $T = 1$ s.	60
5.20	Presjek nosnih hodnika pri izdisaju za $T = 1$ s.	60
5.21	Presjek nosnih hodnika pri kratkom udisaju za $T = 0,25$ s.	61
A.1	Izrada volumena u paketu <i>3D slicer</i>	69
A.2	Model nakon obrade u paketu <i>Blender</i>	70
A.3	Dio nepotrebne geometrije prije otklanjanja	71

Popis tablica

4.1	Detaljni podaci o proračunskoj mreži.	29
4.2	Rubni uvjeti na pojedinoj plohi.	31
4.3	Podaci o simulaciji i korištenim računalima.	34

1 | Motivacija

Nos, kao neizostavni organ u procesu disanja, iznimno je bitan za život čovjeka. Pravilan rad nosa i nosne šupljine preduvjet je za normalno odvijanje procesa disanja, a time i ostalih procesa nužnih za zdravo funkcioniranje organizma.

Prilikom procesa disanja, bilo udisaja ili izdisaja, nos i nosna šupljina izravno utječu na oblik strujanja zraka koje se formira disanjem. Izgled strujanja ovisi o geometriji nosne šupljine te se razlikuje od osobe do osobe. Nos i nosna šupljina imaju složenu ulogu u procesu pripreme zraka. Osnovne funkcije u kojima sudjeluju su zagrijavanje zraka s okolišne temperature na temperaturu tijela, povećavanje vlažnosti udahnutog zraka, filtracija čestica iz zraka prilikom udisaja, itd. Posljedica sudjelovanja nosa i nosne šupljine u širokom spektru funkcija prilikom disanja je njihova složena geometrija, a time i složena slika strujanja zraka. Kvalitetan uvid u proces razvijanja strujanja u nosnoj šupljini, u ovisnosti o geometriji, nužan je korak u razumijevanju procesa disanja i stvaranju detaljne slike o procesima, koji se odvijaju prilikom disanja, u nosu i nosnoj šupljini.

Razvojem medicine i rutinskih medicinskih zahvata, operacije nosa postale su dio svakodnevnice te se izvode iz niza razloga, od zahvata s funkcijom reparacije traume nastale na tkivu nosne šupljine i odstranjivanja malformacija, pa sve do estetskih operacija nosa. Ipak, neovisno o konačnom cilju medicinskog zahvata, svi zahvati, koliko god dobro izvedeni od strane kirurga, ostavljaju traga na tkivu nosa i nosne šupljine, što znači da i najmanji kirurški zahvati dovode do promjene geometrije nosa, a čak i najmanje promjene

u geometriji nosne šupljine mogu imati izražen utjecaj na strujanje. Stoga poznavanje utjecaja zahvata na strujanje zraka, prije provedbe samog zahvata, uvelike bi pomoglo u spoznavanju posljedica i donošenju informirane odluke o detaljima medicinskog zahvata.

Razvoj medicinske radiologije, kao i područja medicinske dijagnostike, omogućio je primjenu različitih tehnologija poput kompjuterizirane tomografije (eng. *Computed Tomography - CT*), magnetske rezonancije (eng. *Magnetic Resonance Imaging - MRI*) itd. Primjenom navedenih metoda, jednostavno se i brzo dolazi do stvarne slike nosne šupljine pojedinog pacijenta, te se dobiva dvodimenzionalni uvid (u obliku slika) u geometriju nosne šupljine i okolnog tkiva. Napredak u računalnoj grafici omogućava korištenje dvodimenzionalnog prikaza kroz sve tri ravnine snimanja (sagitalna, koronarna i aksijalna ravnina) kao temelj za izradu trodimenzionalnog prikaza organa i tkiva (Slika 3.1). Superpozicijom dvodimenzionalnih slika triju pogleda dobiva se trodimenzionalni prikaz nosne šupljine. Isti se, nakon daljnje dorade, koristi za izradu trodimenzionalnog prikaza geometrije nosne šupljine. Na taj se način relativno jednostavno može izraditi geometrija nosne šupljine različitih pacijenata za korištenje u numeričkim simulacijama.

Primjena postojećih metoda medicinske dijagnostike daje sliku isključivo o mehaničkim svojstvima tkiva nosa i nosne šupljine, ali ne nudi uvid u strujanje zraka koje se formira u unutrašnjosti nosa. Detaljan prikaz strujanja za specifičnu geometriju pojedinog pacijenta omogućio bi informirani pristup u donošenju odluka prilikom dijagnoze i planiranja kirurških zahvata. Izrada slike strujanja na većem broju ispitanika dovela bi do formiranja opsežnog atlasa strujanja u nosnoj šupljini. Iz takvog bi atlasa bilo moguće dobiti sliku o tome kako izgleda strujanje u nosnoj šupljini, kakvo je to „normalno” ili „zdravo” strujanje u nosu, kako se pojedine deformacije građe nosa ili promjene na tkivu nosne šupljine odražavaju na formiranje strujanja te utječu li te promjene na lakoću disanja osobe. Kod individualnog pacijenta pojavljuje se mogućnost izrade slike strujanja prije i poslije mogućeg zahvata na području nosa te usporedba rezultata ne bi li se utvrdila potencijalna korist ili štetnost zahvata.

Korištenjem naprednih alata računalne dinamike fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics - CFD*) moguće je dobiti izrazito točnu sliku strujanja za složenu geometriju nosne

šupljine dobivenu prethodno spomenutom metodologijom. U drugim područjima znanosti moguće je koristiti eksperimentalne metode za istraživanje strujanja, ali kako se u slučaju promatranja strujanja zraka kroz nosnu šupljinu čovjeka radi o istraživanju na živom pacijentu, eksperimentalne metode nije moguće koristiti. CFD simulacije imaju široku primjenu u strojarstvu i omogućavaju detaljan uvid u ponašanje strujanja i pojašnjavanje različitih pojava vezanih uz strujanje fluida te su idealan alat za razumijevanje strujanja unutar nosne šupljine bez izrade eksperimenta. Moguće je provesti proračun laminarnog i turbulentnog strujanja do visokih razina točnosti za širok spektar varijacija geometrije i uvjeta strujanja prilikom disanja. Za pojedinog je pacijenta, temeljem snimke nosne šupljine i mjerenja karakteristika disanja (rinometrija), moguće dobiti CFD simulaciju strujanja zraka kroz nosnu šupljinu prilikom udisaja i/ili izdisaja te korelirati rezultate simulacije i dobivene karakteristike strujanja sa stvarnom geometrijom i uvjetima u nosu.

Cilj ovog projekta je izrada konzistentne metodologije za stvaranje preciznog računalnog modela geometrije nosne šupljine na temelju radioloških nalaza, stvaranja proračunske mreže dovoljne rezolucije za postizanje zadovoljavajuće razine točnosti te CFD simulacija na temelju iste, neovisno o specifičnostima strujanja i geometriji nosa. Želi se uspostaviti postupak izrade modela strujanja zraka u nosnoj šupljini, primjenjiv na rezultate radiološke snimke bilo kojeg pacijenta, neovisno o nalazu. Time se otvara mogućnost izrade analize strujanja na temelju rezultata CFD simulacije strujanja za veći broj ispitanika s ciljem stvaranja baze podataka u obliku Atlasa strujanja te formiranja zaključaka o utjecaju različitih faktora na promjene strujanja. Primjena modela izrađenog predloženom metodologijom omogućila bi planiranje kirurškog zahvata „in silico” na temelju CFD simulacije, prije izvođenja na samom pacijentu, smanjujući nepotrebnu neugodu pacijenta.

Predstavljeni rad podijeljen je u nekoliko cjelina. Rad započinje pregledom anatomije i fiziologije nosa i nosne šupljine kako bi se prikazala složenost nosa kao organa nužnog za proces disanja. Pojašnjavaju se funkcije nosa i nosne šupljine te se predstavljaju neka najčešća oboljenja nosne šupljine i njihov mogući odraz na strujanje zraka. Slijedi opis postupka izrade trodimenzionalnog modela geometrije nosa na temelju podataka radiografskih nalaza individualnog pacijenta, primjenom računalnog paketa *3DSlicer*. Objašnjava se izrada proračunske mreže na temelju dobivene geometrije nakon obrade

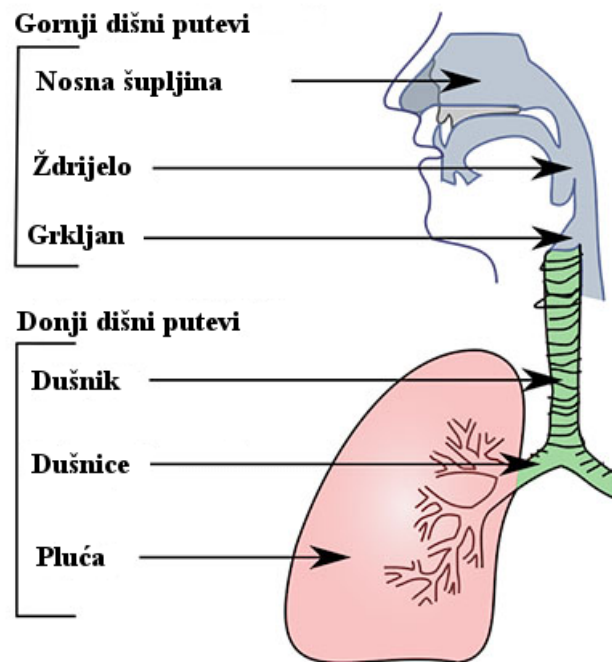
primjenom prikladnih računalnih alata (*Blender*, *MeshLab*). Uključen je i opis matematičkog modela primijenjenog u numeričkoj simulaciji, kao i opis primjene prostorne diskretizacije mreže kontrolnih volumena, uz odgovarajuće postavke rubnih i početnih uvjeta. Numerička simulacija provedena je primjenom open-source CFD programskog paketa `OpenFoam` [1]. Slijedi predstavljanje rezultata dobivenih numeričkom simulacijom, uz odgovarajuću diskusiju i objašnjenje rezultata. Rad završava kratkim zaključkom i osvrtom na spoznaje nastale u procesu izrade ovog projekta.

2 | Nos i nosna šupljina

2.1. Anatomija

Proces disanja nužan je za život čovjeka i, u užem smislu, podrazumijeva izmjenu plinova između zraka u plućima i alveola pluća. U plućima se odvija prijenos kisika iz udahnutog zraka u krvotok te, u obrnutom smjeru, prijenos ugljikovog dioksida iz krvotoka na zrak, koji se zatim izbacuje iz dišnog sustava izdisajem. Iako su pluća temeljni organ koji se koristi u procesu disanja, zrak je do pluća potrebno dovesti. Funkciju transporta zraka do pluća imaju dišni putevi koji, osim dovodenja zraka plućima, sudjeluju i u pripremi zraka. Dišni putevi se sastoje od nosne šupljine, ždrijela, grkljana, dušnika, dušnica i pluća te se mogu podijeliti na gornje i donje dišne puteve (Slika 2.1).

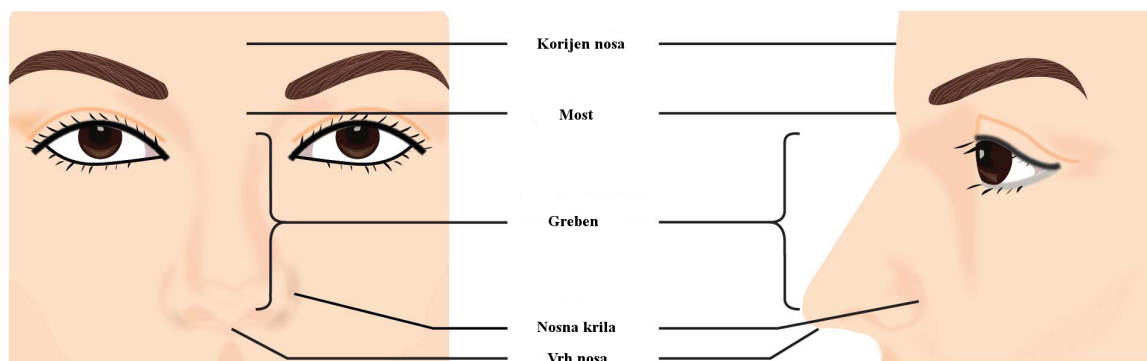
Gornji se dišni putevi sastoje od dva velika, odvojena, šuplja prostora, koji se nazivaju nosna i usna šupljina. Uz to, osnovni dio gornjih dišnih puteva čine i grkljan ili larinks te ždrijelo ili farinks. Primarna uloga gornjih dišnih puteva njihovo je sudjelovanje u dopremanju zraka ostatku dišnog sustava tj. donjim dišnim putevima i plućima. Gornji dišni putevi primarno služe kao zračni kanal za transport zraka, ali imaju i sekundarne uloge ovlaživanja i zagrijavanja zraka te filtracije štetnih čestica unesenih s udahnutim zrakom. Sastavni organi gornjih dišnih puteva imaju i značajnu ulogu u formiranju glasa tj. ljudskom govoru, a čine i neizostavan dio sustava osjeta njuha.



Slika 2.1: Gornji i donji dišni putevi

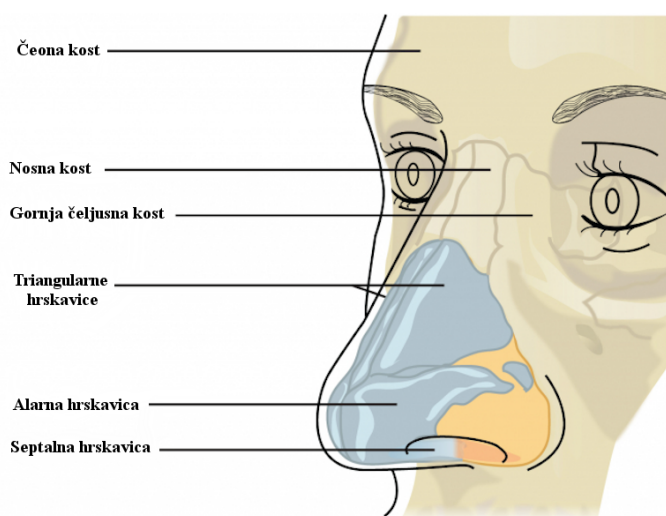
2.1.1. Vanjski nos

Prema [2] nos se anatomski može podijeliti na vanjski nos, koji je građen od koštanog i hrskavičnog tkiva, te nosnu šupljinu. Koštani dio vanjskog nosa formiraju nosne kosti, nosni nastavak čeonih kosti i čeonih nastavak gornje čeljusti. Hrkavični dio vanjskog nosa građen je od para triangularnih i alarnih hrskavica te središnje kvadriangularne hrskavice. (Slika 2.2) Vanjski nos je piramidalne građe i stoga se često naziva nosnom piramidom. Sastoji se od korijena nosa (lat. *radix nasi*), hrbata ili grebena (lat. *dorsum nasi*) te vrha (lat. *apex nasi*). Korijenom je pričvršćen za čelo, a vrh vanjskog nosa slobodno završava u prostoru. Gornju trećinu vanjskog nosa grade kosti nosne šupljine i kosti gornjeg dijela čeljusne kosti (gornji nastavak čeonih kosti) te formiraju veliki koštani otvor nosa (lat. *apertura piriformis*). Ostale dvije trećine nosa građene su primarno od hrskavice i masnog tkiva. Lateralne (bočne) površine nosa hrskavične su građe, a tvore ih parne triangularne hrskavice koje se međusobno vežu na središnjem dijelu vanjskog nosa tvoreći greben, *dorsum*, čiji se gornji dio naziva mostom nosa i veže se na nosne kosti.



Slika 2.2: Dijelovi vanjskog nosa.

Nosna pregrada ili septum građena je od hrskavičnog tkiva koje tvori četverokutnu pregradu smještenu u središnjem položaju između stijenki nosne šupljine, ali i koštanog dijela građena od etmoidalne kosti i vomera. Poznato je da septum nije homogene strukture, te pruža slabu otpornost na mehaničke traume [3]. Osnovna funkcija septuma je razdvajanje lijeve i desne nosnice tj. razdvajanje prostora nosne šupljine. Osim toga, nosna pregrada ima i bitnu ulogu u osiguravanju mehaničke čvrstoće nosa, služeći kao dio sustava nosive konstrukcije nosa. Osim većeg dijela nosne pregrade, od hrskavičnog su tkiva građene i bočne stranice vanjskog nosa, koje se nalaze s obje strane septalne hrskavice nosne pregrade. One, lateralno gledano, čine hrskavične površine trapeznog oblika tj. triangularne hrskavice, koje se vežu na središnju pregradu nosa, tj. septum. Prostiru se preko središnje trećine nosne šupljine tvoreći prijelaznu zonu između tvrdog koštanog tkiva nosnih kostiju gornje trećine nosa i fleksibilnog mekog tkiva koje okružuje nosnice na donjoj trećini nosa (Slika 2.3). Na donjoj trećini nosa, nosnice su okružene prstenastim hrskavičnim tkivom u obliku slova C, koje se naziva zavijenom ili alarnom hrskavicom (Slika 2.4). Alarna ili zavijena hrskavica služi kao potpora završetku nosa te iz tog razloga ima izrazito velik utjecaj na estetiku nosa.



Slika 2.3: Hrskavični i koštani dio nosa.



Slika 2.4: Alarna hrskavica.

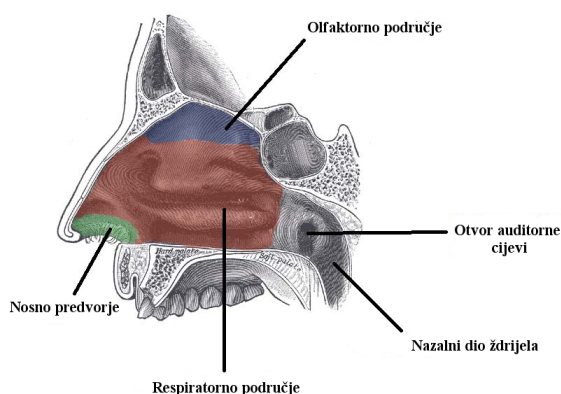
Morfološki gledano, pri samom vrhu, na vanjskom se nosu nalaze dva eliptična otvora nazvana *nares* ili nosnice (lat. *Orificium nasi*). Nosnice su najčešće eliptičnog ili nepravilnog ovalnog oblika [4] i odvojene su jedna od druge medialnom stijenkom nosne šupljine, nosnom pregradom tj. septumom. Na donjem dijelu vanjskog nosa, lateralne površine završavaju zaobljenjima, tj. nosnim krilima (lat. *ala nasi*). Ti su zalisci građeni od relativno mekog tkiva što dovodi do njihova pomicanja prilikom disanja, ovisno o protoku zraka kroz nosnu šupljinu [5]. Prednji dio nosne pregrade koja razdvaja nosnice naziva se kolumena, a kut koji među sobom zatvaraju kolumena i gornja usna naziva se septolabijalnim kutem. Mjera septolabijalnog kuta kod muškaraca je približno 90° , dok je taj kut kod žena nešto veći i iznosi od 100° do 110° . Osim septolabijalnog kuta, u kontekstu promatranja geometrije nosa, interesantan je i profilni kut nosa. Profilni kut nosa jest kut koji zatvaraju tangenta najizbočenije točke čela i linija koja prati hrbat nosa, a prosječna je mjera profilnog kuta oko 30° [6, 7].

Vanjski se pokrov nosne piramide izrazito razlikuje na pojedinim dijelovima nosa. Koža kojom je prekriven vanjski dio nosa relativno je tanke građe, te nije čvrsto vezana uz podlogu što omogućava njeno pomicanje po podlozi. S donje strane nosa pronalazimo područje prekriveno debljim slojem kože, ispunjenim velikim brojem lojnih žlijezdi [6]. Bitno je naglasiti da koža vanjskog nosa ne prestaje na rubovima nosnica, već ulazi unutar nosa i postupnim se prijelazom iz kožnog pokrova u sluznicu, pod nazivom *Sneiderov* epitel, proteže sve do unutarnjeg dijela septuma.

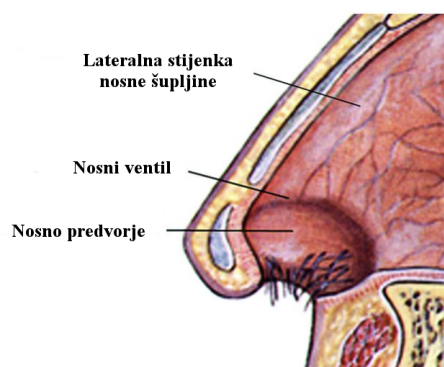
2.1.2. Nosna šupljina

Nosnom šupljinom (lat. *cavitas nasi*) nazivamo unutrašnjost nosa i možemo je smatrati samim početkom dišnog sustava i gornjih dišnih puteva, te će biti glavna tema ovog projekta. Prethodno spomenute funkcije gornjih dišnih puteva (transport, filtracija, ovlaživanje i zagrijavanje udahnutog zraka [4]) odvijaju se upravo unutar nosa i primarna su funkcija nosne šupljine. Unutar nosne šupljine nalaze se i organi zaduženi za formiranje osjetila njuha, a čitava nosna šupljina svojevrsna je rezonantna kutija koja se koristi u postupku formiranja glasa.

Nosna šupljina građena je tako da se na prednjem dijelu nosa otvara prema vanjskom prostoru. Zrak u nosnu šupljinu ulazi kroz parne otvore vanjskog nosa, nosnice. Ti vanjski rubovi nosne šupljine omeđeni su takozvanim nosnim krilima. Unutrašnjost nosne šupljine podijeljena je pregradom nosa ili septumom na dva, približno jednaka dijela. Već je spomenuto da septum ili nosna pregrada odvađa nosnice i dijeli prostor nosne šupljine na dva simetrična dijela. Svaki od njih dodatno se može podijeliti na specifične stijenke od kojih je građen. Govorimo o krovu, dnu i lateralnoj stijenci te medialnoj ili septalnoj stijenci nosne šupljine [2]. Prostor nosne šupljine može se dodatno podijeliti na nosnu vestibulu, respiratorni i olfaktorni dio (Slika 2.5).



Slika 2.5: Područja unutarnjeg nosa.



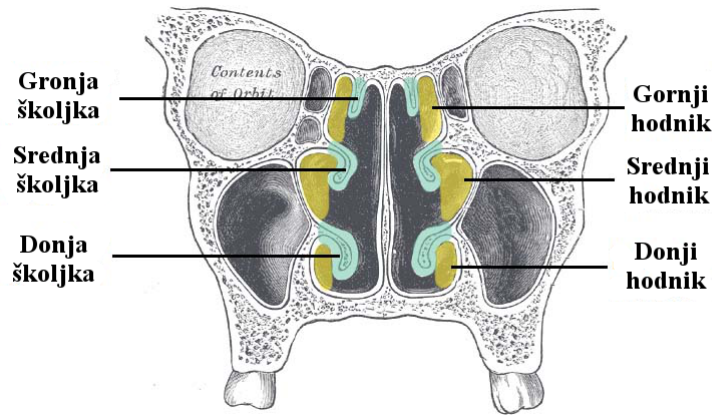
Slika 2.6: Građa unutarnjeg nosa.

Nosna vestibula ili nosno predvorje (lat. *vestibulum nasi*) je naziv za prošireni dio nosne šupljine koji se nalazi neposredno u nastavku nakon nosnica. Bočno je omeđena alarnim hrskavicama i dijelom nosne hrskavice, dok je sa stražnje strane omeđena zaobljenim is-

pupčanjem, koje se naziva nosni ventil (lat. *limen nasi*). Stijenke vestibule prekrivene su kožom koja sadrži lojne i znojne žlijezde, te iz koje izvire grube dlačice s funkcijom filtracije zraka (Slika 2.6).

Olfaktorni dio nosne šupljine nalazi se na gornjem, krovnom dijelu nosne šupljine. Primarno služi kao ključan dio osjetila njuha jer se upravo na tom dijelu nosne šupljine nalaze olfaktorni receptori. Ovo je područje slabije prokrvljeno i prekriveno je epitelom koji sadrži olfaktorne receptore kao i olfaktorne (*Bowmanove*) žlijezde, koje luče spojeve zaslužne za otapanje čestica i mirisnih spojeva iz udahnutog zraka.

Prema literaturi [5, 8] zamo da se respiratorni dio nosne šupljine odnosi na kanal za prolaz zraka kroz nosnu šupljinu te njegov prolaz u ostatak dišnog sustava. Lateralne stijenke respiratornog dijela svake od para nosnica tvore tri zavojite izbočine stijenke nosne šupljine, koje se nazivaju nosne školjke (lat. *conchae nasales*). Njihova je osnovna funkcija povećanje ukupne površine stijenke nosne šupljine te stvaranje turbulencije u strujanju zraka. Brzo se laminarno strujanje usporava, uz stvaranje turbulencije. Povećanje kontaktne površine između sluznice nosa i udahnutog zraka, uz stvorenu turbulenciju, osigurava bolju filtraciju, ovlaživanje i zagrijavanje zraka prije odlaska prema plućima [5]. Nosne školjke razdjeljuju prostor strujanja zraka unutar nosa omeđujući tri nosna hodnika, koji formiraju prolaze prema unutarnjim strukturama respiratornog sustava. Nosne hodnike možemo podijeliti na gornji (lat. *meatus superior*), srednji (lat. *meatus medius*) i donji (lat. *meatus inferior*) hodnik. Na području nosnih hodnika nalaze se i prolazi kojima su hodnici povezani s paranazalnim sinusima. Respiratorni dio nosne šupljine završava nosnim lijevcima (lat. *choanae*) u svojem stražnjem dijelu, kojima se nosna šupljina otvara prema ždrijelu. Ovaj je dio nosne šupljine (Slika 2.7) dobro prokrvljen, kako bi se omogućila intenzivnija izmjena topline i zagrijavanje zraka, prolaskom kroz nosne hodnike.

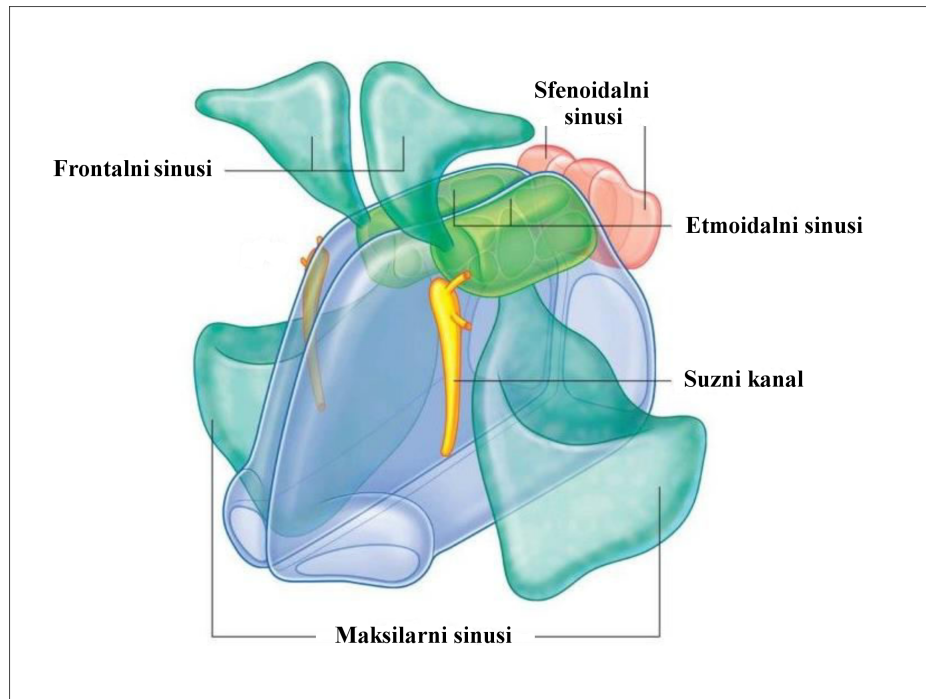


Slika 2.7: Šupljine unutar nosa.

2.1.3. Paranasalni sinusi

Unutrašnjost nosa tj. nosna šupljina, okružena je velikom količinom pomoćnog tkiva, koje se ne nalazi unutar nosne šupljine, te koje nije izravno povezano s funkcijom disanja pomoću nosne šupljine. Među njima se nalaze i paranasalni sinusi. Općenito govoreći, riječ sinus koristi se za šupljinu smještenu unutar kosti, ispunjenu zrakom [5]. Nosna šupljina je okružena prstenastom strukturom paranasalnih sinusa, koja je s nosnom šupljinom povezana prolazima, koji se vežu na nosne hodnike. Paranasalni sinusi su parni, zrakom ispunjeni volumeni, čija funkcija nije u potpunosti jasna. Pretpostavljena, primarna funkcija sinusa je olakšavanje lubanje, zamjenjujući koštano tkivo šupljinama ispunjenim zrakom. Pretpostavlja se da sudjeluju u regulaciji tlaka unutar nosne šupljine, te potpomažu ostatku nosne šupljine u regulaciji vlažnosti i temperature zraka. Osim toga, sinusi sudjeluju u produkciji sluzi koja se otvorima slijeva u prostor nosne šupljine, a služe i kao svojevrsne rezonantne kutije u procesu formiranja glasa [8].

Paranasalne sinuse možemo podijeliti na niz manjih cjelina prema obliku, smještaju i funkciji. U gornjoj čeljusti možemo pronaći maksilarne sinuse (lat. *sinus maxillares*), u području čeone kosti nalazimo frontalne sinuse (lat. *sinus frontales*), u području klinaste (sfenoidne) kosti sfenoidalni sinus (lat. *sinus sphenoidales*), te na području labirinta rešetnice (etmoidni labirint) nalazimo etmoidalne sinuse (lat. *sinus ethmoidales*) (Slika 2.8).



Slika 2.8: Paranasalni sinusi.

Maksilarni se sinusi pružaju lateralno, u paru, s obje strane nosne šupljine. Najveći su među paranasalnim sinusima, te zauzimaju velik dio područja gornje čeljusti. Iako se mogu znatno razlikovati oblikom i veličinom, može se reći da im prosječni volumen iznosi između 12 cm^3 i 15 cm^3 . Maksilarni sinusi se vežu na nosnu šupljinu pomoću polujesečnog otvora smještenog u srednjem nosnom hodniku (lat. *hiatus semilunaris*).

Etmoidalni sinusi građom se znatno razlikuju u odnosu na ostale sinuse [5]. Naime, oni nisu građeni kao jedinstveni skup tkiva, već se sastoje od niza malih, međusobno povezanih, odjeljaka. Ti odjeljci, ili celule (lat. *cellulae ethmoidales*), brojčano variraju i može ih se pronaći između 7 do 15 [6], a volumenom se kreću od $0,73\text{ cm}^3$ do $9,32\text{ cm}^3$. Anatomski se etmoidalni sinusi mogu podijeliti na prednje, srednje i stražnje celule. Prednje celule (lat. *cellulae ethmoidales anteriores*) se ljevkastim kanalom (lat. *infundibulum ethmoidale*) povezuju na srednji nosni hodnik, srednje celule (lat. *cellulae ethmoidales mediae*) povezane su izravno na srednji nosni hodnik, a stražnje se celule (lat. *cellulae ethmoidales posteriores*) otvaraju u gornji hodnik nosne šupljine.

Frontalni sinusi pojavljuju se parno, unutar čeone kosti. Pokazuju široku varijaciju oblika i veličina. Najčešći oblik frontalnih sinusa je svojevrsni oblik mitre, a drugi najčešći je piramidalni oblik [6]. Mogu se pojaviti i u obliku lista ili zrna. Volumenom sežu od $0,05\text{ cm}^3$ do $7,78\text{ cm}^3$. Septum odvaja par frontalnih sinusa na lijevu i desnu polutku, a svaka od njih se prema dnu postupno sužava tvoreći lijevak (lat. *infundibulum ethmoidale*) preko kojeg se, kao i prednje celule etmoidalnih sinusa, otvara u srednji nosni hodnik. Ovisno o građi, frontalni se sinusi mogu u srednji nosni hodnik otvarati samostalno ili s maksilarnim sinusom.

Sfenoidalni sinus predstavlja zrakom ispunjen volumen unutar sfenoidalne kosti [6], a nalazi se uz stražnju stranu nosne šupljine. Volumen sfenoidalnog sinusa podijeljen je perforiranom pregradom na dvije polutke, a ukupnog je volumena u rasponu od $0,27\text{ cm}^3$ do $11,31\text{ cm}^3$. Na lateralnom zidu sfenoidalnog sinusa nalazi se otvor približno 16 mm od dna sinusa, preko kojeg se otvara u gornji nosni hodnik (lat. *recessus sphenothmoidale*).

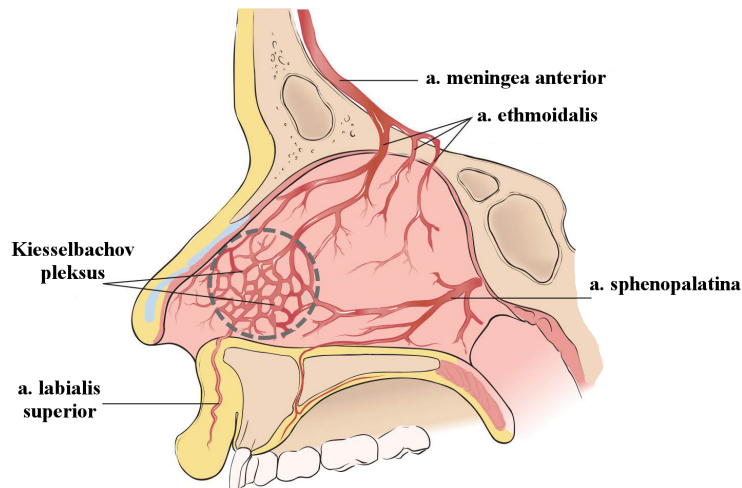
Osim paranazalnih sinusa, postoje i druge, za ovaj rad manje značajne strukture, koje se otvorima vežu na nosnu šupljinu. Među njima je značajniji suzni kanal. Nosni dio suznih kanala povezuje suzne kanale očiju s donjim hodnikom nosne šupljine. Funkcija suznog kanala je da omogućava protjecanje suza iz oka, preko nosne šupljine, prema probavnom traktu [7]. Bitno je spomenuti i auditorni kanal ili Eustahijevu cijev. Otvara se u ždrijelo, preciznije, u gornji dio ždrijela tj. nazofarinks. Otvor auditornog kanala u nazofarinks nalazi se približno u visini donjeg nosnog hodnika. Osnovna je funkcija auditornog kanala izjednačavanje unutarnjeg tlaka središnjeg uha s vanjskim, atmosferskim tlakom [3].

2.1.4. Vaskularizacija i inervacija nosne šupljine

Prema literaturi [7, 5] poznato je da se krvožilna opskrba (inervacija) vanjskog nosa odvija preko arterije *a. facialis* i njezinih ogranaka *a. dorsalis nasi* i *a. ophthalmica*, te preko *a. infraorbitalis*. Venska mreža prati arterijsku te se sastoji od *v. facialis*, koja je preko *v. angularis* povezana na *v. ophthalmica superior*. Unutarnjem dijelu nosa, nosnoj šupljini, krvožilna je opskrba osigurana preko pet velikih žila: *a. ethmoidalis anterior superior*, *a. sphenopalatina*, *a. palatini maior* i *a. labialis superior*. Sve spomenute ar-

terije, osim *a. ethmoidalis anterior*, međusobno tvore takozvani *Kiesselbachov* pleksus.

Najveći dio inervacije unutarnjeg dijela nosa, ostvaren je preko simpatičke i parasimpatičke inervacije *Vidijevog* živca. Simpatičke i parasimpatičke niti živaca protežu se od sluznice nosa do ždrijela i suznih žlijezdi. Inervacija zadužena za osjet na nosu sastoji se od trigeminalnog i maksilarnog živca, te je zadužena i za osjet na području lica. Trigeminalni živac je zadužen za osjete dodira, tlaka i temperature unutar nosa, dok je maksilarni živac zadužen za simpatičke i parasimpatičke funkcije. Tako je suženje krvnih žila nosne šupljine regulirano djelovanjem simpatičkog živčanog sustava, dok parasimpatički živčani sustav regulira izlučivanje suznih žlijezdi nosa i sluznice [5].



Slika 2.9: *Kiesselbachov* pleksus.

2.2. Fiziologija nosa

Fiziološke funkcije nosa kao dijela respiratornog trakta obuhvaćaju respiracijsku funkciju, termoregulacijsku funkciju, zaštitnu funkciju te olfaktornu funkciju.

2.2.1. Respiracijska funkcija i nosni ciklus

Za razliku od disanja kroz usta i usnu šupljinu, koje se nauči tek u kasnijem razdoblju, novorođenčad je rođena tako da diše na nos. Stoga govorimo da je disanje na nos fiziološki proces. Prilikom disanja struja zraka ulazi u nosnu šupljinu tvoreći strujanje

u obliku blago zavijenog luka ili parabole. Najveći protok zraka teoretski se ostvaruje prolaskom kroz srednju nosnu školjku. Regulacija protoka zraka ostvaruje se pomoću unutarnje nosne valvule, koju tvore rub triangularne hrskavice i odgovarajući dio septuma. Građa unutarnje nosne valvule omogućava da se medijalnom ili lateralnom deformacijom ponaša kao ventil i regulira protok zraka kroz nosnu šupljinu. S obzirom na položaj unutarnje valvule, najveća se brzina strujanja zraka pojavljuje upravo između donjeg i srednjeg nosnog hodnika.

Otpor strujanju zraka kroz nosnu šupljinu naziva se nosnim otporom te predstavlja ukupni otpor svih opstrukcija koje ometaju slobodan prolaz zraka, sve do ulaska u donji dio respiratornog sustava. Nosni otpor nije zanemariv i može činiti do 70% ukupnog otpora zraku u respiratornom traktu [6], a najveći doprinos nosnom otporu daje već spomenuti unutarnji nosni ventil. Funkcija nosnog otpora je usporiti strujanje zraka kroz nosnu šupljinu dovoljno dugo da se ostvari zadovoljavajuća filtracija, zagrijavanje i ovlaživanje zraka, prolaskom kroz odgovarajuća područja nosa.

Prema [6] nosni ciklus jest naziv koji opisuje periodičku pojavu izmjenične kongestije i dekongestije sluznica nosnih šupljina, s najvećom izraženosti na području nosnih školjki. Naizmjenice dolazi do zadebljanja sluznice jedne polovice nosne šupljine, čime se smanjuje protok zraka, dok druga polovica nema zadebljanja stijenke i time ima povećani protok zraka. Funkcija nosnog ciklusa je zaštita sluznice nosne šupljine od dugotrajne izloženosti struji zraka [6], a ritam odvijanja nosnog ciklusa može iznositi između 0,5 do 3 h, a najčešće iznosi 1,5 h [7].

2.2.2. Termoregulacijska funkcija

Termoregulacijska funkcija nosne šupljine bitna je kako bi se osigurao pravilan rad donjeg respiratornog trakta. Već najmanje promjene u pravilnom radu termoregulacijske funkcije mogu dovesti do problema s pravilnom respiracijom. Zrak prolaskom kroz nosnu šupljinu mora postići optimalnu temperaturu prije dolaska u ostatak trakta. Iako udahnuti zrak ima različite temperature, ovisno o tome gdje se nalazi unutar nosa, najveću temperaturu postiže prolaskom kroz područje nosnih školjki. Stoga možemo zaključiti da su upravo one zadužene za zagrijavanje zraka.

U slučaju da se udahne zrak temperature niže od optimalne, potrebno ga je zagrijati. Hladan zrak potiče vazodilataciju tj. širenje krvnih žila sluznice nosne šupljine, posebice na području nosnih školjki. Širenjem krvnih žila sluznice osigurava se veća kontaktna površina tkiva u kontaktu sa zrakom, te se poboljšava izmjena topline i zrak se zagrijava. Ovim procesom hladni udahnuti zrak može se zagrijati do 32°C u nosnoj šupljini, dok mu konačna temperatura u traheji iznosi 36°C. U slučaju da je udahnut topli zrak, proces se odvija suprotno. Dolazi do vazokonstrikcije tj. suženja krvnih žila sluznice, čime se smanjuje kontaktna površina tkiva sa zrakom i zagrijavanje udahnutog zraka.

Na sličnom principu na kojem djeluje termoregulacija zraka u nosnoj šupljini, djeluje i funkcija ovlaživanja udahnutog zraka. Ovisno o početnom stanju udahnutog zraka, jača ili slabija sekrecija sluzi iz sluznih žlijezdi nosne šupljine utječe na konačno stanje vlažnosti zraka. Vlažnost zraka na ulazu u epifarinks prosječno iznosi 75% [6].

2.2.3. Zaštitna funkcija i imunologija nosa

Zaštitna funkcija nosa svodi se na uklanjanje štetnih čestica iz udahnutog zraka, i ovisno o veličini čestica, odvija se u različitim područjima nosne šupljine. Krupne čestice zadržavaju se na dlačicama (lat. vibrissae) u vestibulumu nosa te se izbacuju kihanjem. Drugi bitan sustav, koji također ima zaštitnu funkciju, je mukocilijarni sustav. Sluznica koja se proteže po nosnoj šupljini slojevite je građe i sadrži trepetaljke (cilije) te seromukozne žlijezde. Seromukozne žlijezde izlučuju sluzavi sekret koji tvori stalni sloj preko sluznice, a sastoji se iz vanjskog gušćeg sloja i unutarnjeg rjeđeg sloja. Cilije se nalaze unutar rjeđeg sloja i svojim treperenjem pokreću gornji gušći sloj, dodirujući ga vršcima. Cilije imaju kratke i snaže pokrete, uvijek u istom smjeru, pomičući tako gornji gusti sloj prvo prema ušćima sinusa, a zatim u smjeru epifarinksa. Tako se sitnija prašina i nečistoće zadržavaju u gustom sloju sluzi te putuju mukocilijarnim transportom, brzinom od približno 4 mm u minuti [4], prema epifarinksu i ždrijelu. Gutanjem sluz prolazi u probavni trakt i želudac, gdje se razgrađuje.

Imunološka funkcija unutar nosne šupljine ostvaruje se korištenjem sluznice nosa kao prvog reda imunološke obrane ostatka unutrašnjosti nosne šupljine i donjih dišnih sustava.

Imunološka obrana djeluje primjenom niza specifičnih imunoglobulina koji se izlučuju u sluznici. Oni štite sluznicu od prodora različitih štetnih vrsta poput virusa i bakterija, čime se zaustavlja njihov ulazak u dublja tkiva. Intenzivna reakcija imunološkog sustava na bezopasne tvari ili pretjerana reakcija na niske koncentracije štetnih tvari, može dovesti do izraženih alergijskih reakcija sluznice nosa.

2.2.4. Olfaktorna funkcija nosa

Jedna od bitnih funkcija nosa je njegovo sudjelovanje u formiranju osjeta njuha. Regija zadužena za formiranje njuha naziva se olfaktornom regijom i nalazi se najvećim dijelom u sluznici gornjeg dijelu septuma i gornje nosne školjke [7]. Za pravilan rad olfaktornog centra potrebna je dobra prohodnost nosa. Zbog toga sva stanja koja dovode do opstrukcije slobodnog protoka zraka (formiranje polipa, devijacija septuma) onemogućuju ostvarivanje kontakta između mirisnih čestica unesenih udahnutim zrakom i olfaktornih receptora. Osim toga, za pravilan rad olfaktornih receptora i osiguravanje kontakta čestica i receptora, nužan je ispravan rad mukocilijarnog transporta koji dovodi čestice do olfaktorne regije [6].

2.2.5. Nazalni refleksi

Pokazano je [6, 8] da je temelj na kojem djeluju nazalni refleksi je brojna simpatička, parasimpatička, senzorna i motorna inervacija sluznice nosa. Brojni osjetnici vlažnosti, temperature, tlaka i brzine strujanja prenose informaciju neuralnim vezama inervacije do respiratornog centra i autonomnog živčanog sustava. Respiratorni centar zadužen je za upravljanje svim funkcija koje sudjeluju u procesu disanja i osigurava odvijanje disanja kao autonomnog automatskog procesa. Različita stanja udahnutog zraka i različiti oblici fizičkog napora uzrokovat će promjene u procesu disanja i različite protoke zraka. Osjetili temperaturni receptori u nosu da se udiše hladni zrak, prenose tu informaciju do respiratornog centra, koji smanjuje frekvenciju disanja, a u slučaju toplijeg zraka ubrzava disanje. S druge strane, povećani fizički napor dovodi do smanjenja otpora strujanju zraka kroz nosnu šupljinu i povećanog protoka zraka. U slučaju postojanja većih opstrukcija unutar nosa (začepljenost, devijacija septuma i sl.), protok zraka kroz nosnu šupljinu postaje nedovoljan i prelazi se u takozvani oronazalni oblik disanja. Nedostatak protoka zraka kroz nazalnu šupljinu nadomješta se dodatnim protokom ostvarenim kroz

usnu šupljinu. Oralno disanje, disanje kroz usnu šupljinu, može dovesti do problema s regulacijom disanja budući da kod takvog oblika disanja ne dolazi do podražaja receptora zaduženih za kontrolu protoka i kvalitete zraka. Receptori šalju krivu ili nepotpunu informaciju o kvaliteti udahnutog zraka respiratornom centru, a udahnuti zrak nije odgovarajuće pripremljen prije odlaska u donji respiratorni sustav, što može dovesti do nepravilnosti rada pluća. Stoga se u slučaju trajnih opstrukcija najčešće izvode operacije polipa nosa ili devijacije septuma, kako bi se olakšalo pravilno disanje i uspostavio normalni rad receptora nosne šupljine.

2.3. Oboljenja nosne šupljine

Poznat je i opisan [9] velik raspon oboljenja nosa i nosne šupljine, koja mogu dovesti do komplikacija i problema u odvijanju normalnih funkcija respiratornog sustava. Iako je popis oboljenja gornjeg dijela respiratornog trakta dug, za područje ovog rada je dovoljno detaljnije promotriti, već spomenutu, devijaciju septuma te polipe nosne šupljine, zbog njihovog značajnog utjecaja na strujanje zraka kroz nosnu šupljinu i relativno velike učestalosti.

Devijacija septuma je relativno česta pojava, koja može biti nasljedna ili može nastati kao posljedica neke veće traume hrskavice septuma nosa. Učestalost ove pojave je velika (3–30%), a deformacija septuma može biti jasno vidljiva ili se može manifestirati bez lako uočljivih vanjskih znakova. Rijetko se može naići na septum koji se u potpunosti nalazi u medijalnom položaju. Moguća je deformacija isključivo koštanog ili hrskavičnog dijela septuma, te zajednička deformacija i hrskavičnog i koštanog dijela [9]. Deformacije prednjeg dijela septuma najčešće su uzrokovane traumom, a deformacije nastale na stražnjem dijelu septuma najčešće su urođene. Osnovni problem koji izaziva devijacija septuma je pojava otežanog disanja tj. opstrukcije strujanju zraka kroz jedan, ili u slučaj uizražene deformacije septuma u obliku slova S, oba zračna prolaza nosne šupljine (Slika 2.10). Otežano disanje kroz jednu ili obje nosnice uzrokuje česte upale sinusa, poremećaj rada Eustahijeve cijevi, a može dovesti do čestih upala uha i upale gornjih i donjih respiratornih puteva. Postoji niz klasifikacija deformacija septuma, a prema Mladini [6], klasificiraju se u 7 osnovnih tipova. Teže se deformacije septuma moraju sanirati kirurški kako bi se omogućilo ispravno disanje.



Slika 2.10: Devijacija septuma.

Iz literature [9] je poznato da nosni polipi i strana tijela u nosnoj šupljini predstavljaju velike opstrukcije strujanju zraka, te znatno povećavaju nosni otpor i otežavaju disanje. Nosni polipi su peteljkaste izrasline, vrećice ispunjene sluznim iscjetkom, koje se najčešće pojavljuju na području sluznice srednjeg nosnog hodnika. Ako im se omogući dovoljno vremena za rast, moguće ih je vidjeti i na području nosne vestibule. Najčešći su im uzrok alergije i upale u nosnoj šupljini, a njihova pojava može biti vezana i uz niz drugih bolesti nosne šupljine. Pojava nosnih polipa, uzrokuje probleme s disanjem i otežava protok zraka, a može dovesti i do drugih komplikacija. Slične probleme kao i kod pojave nosnih polipa možemo pronaći i u slučaju pojave stranih tijela u nosnoj šupljini. Strana tijela u nosnoj šupljini se najčešće mogu naći kod male djece i osoba s mentalnim oboljenjima. Vrste predmeta pronađenih unutar nosne šupljine su razne, a osnovna je razlika u tome da predmeti anorganskog podrijetla mogu ostati unutar nosne šupljine i izazivati probleme s disanjem kroz dulji vremenski period, dok predmeti organskog podrijetla izazivaju brzu i intenzivnu reakciju vidljivu na okolnom tkivu.

Osim opisanih bolesti, postoje i druga oboljenja nosa, koje dovode do problema s normalnim radom respiratornog sustava. Različiti oblici tumora, cisti ili upala mogu dovesti do velikih problema u protoku zraka kroz nosnu šupljinu, dok povrede nastale mehaničkom povredom eksternog nosa, dovode i do opstrukcija pri samom ulasku zraka u nos.

2.4. Zaključak uvoda

Respiratorni sustav čovjeka nužan je za normalno odvijanje svih procesa u ljudskom organizmu i život čovjeka. Eksterni nos i nosna šupljina temeljni su dio tog sustava te formiraju prolaze kojima zrak odlazi u ostatak dišnog sustava. Poznavanje anatomije vanjskog nosa, nosne šupljine i okolnih tkiva bitno je prilikom izrade računalnog modela, a posebice u razlučivanju između tkiva koje je potrebno modelirati i obuhvatiti modelom, a koje predstavlja nepotrebno trošenje računalnih resursa. Isto tako, poznavanje osnovnih funkcija značajnih anatomskih cjelina koje tvore organe gornjeg respiratornog trakta, omogućava razumijevanje rezultata dobivenih računalnom simulacijom i razumijevanje značaja uočenih pojava.

Anatomija i fiziologija opsežno su istražene i opisane u detalje, ali je gotovo nemoguće pronaći podatke o tome kao izgleda strujanje koje se smatra zdravim ili patološkim strujanjem u nosu. Razlog tome je činjenica da je nemoguće na praktičan način dobiti sliku strujanja kod zdravog pacijenta u normalnom radu nosa primjenom postojećih eksperimentalnih metoda.

3 Model geometrije nosa

U prethodnom je poglavlju detaljno opisana anatomija i fiziologija nosa. Vidljivo je da je nos anatomski vrlo dobro opisan, dok je strujanje kroz nosnu šupljinu slabo istraženo. U ovom su radu korištene moderne CFD metode kako bi se ispitalo i vizualiziralo strujanje u nosu pacijenta.

Kako bi se uspješno mogla provesti numerička simulacija strujanja kroz zračne prolaze nosne šupljine, potrebno je postaviti ispravni računalni model unutrašnjosti nosa. Model mora dovoljno vjerno opisati sve značajne anatomske cjeline koje izgrađuju promatrani dio respiratornog trakta. Budući da želimo što točnije promatrati pojave u strujanju zraka kroz vanjski nos i unutrašnjost nosne šupljine, moramo obuhvatiti sve zračne puteve i otvore koji grade unutrašnju geometriju nosne šupljine. U prošlosti su Elad et al. [10] pokušali prikazati geometriju nosa jednostavnim trodimenzionalnim modelima, koji su obuhvaćali detaljnu anatomiju nosa, te su uspješno dobili sliku o općenitim zakonitostima strujanja u gornjem respiratornom traktu. Veliki napredak računalne tehnologije, uređaja za medicinsku dijagnostiku te raspoloživih programskih paketa za modeliranje i grafičku obradu, omogućili su izradu detaljnijih modela.

Kako je ideja izraditi univerzalno primjenjivu metodologiju koja se može koristiti za izradu modela dišnih puteva kod različitih pacijenata, bilo je potrebno uzeti u obzir varijabilnost anatomske građe. Upravo iz tog razloga nije moguće koristiti jedinstvenu geometriju za svaki pojedini slučaj, već je potrebna izrada modela unutrašnjosti nosa za svaki promatrani slučaj. S druge se strane željelo dobiti detaljan i vjerodostojan prikaz anatomije promatranog područja, kako bi se dobila slika, ne samo o općenitom izgledu

strujanja, već i o specifičnostima strujanja zraka prolaskom kroz anatomske zanimljiva područja.

Iako je građa ljudskog tijela, pa tako i respiratornog trakta, poznata već više stoljeća, tek je veliki tehnološki razvoj novije povijesti omogućio izradu detaljnih slika unutrašnjosti i građe ljudskog organizma. Napredak na području medicinske dijagnostike i uređaja koji se koriste u dijagnostičke svrhe, omogućio je da se danas u kratkom vremenskom razdoblju, relativno jeftino, može dobiti točna slika trenutnog stanja pojedinog dijela tijela. Takve dijagnostičke metode, preciznije digitalna radiologijska slikovna metoda, korištene su i u ovom radu za izradu slika koje su uzete kao osnova za izradu računalnog modela geometrije nosne šupljine.

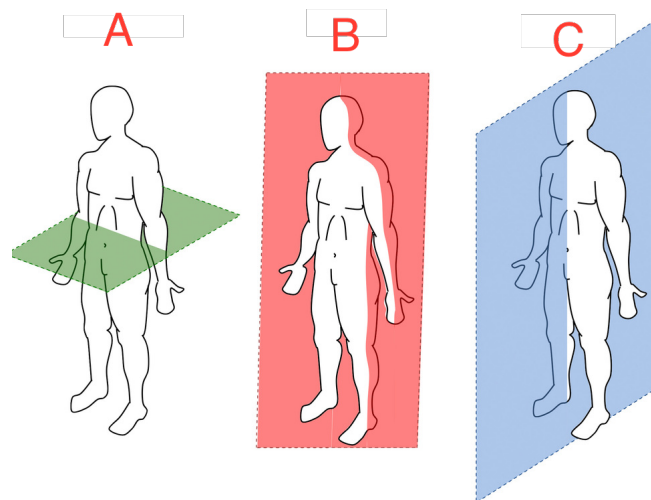
3.1. Računalna tomografija – CT

Računalna tomografija (eng. *Computed tomography – CT*) jedna je od više postojećih metoda izrade digitalnih radioloških slika [11]. Napredak tehnologije i računalne tehnike omogućio je napuštanje prethodno korištenih analognih metoda izrade radioloških slika, te velik napredak u širenju primjene digitalne radiologije. Postoji niz indirektnih i direktnih metoda digitalne radiologije, a svima je zajedničko korištenje određenog tipa elektroničkih receptora, kako bi se očitao zračenje koje nije apsorbirano prolaskom kroz organizam. Dobiveni se podaci obrađuju na računaru i nastaje slika unutrašnjosti snimljenog područja. Danas se koristi niz tehnologija digitalne radiologije od kojih su najčešće: ultrazvuk (*UZV*), računalna tomografija (*CT*), višeslojna računalna tomografija (eng. *Multi-slice CT -MSCT*), računalna aksijalna tomografija (eng. *Computed axial tomography - CAT*), magnetska rezonancija (eng. *Magnetic resonance imaging - MRI*) i sl.

Prilikom izrade modela geometrije u ovom radu, za radiološke slike korištena je računalna tomografija. Korišteni CT uređaj koristi rendgenske zrake koje tvore rotirajući snop. Takvim se rotirajućim snopom rendgenskih zraka prelazi preko područja koje je od interesa i njime se ozračuje. Posebni kristalni ili plinski detektori prate apsorpciju zraka u tkivu. Bilježi se koeficijent apsorpcije zračenja u malim volumenima tkiva koji se nazivaju vokseli (eng. *Volumetric pixel - voxel*). Detektori bilježe koeficijente apsorpcije

cije u obliku električnih impulsa, a uzorak pojavljivanja električnih impulsa računalo se obrađuje. Skalarni vrijednosti koeficijenta apsorpcije rendgenskih zraka pojedine površine tijela prikazuju se dvodimenzionalno pomoću točaka ili piksela (eng. *pixel*). Računalo stvara sliku pomoću piksela temeljenu na sivo-bijeloj skali koja predstavlja različite vrijednosti koeficijenta apsorpcije. Svaka točka slike (piksel) druge je nijanse na sivo-bijeloj skali, pri čemu nijansa sive predstavlja svjetlinu točke i mjerena je *Hounsfieldovim jedinicama* (HU) [12]. Raspon svjetline točaka, koji se koristi u izradi CT slika, seže od -1000 HU do $+1000$ HU, gdje vrijednost -1000 HU predstavlja svjetlinu prikaza gustoće zraka, $+1000$ HU predstavlja gustoću ljudske kosti, a 0 HU gustoću vode [12]. Sukladno tim vrijednostima i rasponu između njih, moguće je dobiti sliku na kojoj je jasno vidljiva razlika između pojedinih tkiva, ovisno o udjelu zraka, vode i drugih tvari.

Snimanje CT uređajem provodi se u tri ravnine tj. tri projekcije: frontalnoj, transverzalnoj i sagitalnoj (Slika 3.1). Proces izrade slika ponavlja se više puta u svakoj ravnini, kako bi se dobio dubinski prikaz kroz presjek tkiva. Obrada slika u te tri projekcije olakšava diferencijalnu dijagnostiku te omogućava izradu patološkog procesa. Izradom većeg broja snimaka u svakoj od tri ravnine, za različite presjeke tkiva, moguće je dobiti trodimenzionalnu sliku snimljenog dijela tijela. Trodimenzionalni se prikaz dobiva superpozicijom piksela dvodimenzionalnih slika svih presjeka u tri projekcije [12], čime nastaju vokseli smješteni u prostoru, tvoreći trodimenzionalnu sliku volumena.



Slika 3.1: Transverzalna (A), frontalna (B) i sagitalna ravnina (C).

3.2. Izrada računalne geometrije modela

Početni korak u procesu izrade geometrije modela, koja će se u kasnijim koracima koristiti za izradu proračunske mreže, bio je osigurati snimke nastale CT uređajem za određenog pacijenta s postojećom dijagnozom nepravilnosti disanja, kako bi se vidjelo može li se iz dostupnih CT snimaka izraditi model zadovoljavajuće rezolucije, koji obuhvaća sve anatomske zanimljivosti geometrije. U suradnji s Kliničkim bolničkim centrom „Sestre Milosrdnice” u Zagrebu, napravljeno je radiološko snimanje glave pacijenta s postojećom dijagnozom problema s pravilnim disanjem na području gornjih dišnih puteva. Korištenjem tehnike višeslojne računalne tomografije (MSCT), uspješno je izrađen niz slika različitih presjeka na području glave pacijenta, a dobiveni su rezultati pohranjeni u odgovarajućem digitalnom formatu.

Konačnu geometriju, korištenu kao temelj za izradu proračunske mreže, nije moguće dobiti izravno iz nalaza dobivenih pregledom CT uređajem. Geometrija je dobivena tek nakon obrade u više različitih programskih paketa. U nastavku slijedi kratki pregled korištenih paketa, njihova funkcija i postupak primjene, dok je detaljan postupak izrade modela priložen radu (Prilog A.). Sve korištene programske pakete moguće je legalno i besplatno pronaći na internetu te ih je moguće koristiti na prosječnom računalu uz najčešće operativne sustave.

Postupak izrade odvija se u četiri osnovna koraka:

1. Izrada geometrije nosne šupljine u paketu *3DSlicer*
2. Obrada dobivenog modela u paketu *Blender*
3. Obrada modela u paketu *MeshLab*
4. Obrada rubnih ploha i povezivanje u jedinstvenu geometriju

Nizom postupaka u različitim programskim paketima, iz CT slike dobivene klasičnim pregledom korištenim u medicinskoj dijagnostici, izrađen je trodimenzionalni model geometrije stijenke nosne šupljine, sa svim rubnim plohama potrebnim za pokretanje numeričke simulacije. Sljedeći je korak izrada proračunske mreže na temelju dobivenog modela.

4 | Numerička simulacija

4.1. Matematički i numerički model strujanja

U ovom poglavlju u prvom su dijelu predstavljene jednačbe matematičkog modela strujanja zraka u nosnoj šupljini. Budući da su u radu korišteni novi algoritmi razvijani na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, opisana je implicitna sprega varijabli brzine i tlaka te su dani osnovni podaci o numeričkom modelu.

Strujanje u nosnoj šupljini je tranzijentno, turbulentno, nestlačivo i jednofazno te je opisano jednačbom kontinuiteta (u nastavku *jednačba tlaka*):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4.1)$$

i Navier–Stokesovim jednačbama (u nastavku *jednačba brzine*):

$$\underbrace{\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}}_{\text{lokalna promjena}} + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u})}_{\text{konvekcija}} - \underbrace{\nabla \cdot (\nu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u})}_{\text{difuzija}} = - \underbrace{\nabla \frac{p}{\rho}}_{\text{gradijent tlaka}}. \quad (4.2)$$

Budući da je strujanje nestlačivo, jednačbe 4.1 i 4.2 podijeljene su s konstantnom vrijednosti gustoće ρ . ν_{eff} je efektivna kinematička viskoznost:

$$\nu_{\text{eff}} = \nu_{\text{laminar}} + \nu_{\text{turbulent}}$$

Vrijednost turbulentne kinematičke viskoznosti $\nu_{\text{turbulent}}$ računa se pomoću modela turbulencije. U ovom je radu korišten k - ω -SST model turbulencije [13] s implicitno spregnutim varijablama turbulentne kinetičke energije k i specifične disipacije energije ω , čija je implementacija i validacija opisana u [14].

Nakon linearizacije konveksijskog člana (vrijednost konvektivne brzine uzima se iz prethodne iteracije), sustav jednadžbi 4.1 i 4.2 može se napisati u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} [A_{\mathbf{u}}] & [\nabla(\cdot)] \\ [\nabla\cdot(\cdot)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Uglate zagrade koriste se kao oznaka diskretnog operatora, tj. elementa blok–matrice (iako zapis vrijedi i za diferencijalne operatore). Prvi red blok–matrice odgovara jednadžbi brzine, a drugi red jednadžbi tlaka: $[A_{\mathbf{u}}]$ je matrica vremenskog, konveksijskog i difuzijskog člana, $[\nabla(\cdot)]$ je matrica gradijenta, $[\nabla\cdot(\cdot)]$ je matrica divergencije. Riječ je o problemu sa sedlastom točkom, budući da se na dijagonali blok–matrice nalazi nul–operator.

Kako bi se sustav mogao rješavati klasičnim numeričkim metodama, koristi se Schurov komplement, što je detaljno prikazano u [15], a konačno dobiveni sustav je:

$$\begin{bmatrix} [A_{\mathbf{u}}] & [\nabla(\cdot)] \\ [\nabla\cdot(\cdot)] & [\nabla\cdot(D_{\mathbf{u}}^{-1}\nabla(\cdot))] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \nabla\cdot(D_{\mathbf{u}}^{-1}\nabla(p^o)) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

Na mjestu nul–operatora stoji Laplaceov operator u kojemu je koeficijent difuzije $D_{\mathbf{u}}^{-1}$ jednak inverzu dijagonalnog elementa bloka $[A_{\mathbf{u}}]$. Na desnoj strani sustava nalazi se korekcija Rhie–Chow [16], $\nabla\cdot(D_{\mathbf{u}}^{-1}\nabla(p^o))$, gdje je p^o vrijednost tlaka iz prethodne iteracije, a $\nabla\cdot$ označava interpolaciju gradijenta iz središta na stranicu kontrolnog volumena.

Od 80.-tih godina 20. stoljeća, u upotrebi su SIMPLE [17] i PISO [18] algoritmi koji se temelje na eksplicitnoj sprezi varijabli tlaka i brzine. Eksplicitna sprega podrazumijeva da se jednadžbe numerički rješavaju jedna po jedna, a vrijednosti ostalih ovisnih varijabli uzimaju se iz prethodne iteracije. Primjerice, u SIMPLE algoritmu prvo se rješava diskretizirna jednadžba brzine sa zadanim ili prethodno izračunatim vrijednostima polja tlaka, a zatim se na temelju izračunatog polja brzine rješava jednadžba tlaka. Ovakav način rješavanja bio je osobito pogodan za tadašnja računala koja su raspolagala relativno malenom količinom radne memorije. No, budući da je iz sustava eliminirana

izravna sprega brzine i tlaka, zbog stabilnosti je potrebna podrelaksacija varijable tlaka i jednadžbe brzine, što u konačnici usporava konvergenciju rješenja.

Moderna računala omogućavaju rješavanje mnogo većih linearnih sustava pa se u posljednjih desetak godina razvijaju algoritmi s implicitnom spregom varijabli. Sustav 4.4 može se riješiti u obliku blok–matrice, za što je potrebno uvesti implicitne operatore gradijenta i divergencije. Implicitnom diskretizacijom jednadžbi dobiva se blok–matrica koja se sastoji od blok–elemenata, u kojima je zapisana sprega varijabli brzine i tlaka za odgovarajuću točku prostora (središte ili stranicu kontrolnog volumena). Povezanost točaka u prostoru opisana je popunjenošću i strukturom blok–matrice:

$$\begin{pmatrix} [a_{1,1}] & [a_{1,2}] & \cdots & [a_{1,N}] \\ [a_{2,1}] & [a_{2,2}] & \cdots & [a_{2,N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [a_{N,1}] & [a_{N,2}] & \cdots & [a_{N,N}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [\phi_1] \\ [\phi_2] \\ \vdots \\ [\phi_N] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [b_1] \\ [b_2] \\ \vdots \\ [b_N] \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Svaki blok–element $a_{i,j}$ je oblika:

$$a_{i,j} = \left(\begin{array}{ccc|c} a_{u_{xi},u_{xj}} & a_{u_{xi},u_{yj}} & a_{u_{xi},u_{zj}} & a_{u_{xi},p_j} \\ a_{u_{yi},u_{xj}} & a_{u_{yi},u_{yj}} & a_{u_{yi},u_{zj}} & a_{u_{yi},p_j} \\ a_{u_{zi},u_{xj}} & a_{u_{zi},u_{yj}} & a_{u_{zi},u_{zj}} & a_{u_{zi},p_j} \\ \hline a_{p_i,u_{xj}} & a_{p_i,u_{yj}} & a_{p_i,u_{zj}} & a_{p_i,p_j} \end{array} \right). \quad (4.6)$$

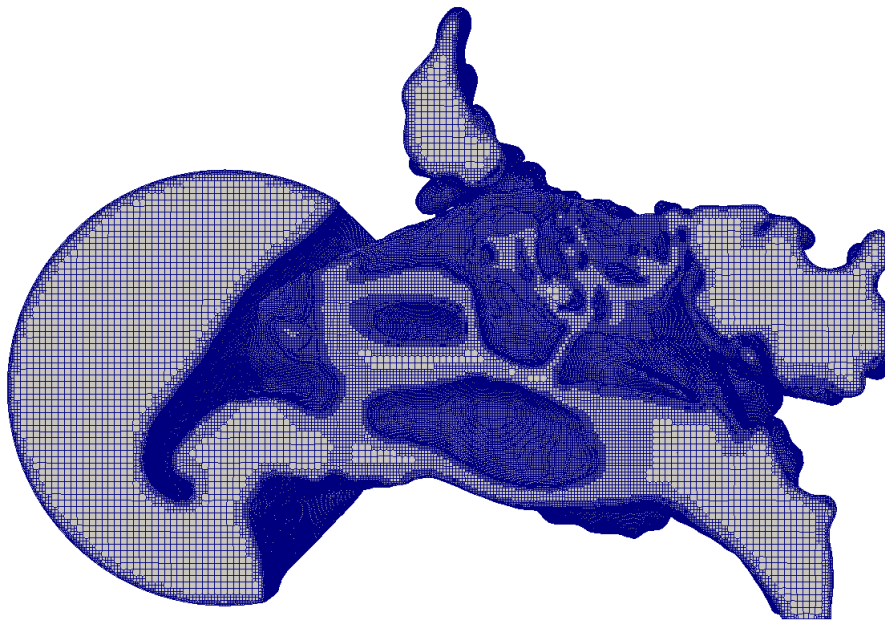
Gornja lijeva četvrtina blok–elementa odgovara diskretnim operatorima vremenskog člana, konvekcije i difuzije u momentnoj jednadžbi, gornja desna četvrtina predstavlja implicitnu diskretizaciju gradijenta tlaka u momentnoj jednadžbi. Donja lijeva četvrtina je diskretni operator divergencije polja brzine, a donji desni član odgovara Laplaceovom operatoru na polju tlaka.

Implicitna sprega varijabli brzine i tlaka te rješavanje sustava u jedinstvenoj matrici je numerički i računalno zahtjevnije u usporedbi s konvencionalnim SIMPLE i PISO algoritimima, ali je konvergencija rješenja brža i stabilnija, osobito na većim, nestrukturiranim proračunskim mrežama, kakva je korištena i pri izradi ovog rada, [19].

4.2. Izrada proračunske mreže

Za numeričku simulaciju strujanja zraka kroz model nosne šupljine, potrebno je provesti prostornu diskretizaciju modela, izradom proračunske mreže kontrolnih volumena. Za izradu proračunske mreže korišten je programski paket `cfMesh`. `cfMesh` [20] je sastavljena od niza algoritama koji funkcioniraju u sklopu programskog okruženja `OpenFOAM` te pruža velik broj automatiziranih postupaka izrade proračunske mreže na temelju modela u STL formatu i drugim zapisima.

Odabran je algoritam koji generira mrežu s dominantno heksaedarskim kontrolnim volumenima. Zadana je maksimalna veličina kontrolnih volumena od 1 mm, uz lokalno poboljšanje rezolucije mreže na veličinu kontrolnih volumena od 0,3 mm uz stijenku nosne šupljine i sferu na ulazu. Dobivena je mreža nestrukturiranog tipa, pretežno građena od heksaedarskih kontrolnih volumena, ali s piramidalnim i poliedarskim kontrolnim volumenima u prijelaznim zonama između kontrolnih volumena različitih veličina (Slika 4.1).



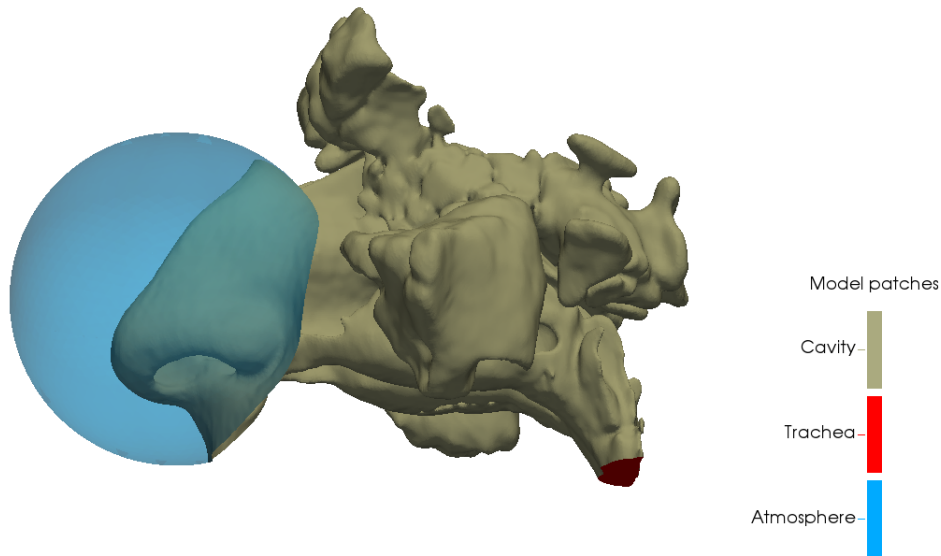
Slika 4.1: Presjek proračunske mreže.

Tablica 4.1: Detaljni podaci o proračunskoj mreži.

OBLIK KONTROLNIH VOLUMENA	BROJ KONTROLNIH VOLUMENA
heksaedar	4 094 792
prizma	1 418
piramida	2 753
tetraedar	1 418
poliedar	307 190
klin	0
UKUPNO	4 407 571
UKUPNI BROJ TOČAKA	5 768 178
UKUPNI BROJ PLOHA	14 589 336
BROJ UNUTARNJIH PLOHA	13 029 277

Konačna mreža (tablica 4.1) zadovoljava kriterije koje je potrebno zadovoljiti prilikom ispitivanja kvalitete mreže: uvjete ortogonalnosti, uniformnosti i omjera veličina kontrolnih volumena. Generirana mreža je izgrađena od 4 407 571 kontrolnih volumena, i omeđena je s tri glavne rubne plohe (*patch-a*) (Slika 4.2):

1. *cavity* – unutrašnja stijenska nosne šupljine
2. *sphere* – sfera koja obuhvaća zrak atmosferskog stanja i okružuje nosnu šupljinu
3. *trachea* – naziv plohe kojom završava ždrijelo i kojom zrak prolazi prema *trachei*



Slika 4.2: Rubne plohe modela.

Kako bi se osigurala stabilnost i točnost simulacije, domena je proširena korištenjem sfere kao ulazne rubne plohe. Teško je pretpostaviti oblik strujanja koji bi se pojavio prolaskom kroz nosnice na ulazu u nosnu šupljinu. Iz tog razloga nosnice nisu korištene kao ulazne rubne plohe, već je postavljena sfera koja okružuje nosnice i predstavlja dio atmosfere ispred nosa.

4.3. Rubni i početni uvjeti

Za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi matematičkog modela potrebno je postaviti rubne (početne) uvjete na rubne plohe (*patcheve*) proračunske mreže. Tablica 4.2 daje pregled korištenih rubnih uvjeta:

Tablica 4.2: Rubni uvjeti na pojedinoj plohi.

RUBNE PLOHE	p	U	k	ω
cavity	<i>Neumannov r.u.</i> $\nabla p = 0$	<i>Dirichletov r.u.</i> $ U = 0$	<i>Zidna funkcija</i> za izračun k	<i>Zidna funkcija</i> za izračun ω
sphere	<i>Dirichletov r.u.</i> $p = 1 \text{ bar}$	<i>Neumannov r.u.</i> $\nabla U = 0$	<i>Robinov r.u.</i> uz referetnu vrijednost k	<i>Robinov r.u.</i> uz referetnu vrijednost ω
trachea	<i>Neumannov r.u.</i> $\nabla p = 0$	<i>Dirichletov r.u.</i> – vremenski promjenjiva vrijednost	<i>Robinov r.u.</i> uz referetnu vrijednost k	<i>Robinov r.u.</i> uz referetnu vrijednost ω

Početni uvjet tlaka na nepropusnoj stijenci nosne šupljine (*cavity*) i na izlaznoj rubnoj plohi (*trachea*) postavljen je s nulom vrijednosti gradijenta tlaka, dok je na sfernoj plohi (*sphere*), koja predstavlja okolišni zrak koji okružuje nos, zadana fiksna vrijednost totalnog tlaka tj. atmosferski tlak zraka.

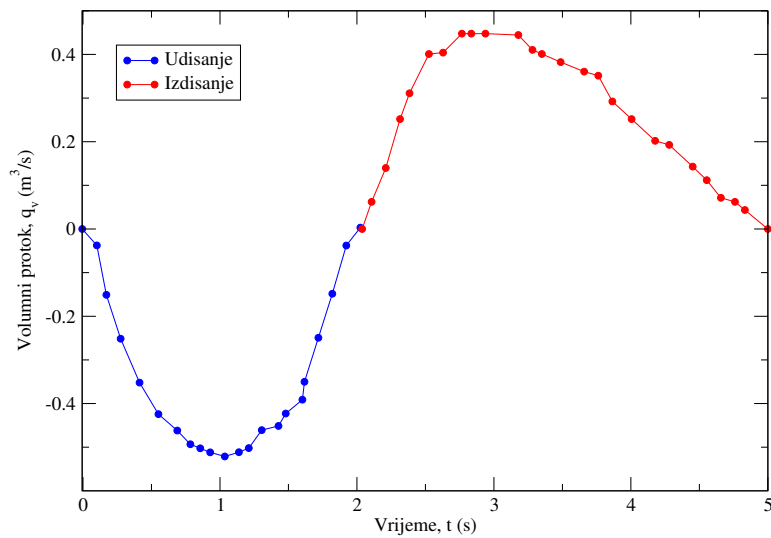
Početni uvjet za brzinu U , na nepomičnoj plohi stijenske nosne šupljine (*cavity*), zadaje se fiksnom vrijednošću 0, a na sferi oko nosa zadaje nultu vrijednost gradijenta brzine. Rubni uvjet postavljen za brzinu U na izlaznoj plohi (*trachea*) je vrijednost brzine u ovisnosti o vremenskom intervalu. Takav se, vremenski promjenjiv, rubni uvjet koristi zbog toga što se provodi vremenski promjenjiva (tranzijentna) simulacija strujanja zraka kroz nosnu šupljinu. Vrijednost brzine za neki vremenski trenutak simulacije interpolira se iz seta podataka koji prikazuju vremensku promjenu brzine strujanja zraka kroz poprečni presjek izlazne plohe (*trachea*) modela nosne šupljine. Set podataka koji govori o brzini strujanja zraka kroz izlaznu plohu dobiven je iz dijagrama koji prikazuje volumni protok kroz nosnu šupljinu u ovisnosti o vremenu za tri slučaja:

1. Prosječni udisaj u trajanju od 2 sekunde.
2. Prosječni izdisaj u trajanju od 3 sekunde.
3. Kratki udisaj u trajanju od 0.5 sekundi.

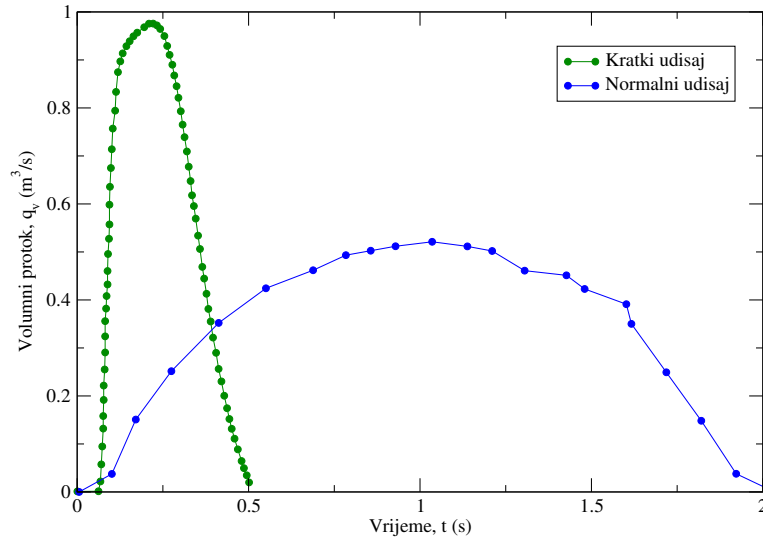
Podaci za prosječni udisaj i izdisaj dobiveni su iz istraživanja koje su šezdesetih godina proveli autori Fenn i Rahn [21], za ciklus udisaja i izdisaja kroz nosnu šupljinu u

trajanju od 5 sekundi [22], a kasnije su potvrđeni eksperimentalno na modelu [23]. Iz dijagrama prikazanog na slici 4.3, koja prikazuje volumni protok u ovisnosti o vremenu, uz poznavanje površine izlazne plohe, dobivena je vrijednost brzine strujanja zraka kroz izlaznu plohu za različite vremenske intervale.

Na sličan su način dobiveni podaci za vrijednost brzina kroz izlaznu plohu modela prilikom kratkog intenzivnog udisaja. Podaci o volumnom protoku preuzeti su iz istraživanja protoka zraka prilikom udisaja kroz dušnik u ovisnosti o vremenu [24]. Vrijednosti brzina kroz izlaznu plohu dobivene su na isti način kao i za prethodna dva slučaja, te su prikazane na slici 4.4.



Slika 4.3: Ciklus udisaja i izdisaja.



Slika 4.4: Kratki i normalni udisaj.

Preostali rubni uvjeti, koje je potrebno definirati za rubne plohe, su uvjeti za kinetičku energiju turbulencije k i brzinu specifične disipacije energije ω . Ove se dvije varijable koriste u modelu turbulencije $k-\omega$ SST (eng. *k-Omega Shear Stress Transport*), koji je odabran jer objedinjuje svojstva $k-\varepsilon$ modela [25] u slobodnoj struji i $k-\omega$ modela [26] uz zidne plohe. Varijable k i ω opisane su sličnim rubnim uvjetima. Uz stijenk u nosne šupljine (*cavity*) opisane su zidnom funkcijom za izračun k ili ω , a na ulaznim (*sphere*) i izlaznim (*trachea*) rubnim ploham a su opisane Robinovim mješovitim rubnim uvjetom, uz referentne vrijednosti k i ω , izračunate prema izrazima 4.7 i 4.8. Potrebno je poznavati, ili pretpostaviti referentnu brzinu strujanja fluida U , intenzitet turbulencije I , za kojeg je uzeta vrijednost 5%, omjer turbulentne i laminarne viskoznosti β te kinematičku viskoznost ν .

$$k = \frac{3}{2}(U \cdot I)^2 \quad [\text{m}^2/\text{s}^2] \quad (4.7)$$

$$\omega = \frac{0.09 \cdot k}{\nu \cdot \beta} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (4.8)$$

Nakon što je uspješno generirana proračunska mreža, provedena diskretizacija u jednadžbi te su postavljeni svi potrebni početni i rubni uvjeti, provodi se simulacija tranzijentnog strujanja zraka kroz nosnu šupljinu, a prikaz rezultata za sve simulirane slučajeve strujanja, izložen je u sljedećem poglavlju. Detaljni podaci o postavkama simulacije i korištenim računalima dani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3: Podaci o simulaciji i korištenim računalima.

SIMULACIJA	normalni udisaj	kratki udisaj	izdisaj
vremenski korak	0,001 s	0,001 s	0,001 s
simulirani interval	2 s	0,5 s	3 s
trajanje simulacije	342 975 s	55 078 s	266 866 s
interni naziv računala	son	thomas	simon
procesor	Intel(R) Core(TM) i5-4570	Intel(R) Core(TM) i7-4820K	Intel(R) Core(TM) i7-7800X
radni takt	3,20 GHz	3,70 GHz	3,50 GHz
broj jezgri	4	4	6
radna memorija	32 GB	64 GB	112 GB

5 Rezultati

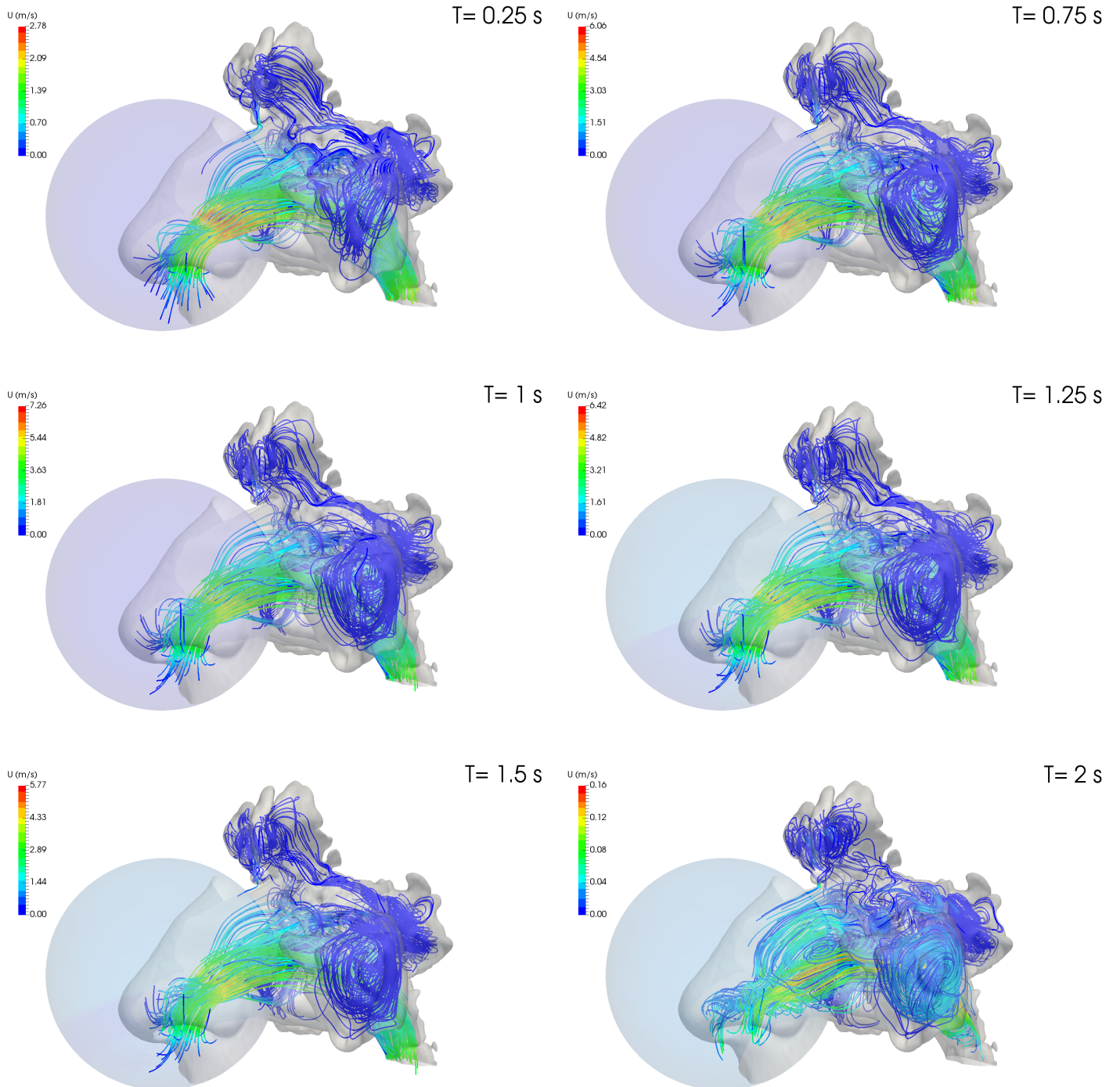
Za sva tri prethodno objašnjena oblika strujanja zraka provedena je CFD simulacija kroz jednaku geometriju, uz odgovarajuće rubne uvjete. Provedena je simulacija tranzijentnog nestlačivog strujanja za koju parametri strujanja ovise o opterećenju dišnog sustava. Zbog tog su razloga ispitana i opisana tri različita tipa disanja te su objašnjene varijacije vidljive u strujanju.

Rezultati su prikazani u dvije cjeline. U prvoj cjelini prikazane su općenitosti i izgled strujanja za svaki od triju slučajeva, kroz više vremenskih koraka simulacije procesa udisanja i izdisanja. U drugoj cjelini prikazani su i analizirani rezultati onog vremenskog koraka simulacije u kojem su se pojavile maksimalne vrijednosti brzine i protoka zraka.

5.1. Simulacija procesa udisanja

Provedena je simulacija strujanja zraka pri uobičajenom procesu disanja kroz nosnu šupljinu. Simuliran je udisaj u trajanju od 2 sekunde, prema protoku zraka mjerenom kroz područje ždrijela, za krivulju udisanja prosječnog čovjeka. Rezultati simulacije prikazani su za šest vremenskih koraka koji se smatraju dovoljno točnim odrazom cjelovitog strujanja. Izgled strujanja zraka kroz nosnu šupljinu za slučaj normalnog udisaja prikazan je strujnicama na slici (Slika 5.1).

Analizom rezultata simulacije prve četvrtine ciklusa udisaja ($T = 0,5$ s), možemo vidjeti kako izgleda strujanje nekoliko trenutaka nakon početka udisaja. Uspostavlja se



Slika 5.1: Strujnice pri normalnom udisaju.

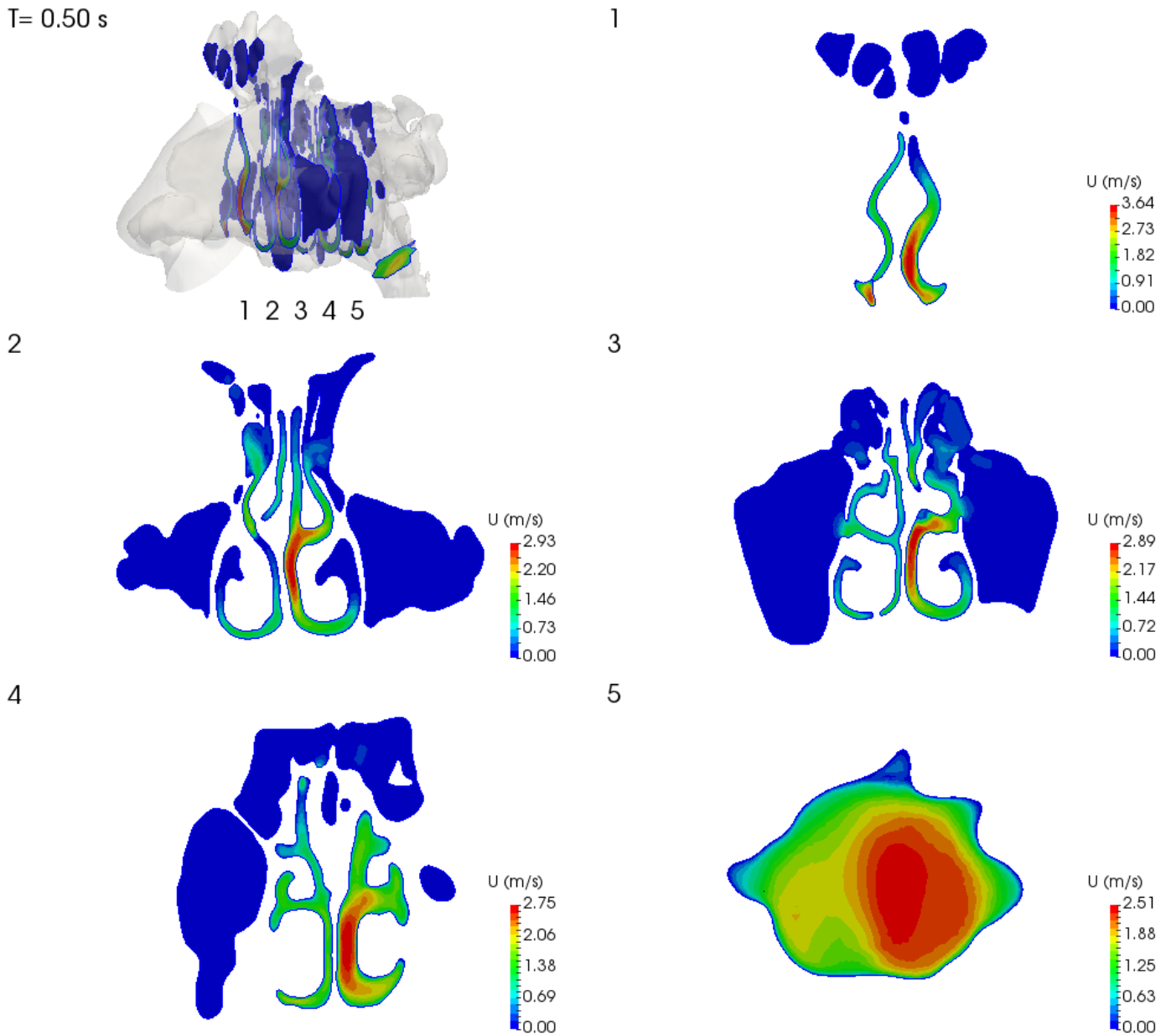
strujanje kroz početni dio nosne šupljine, strujnice se zgušnjavaju te se strujanje ubrzava prolaskom kroz područje nosnog ventila, gdje se ujedno postiže i najveća brzina strujanja kroz nos, u iznosu od približno 2,8 m/s. Strujanje se usporava ulaskom u šire područje nosnih hodnika (*lat. meatus*) nosnih školjki (*lat. conchae nasales*), dok se dodatni pad brzine može vidjeti izlaskom strujanja iz područja nosnih hodnika i ulaskom u ždrijelo. Strujanje kroz prostor paranazalnih sinusa ne pokazuje velike brzine strujanja. Kako simulacija napreduje prema sredini ciklusa udisanja ($T = 1$ s), možemo primijetiti ubrzavanje strujanja sukladno povećanju protoka. Maksimalna se brzina, u iznosu od 7,3 m/s, pojavljuje na području najvećeg otpora strujanju tj. prolaskom kroz najmanji poprečni presjek, a to je već spomenuto područje nosnih ventila. Prosječna je brzina strujanja, po izlasku iz područja vanjskog nosa te ulaska u područje nosnih hodnika, približno 3,6 m/s, dok se postupno smanjuje kako se strujanje proteže u područje širenja nosnih hodnika u nosne lijevke. Prilično konstantna brzina strujanja kroz nosne hodnike smanjuje se odlaskom zraka u periferna područja paranazalnih sinusa. Daljnjim odvijanjem simulacije prema kraju ciklusa udisaja ($T = 2$ s), dolazi do vidljivog pada brzine strujanja kroz sva spomenuta područja geometrije. Trend većih brzina strujanja na izlazu iz nosnica prema nosnim ventilima te manjih brzina na prijelazima iz lijevaka nosnih hodnika u ždrijelo i sinuse, zadržava se do kraja ciklusa. Potrebno je primijetiti da se u kasnijim trenucima, jednostavnije razaznaje red veličine brzine strujanja unutar maksilarnih sinusa, gdje vidimo brzine strujanja koje ne prelaze 0,04 m/s, a najveće se brzine od 0,16 m/s mogu vidjeti u središnjem dijelu nosne šupljine uz septum nosa.

Kako bi se detaljnije ukazalo na utjecaj geometrije nosne šupljine na raspodjelu brzine kroz nosnu šupljinu, napravljeno je nekoliko relevantnih presjeka geometrije nosa. Prikazano je pet različitih presjeka nosne šupljine i okolnog tkiva, za nekoliko vremenskih koraka simulacije prema slikama 5.2, 5.3, 5.4, 5.5.

Prikazani su presjeci strujanja za četiri vremenska intervala ciklusa udisanja kroz nosnu šupljinu, kao i trodimenzionalni prikaz pozicije pojedinih presjeka nosa. Izabrani su oni presjeci koji najbolje prikazuju izgled strujanja kroz prolaze nosnih hodnika te izgled strujanja na ulazu u ždrijelo. Pratimo li raspodjelu brzine strujanja po poprečnim presjecima geometrije nosne šupljine, prvo što se može primijetiti je da se najveće brzine strujanja pojavljuju u hodniku lijeve nosne školjke, preciznije, na području srednjeg

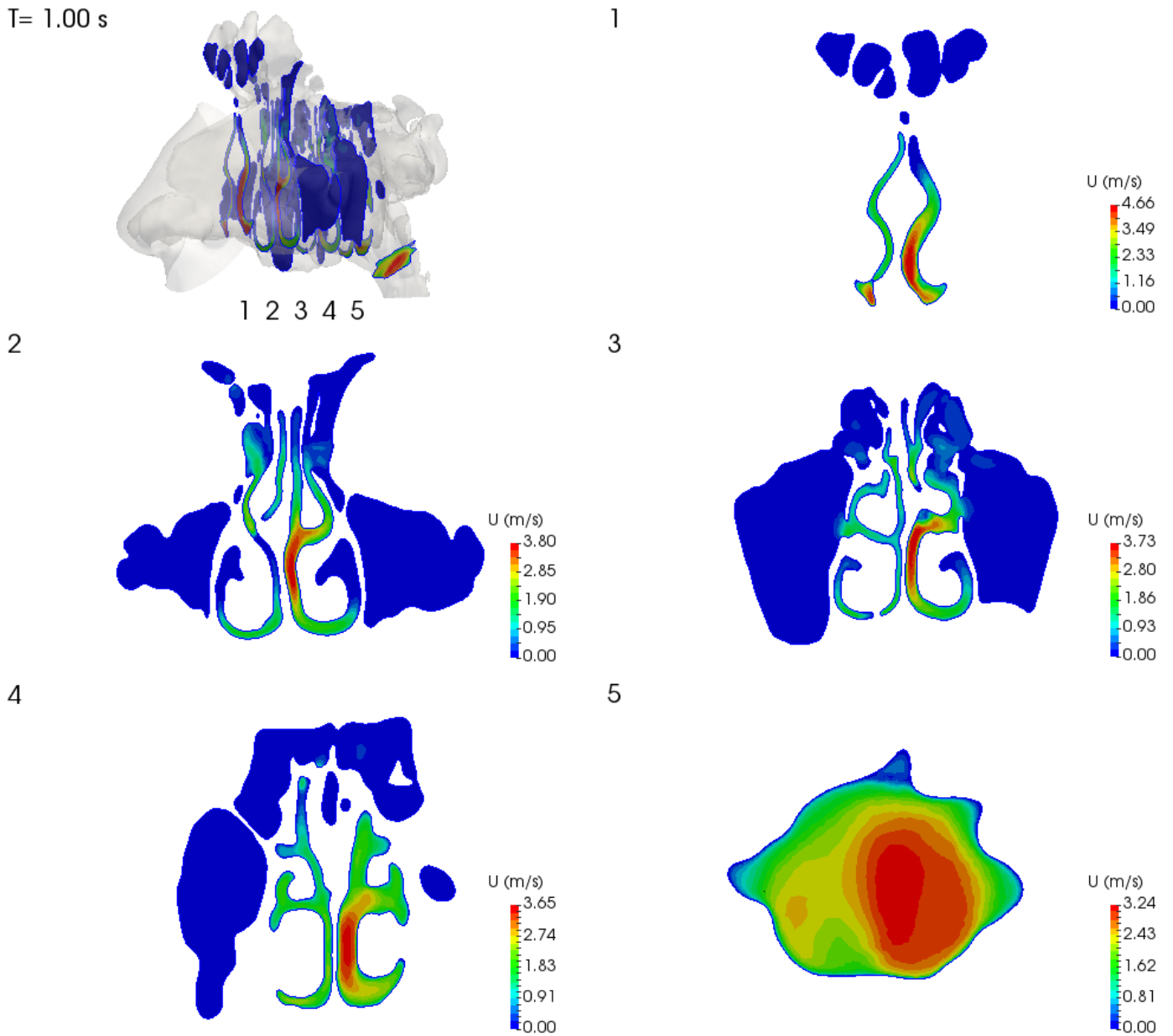
hodnika (*lat. meatus medius*). Takva se pojava objašnjava činjenicom da je strujanje kroz prostor nosne šupljine, koji se veže na desnu nosnicu i nastavlja se prema desnoj školjki, izloženo većim preprekama i zbog zadebljanja nosne sluznice i izražene devijacije septuma. Zbog tog razloga se, u ovom konkretnom anatomskom slučaju, veći protok zraka ostvaruje kroz lijevi kanal nosne šupljine tj. lijeve nosne hodnike. Upravo se zato, zbog znatno većeg protoka zraka, u presjecima lijeve strane nosa, mogu vidjeti i veće brzine strujanja. Na desnoj se strani vide, ne samo manje brzine izazvane manjim protokom, već i područja gdje gotovo da ne dolazi do strujanja zraka zbog pojave većih prepreka. Nadalje, može se primijetiti da se najveći dio strujanja pojavljuje uz središnju pregradu, između školjki i septuma, te se zadržava u srednjem nosnom hodniku. Male brzine i mali protoci strujanja zraka pojavljuju se u perifernim područjima nosnih školjki tj. strujanje i brzine ostvarene u gornjem (*lat. meatus superior*) i donjem nosnom hodniku (*lat. meatus inferior*), puno su manji nego u srednjem hodniku. Tek se jako mali iznosi brzina pojavljuju na prijelazu u paranazalne sinuse i unutar samih sinusa. Što se tiče izlaznog presjeka, raspodjela brzina pokazuje veće iznose brzine prema središnjem dijelu lijeve polovice presjeka, što odgovara većem protoku kroz lijevi kanal nosa.

$T = 0.50 \text{ s}$



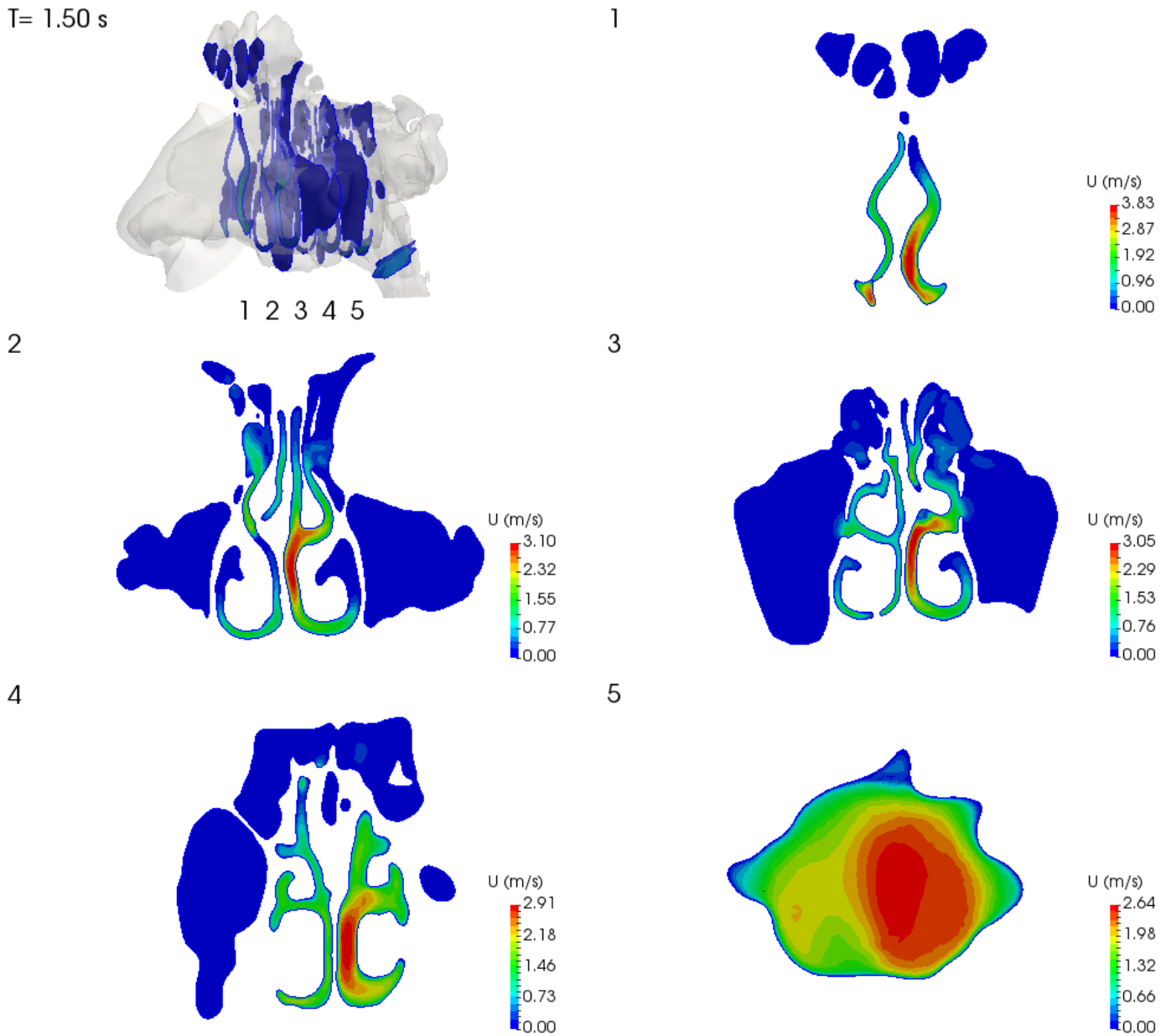
Slika 5.2: Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 0,5 \text{ s}$.

$T = 1.00$ s



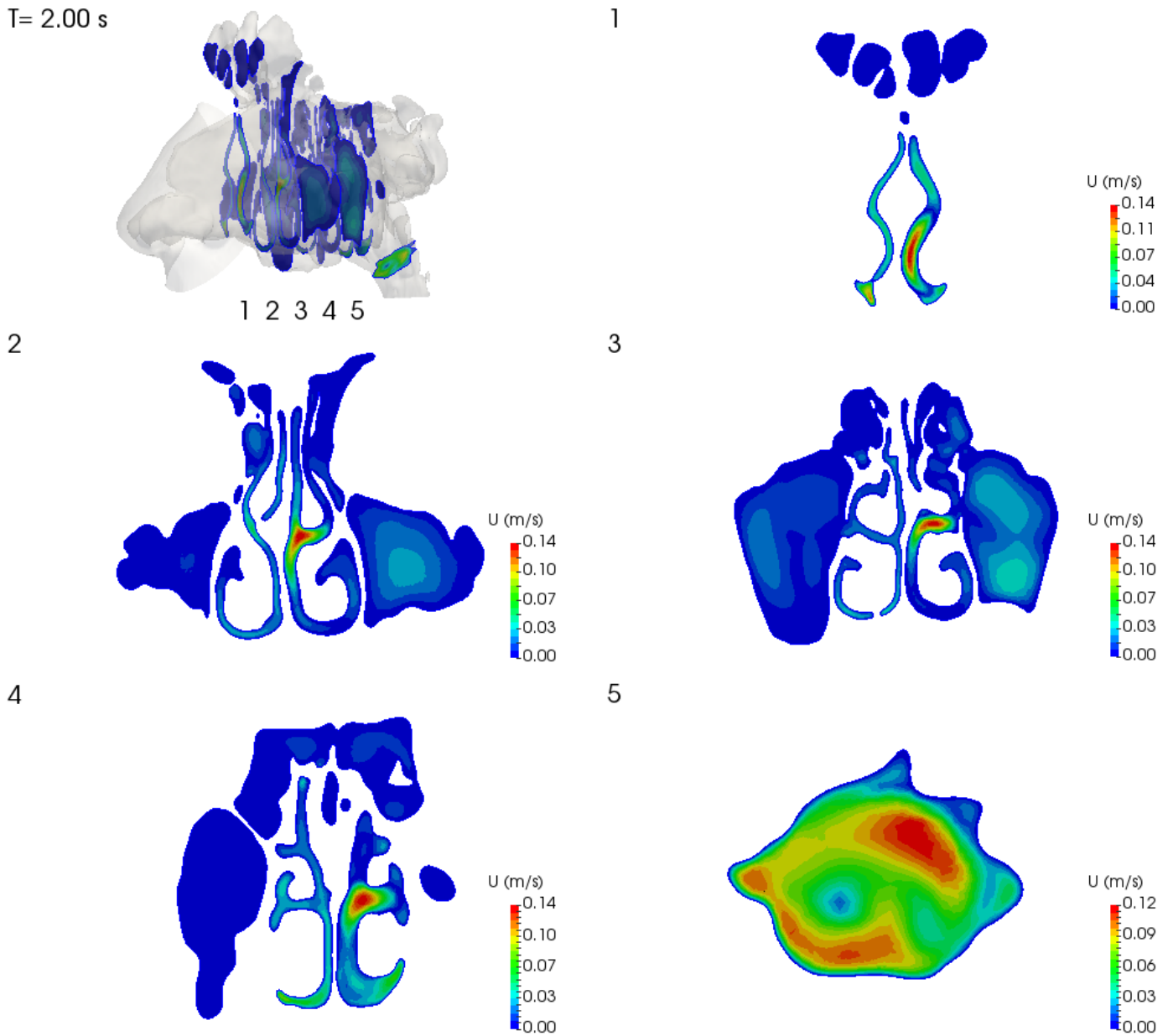
Slika 5.3: Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 1$ s.

$T = 1.50 \text{ s}$



Slika 5.4: Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 1,5 \text{ s}$.

$T = 2.00$ s

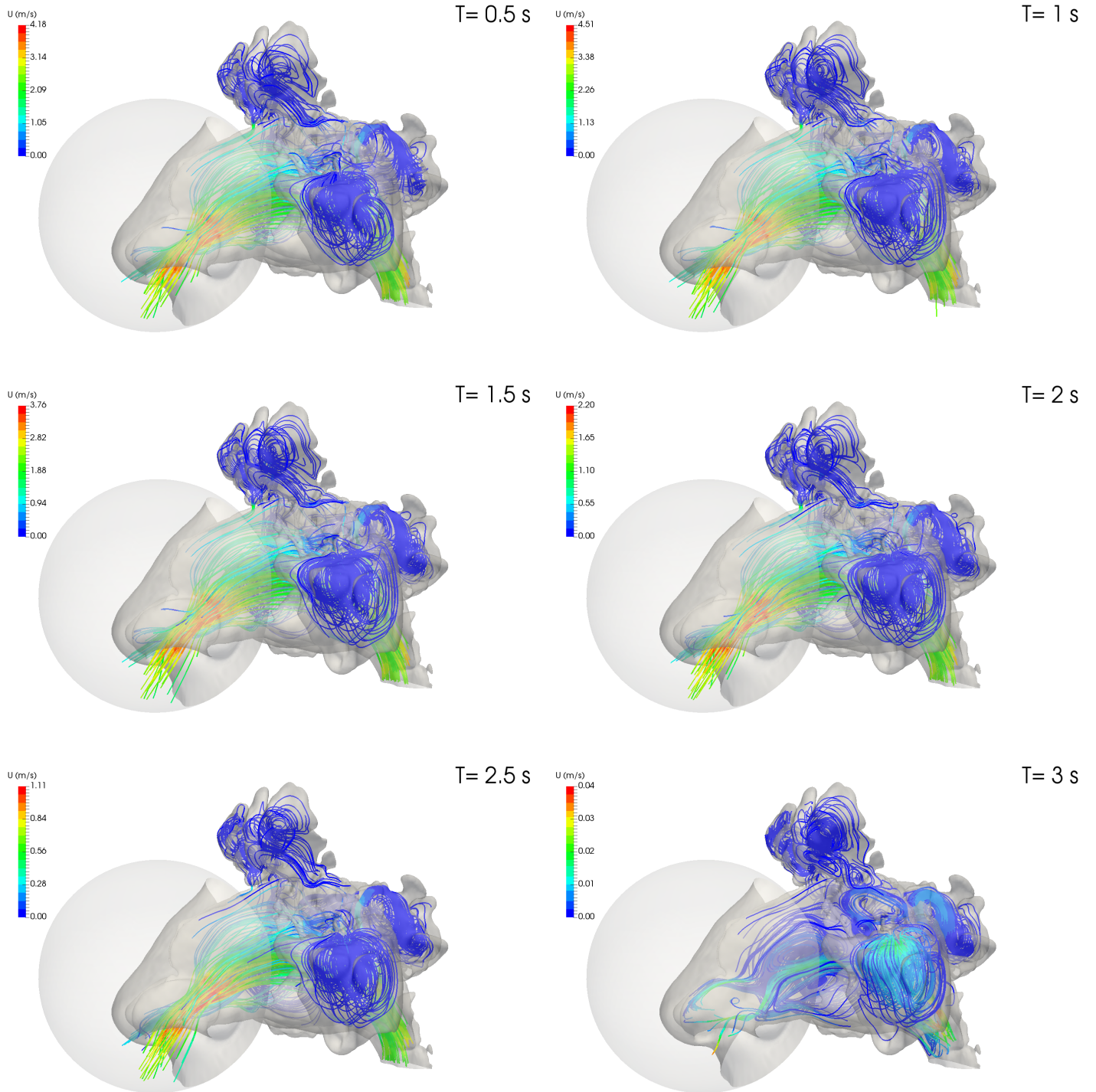


Slika 5.5: Poprečni presjek pri normalnom udisaju za $T = 2$ s.

5.2. Simulacija procesa izdisanja

U ovom su dijelu rada prikazani rezultati za izvršene simulacije izdisanja zraka kroz nosnu šupljinu. Proces izdisanja odvija se u suprotnom smjeru od procesa udisanja, tako da zrak ulazi u prostor nosne šupljine iz ždrijela kroz područje nosnih hodnika do nosnica, gdje izlazi u atmosferu. Cjelokupan ciklus izdisanja traje 3 sekunde, a prikazan je slikom za šest odabranih vremenskih intervala (Slika 5.6).

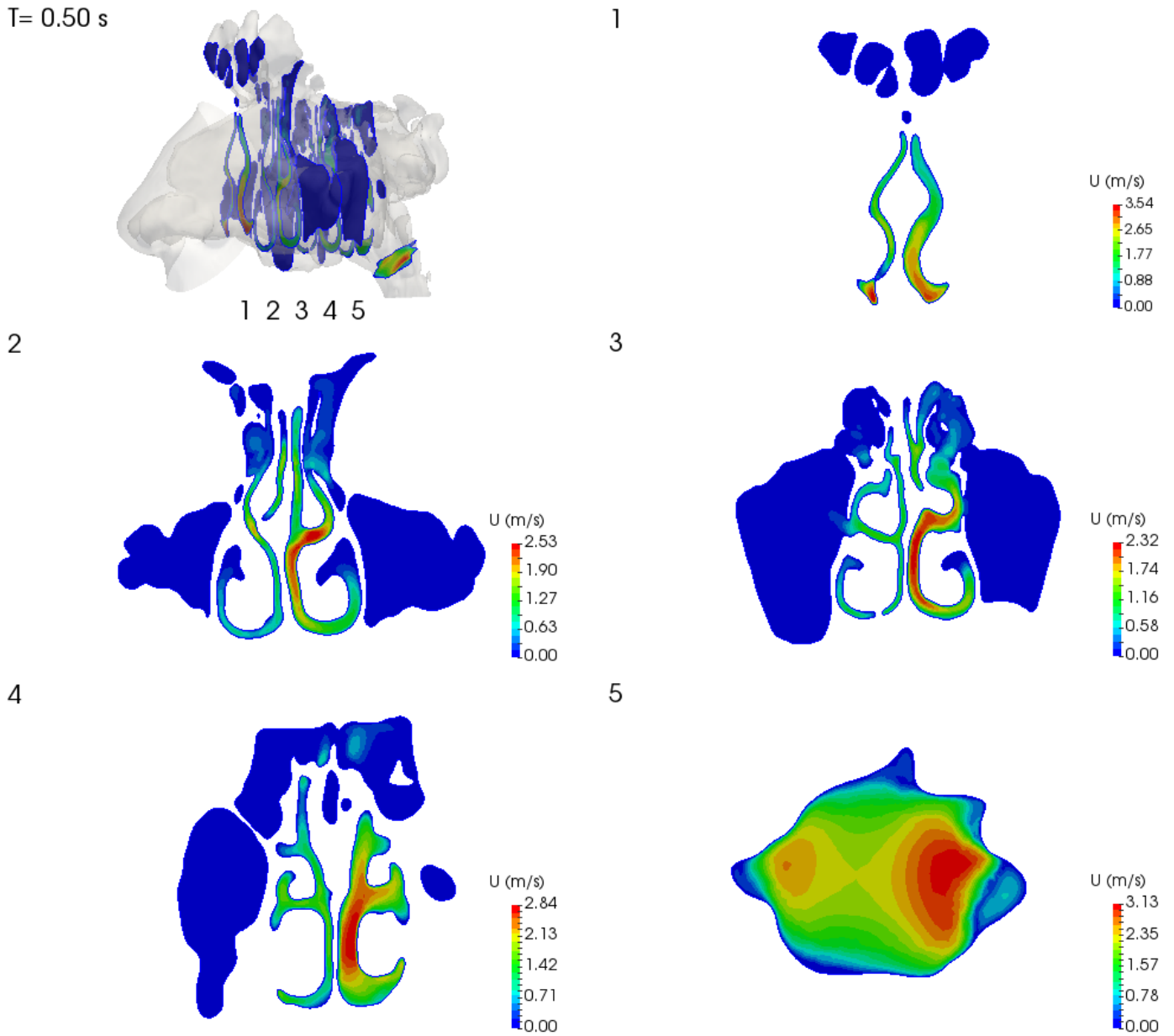
U prvoj šestini ciklusa izdisanja ($T = 0,5$ s) postiže se iznos brzine strujanja od 4,10 m/s koji je blizu ukupne maksimalne brzine prilikom izdisanja. Najveća je brzina, kao i prilikom udisanja, postignuta na području nosnih ventila, što se objašnjava ubrzavanjem strujanja zbog smanjenja poprečnog presjeka geometrije. To se suženje geometrije pojavljuje na području prijelaza iz nosnih hodnika kroz ventil nosa, prema nosnicama. Na ulazu u prostor lijevaka, kojima se hodnici nosa otvaraju prema ždrijelu, strujanje također ubrzava zbog suženja geometrije, te se zatim stabilizira prolaskom kroz nosne hodnike, gdje prolazi brzinom od oko 2,1 m/s. Ovakav trend strujanja zadržava se sve do približno trećine ciklusa izdisanja ($T = 1$ s). Do tog se trenutka maksimalna brzina strujanja nastavlja povećavati porastom protoka izdahnutog zraka, a brzina strujanja kroz nosne hodnike (primarno *meatus medius*, tj srednji nosni hodnik) zadržava slične vrijednosti. Trend porasta brzina prestaje nakon prve trećine ciklusa te se već na polovici ciklusa ($T = 1,5$ s) pojavljuje značajniji pad maksimalne brzine na području nosnih ventila, koji se nastavlja sve do kraja ciklusa, prateći smanjenje protoka zraka. Brzina strujanja nakon prve trećine izdisaja također opada, uz značajni pad tek pred kraj strujanja. Strujanje u periferiji, koja okružuje nosnu šupljinu, pokazuje vrlo male, gotovo nepostojeće, brzine strujanja. Može se primijetiti bitna razlika u odnosu na ciklus udisanja: prilikom izdisanja možemo vidjeti pojavu prestrujavanja zraka iz nosne šupljine prema sfenoidalnim sinusima. Ta pojava nije u značajnijem obliku vidljiva prilikom ciklusa udisanja, što se može povezati s različitim smjerom strujanja zraka prilikom izdisaja. Kao i u prethodnoj analizi udisanja kroz nosnu šupljinu, tako je i ovdje prikazan proces izdisanja kroz pet karakterističnih poprečnih presjeka geometrije nosa. Odabrani su jednaki presjeci kao i u prethodnom slučaju, ali su uzeti različiti vremenski intervali zbog razlike u trajanju ciklusa izdisanja i udisanja (Slike 5.7, 5.8, 5.9, 5.10).



Slika 5.6: Strujnice pri izdisanju.

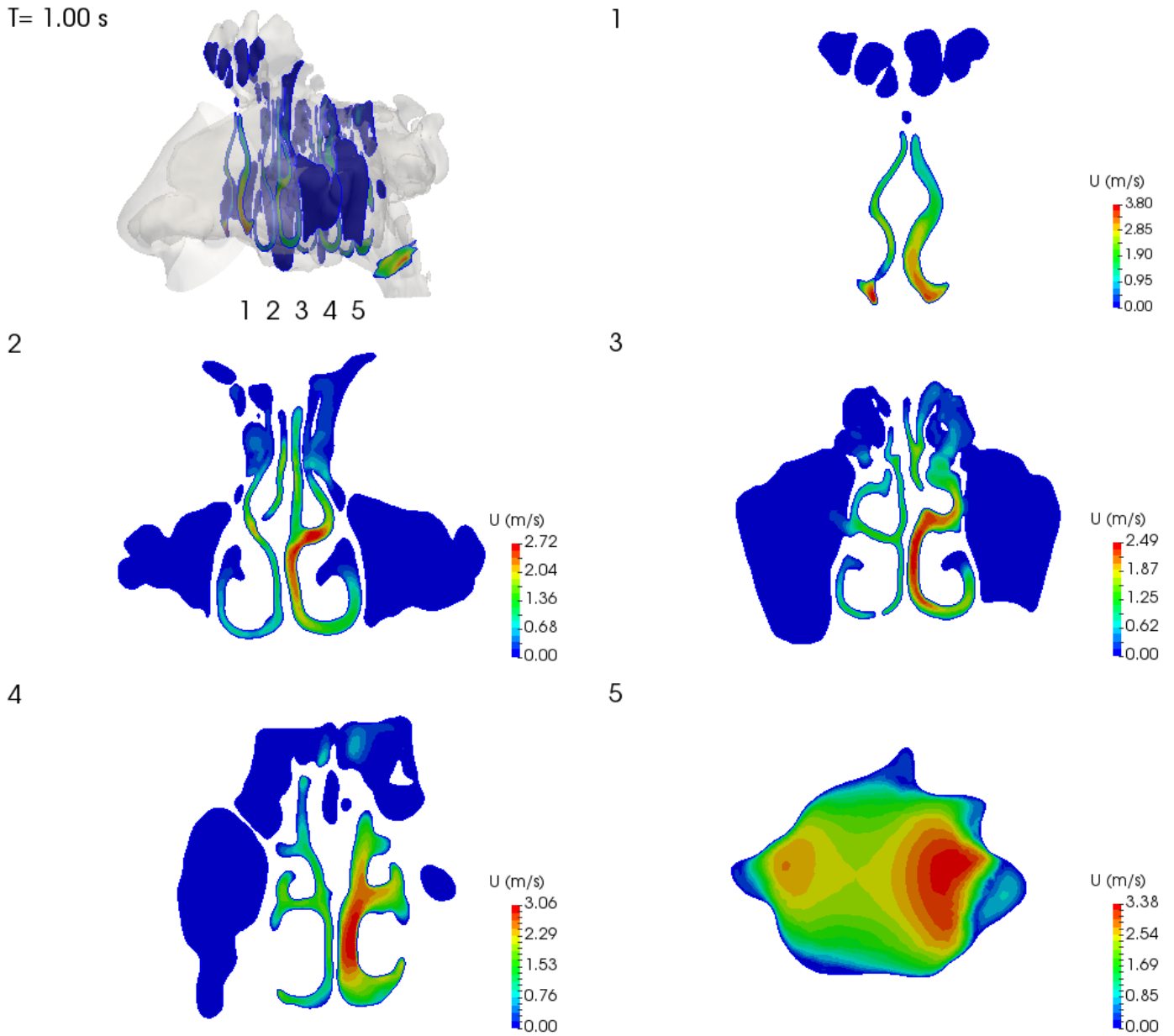
Analizom zadanih poprečnih presjeka strujanja za proces izdisanja možemo vidjeti slične zakonitosti strujanja kao u procesu udisanja. Strujanje je većinskim dijelom karakterizirano većim protokom, pa tako i brzinama, na središnjem nosnom hodniku i uz unutrašnju stijenkku, prateći nosni septum. Ipak, zahvaljujući obrnutom smjeru prolaska zraka, prilikom izdisanja dolazi do različite raspodjele brzina prilikom strujanja zraka. Zrak nailazi na prepreke kasnije, bliže izlazu iz nosa. Zato u poprečnim presjecima možemo vidjeti veću jednolikost raspodjele brzine po presjeku nosnih hodnika. Također se strujanje prostire po širem području nosnih hodnika, a područje izraženijih brzina, iako i dalje zadržano na presjeku srednjeg nosnog hodnika, više je raspršeno. Presjek kojim strujanje prolazi prilikom izlaska iz ždrijela i ulaska u hodnike nosa, pokazuje veće brzine na lijevoj strani, zahvaljujući olakšanom strujanju kroz lijevu polovicu nosne šupljine, dok je brzina manja na desnoj polovici. Primjećuje se kako se zone veće brzine strujanja prolaskom kroz nosne hodnike, spuštaju prema donjem nosnom hodniku (lat. *meatus inferior*), kako se strujanje približava izlazu iz područja nosnih školjki (hodnika) i ulazu u eksterni nos.

$T = 0.50 \text{ s}$



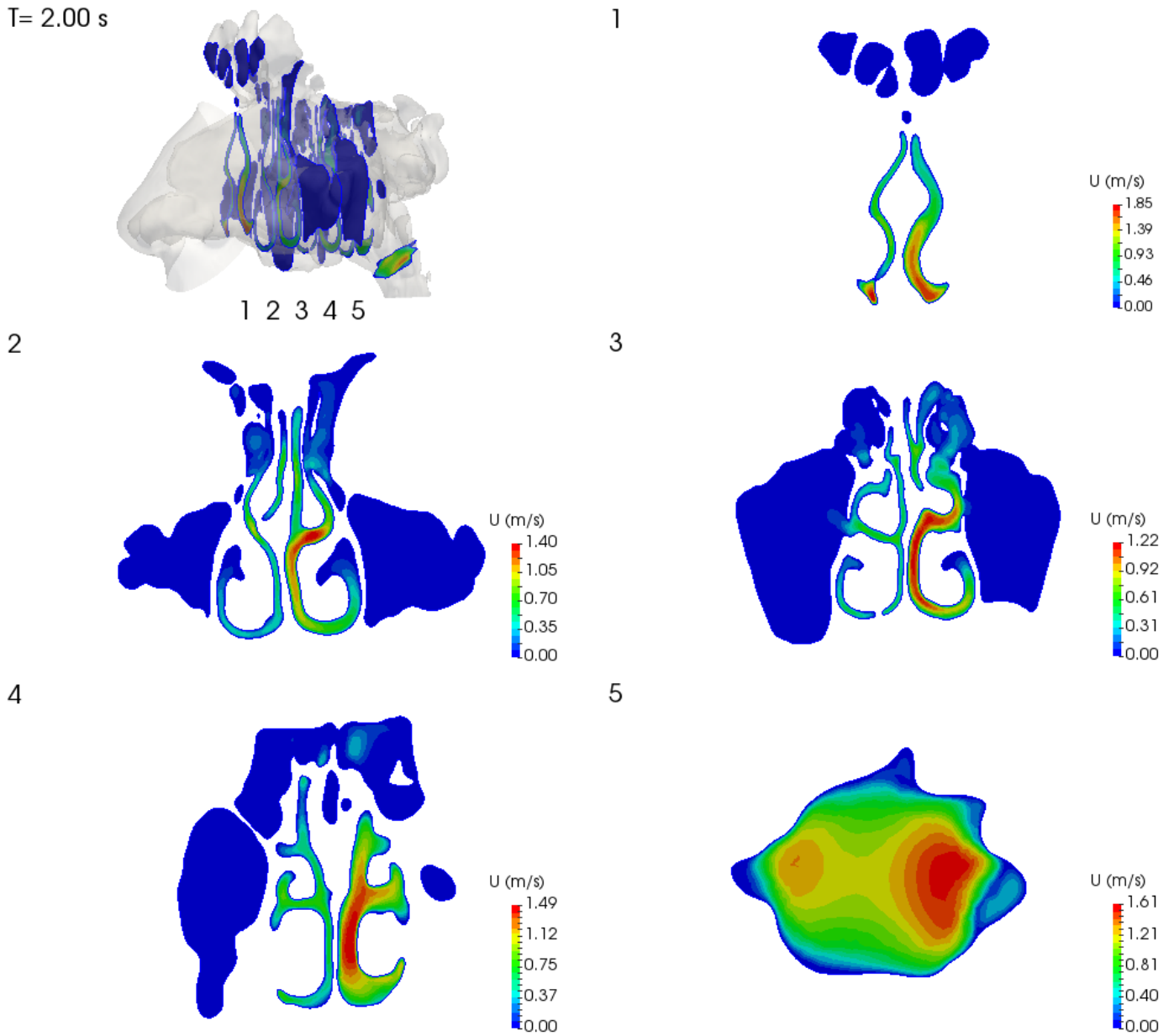
Slika 5.7: Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 0,5 \text{ s}$.

$T = 1.00$ s



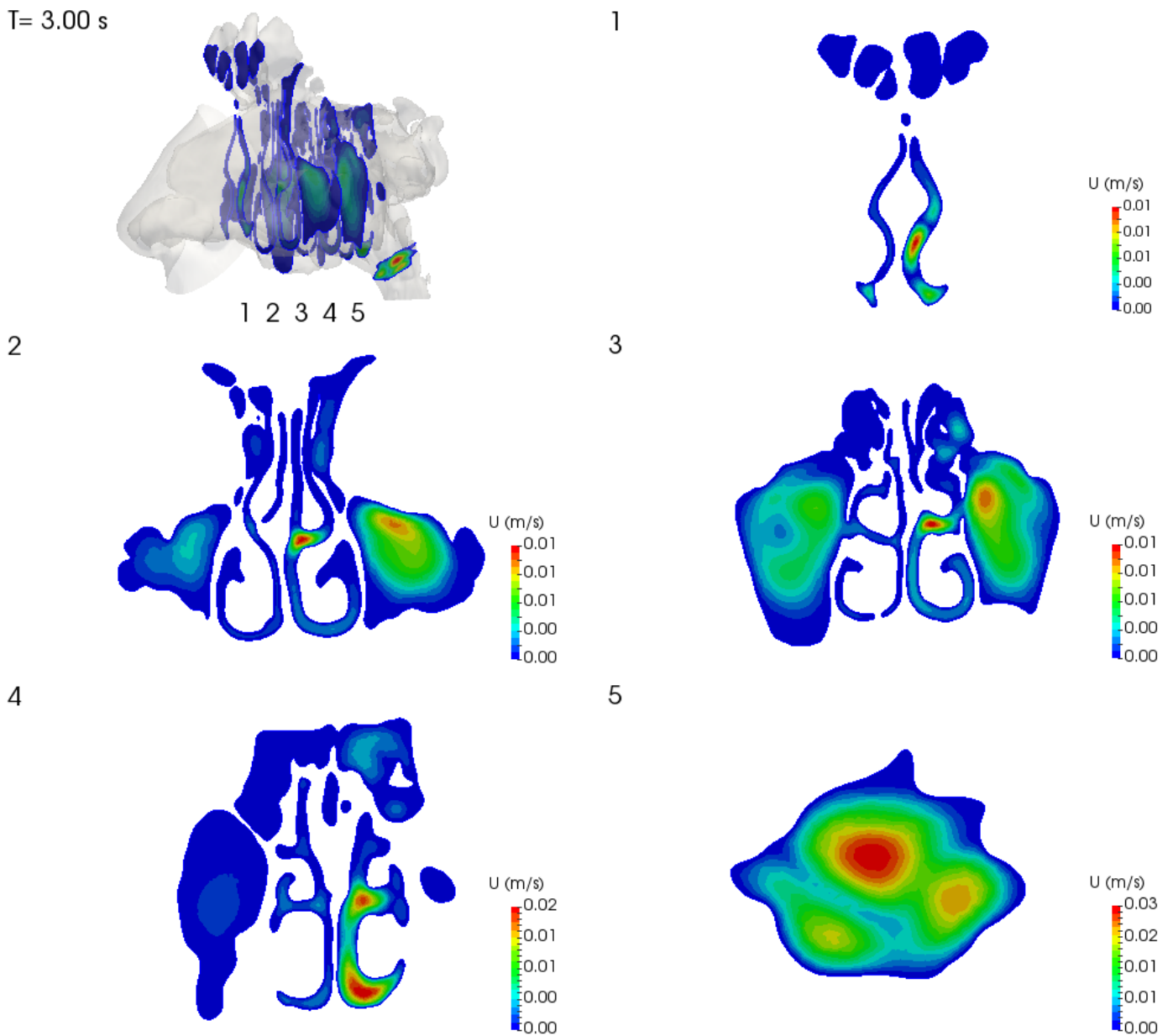
Slika 5.8: Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 1$ s.

$T = 2.00$ s



Slika 5.9: Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 2$ s.

$T = 3.00 \text{ s}$



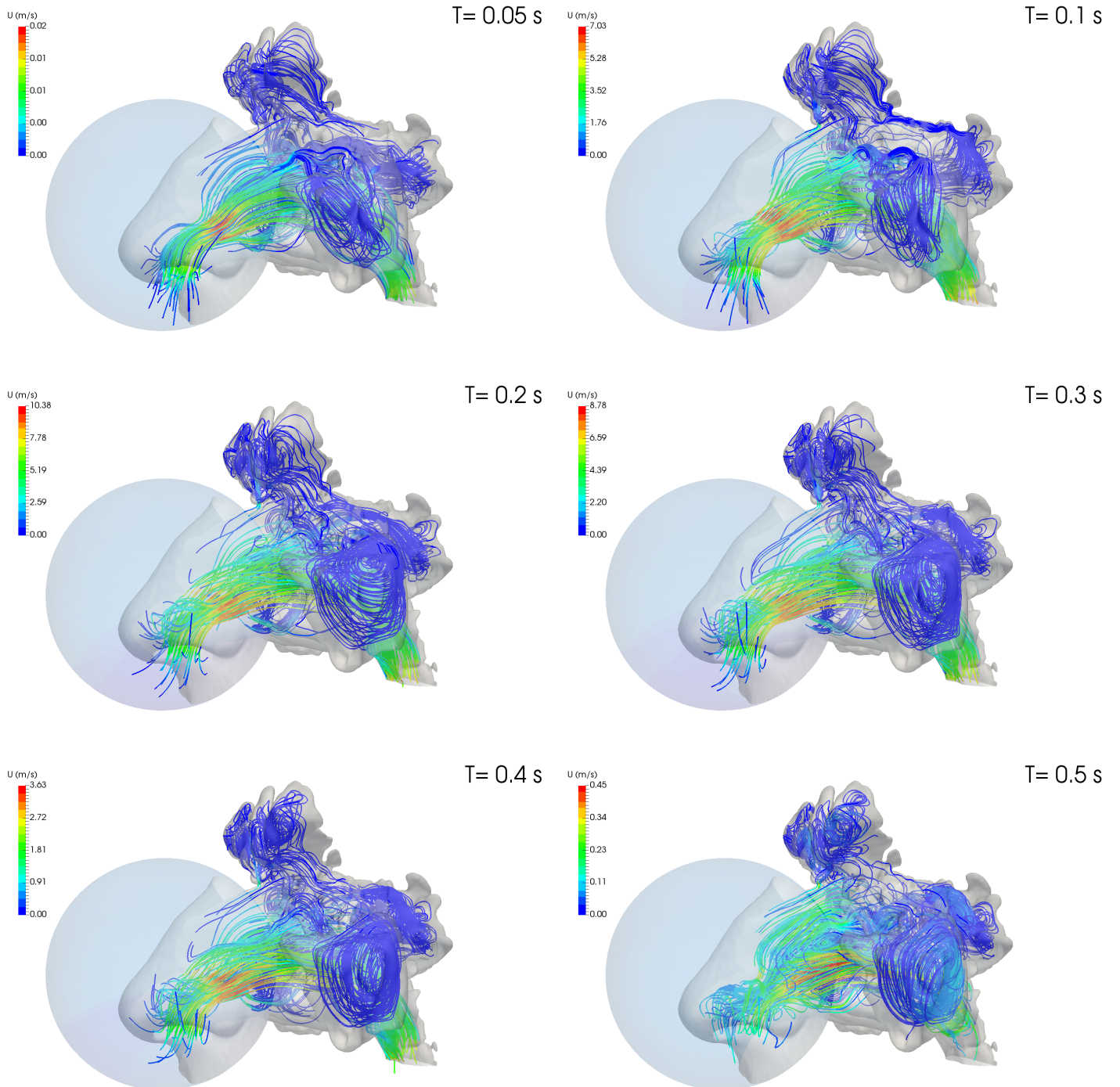
Slika 5.10: Poprečni presjek pri izdisaju za $T = 3 \text{ s}$.

5.3. Simulacija kratkog udisaja

Posljednje simulirano strujanje je strujanje prilikom kratkog i intenzivnog udaha zraka kroz nosnu šupljinu. Ovo je strujanje karakterizirano intenzivnim protokom ostvarenim unutar kratkog vremenskog intervala. Prikazano je strujnicama za šest relevantnih vremenskih trenutaka (Slika 5.11).

Osnovna se slika strujanja ne razlikuje pretjerano od slike strujanja prilikom normalnog udisaja. Strujanje je definirano istom geometrijom te iz tog razloga pokazuje jednake trendove. Osnovna se razlika može vidjeti u iznosima brzina strujanja, koji se postižu prolaskom zraka kroz pojedine dijelove geometrije, te u vremenskom intervalu unutar kojeg se te brzine postižu. U prvom se trenu strujanja ($T = 0,05$ s) iznosi brzina i masenih protoka zadržavaju na prilično niskim iznosima kao pri početku strujanja, ali se već u drugom trenutku, samo 0,05 sekundi kasnije ($T = 0,1$ s), može vidjeti intenzivan porast brzine strujanja (maksimalni iznos 7 m/s) izazvan intenzivnim porastom protoka. Trend porasta brzine i protoka zadržava se sve do približno polovice ciklusa udisaja (za $T = 0,2$ s maksimalna brzina iznosi 10,3 m/s), a značajan pad maksimalne brzine strujanja može se pratiti nakon prolaska polovice ciklusa ($T = 0,3$ s) pa sve do kraja strujanja. Slično kao i kod normalnog udisanja, jasno je da se najveći porast brzine strujanja događa upravo prolaskom kroz nosne ventile. Za razliku od normalnog udisaja, kod kojeg prosječna brzina strujanja ne prelazi približno 3,6 m/s, kod kratkog udisaja vrijednost prosječne brzine strujanja zraka prelazi 5 m/s.

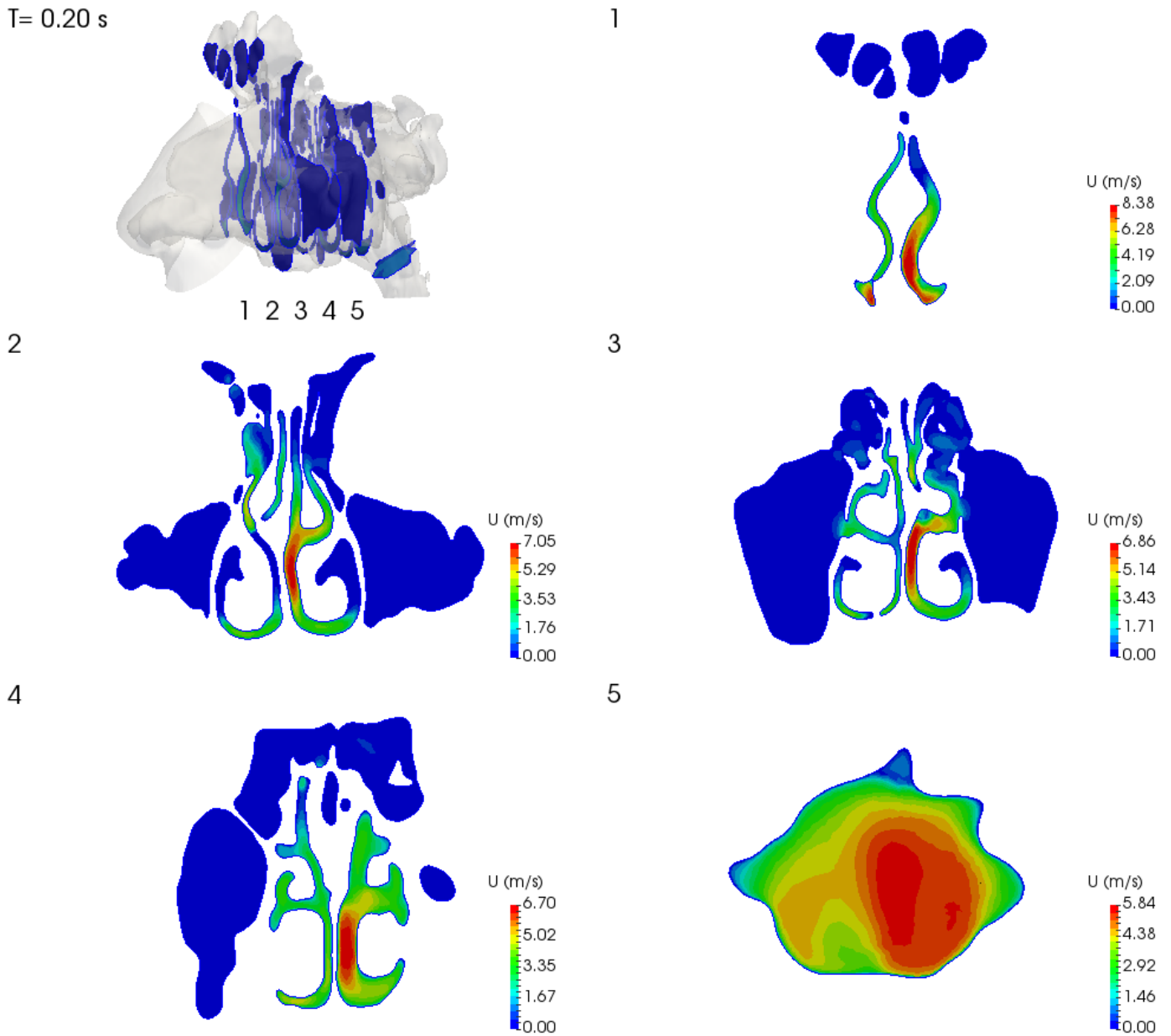
Prikazano je šest karakterističnih presjeka geometrije strujanja kroz nosnu šupljinu za vrijeme kratkog udisaja. Kao i u prethodnim slučajevima, odabrani su jednaki karakteristični presjeci, a prikazani vremenski intervali prilagođeni su kratkotrajnosti ove pojave (Slike 5.12, 5.13, 5.14, 5.15).



Slika 5.11: Strujnice pri kratkom udisaju.

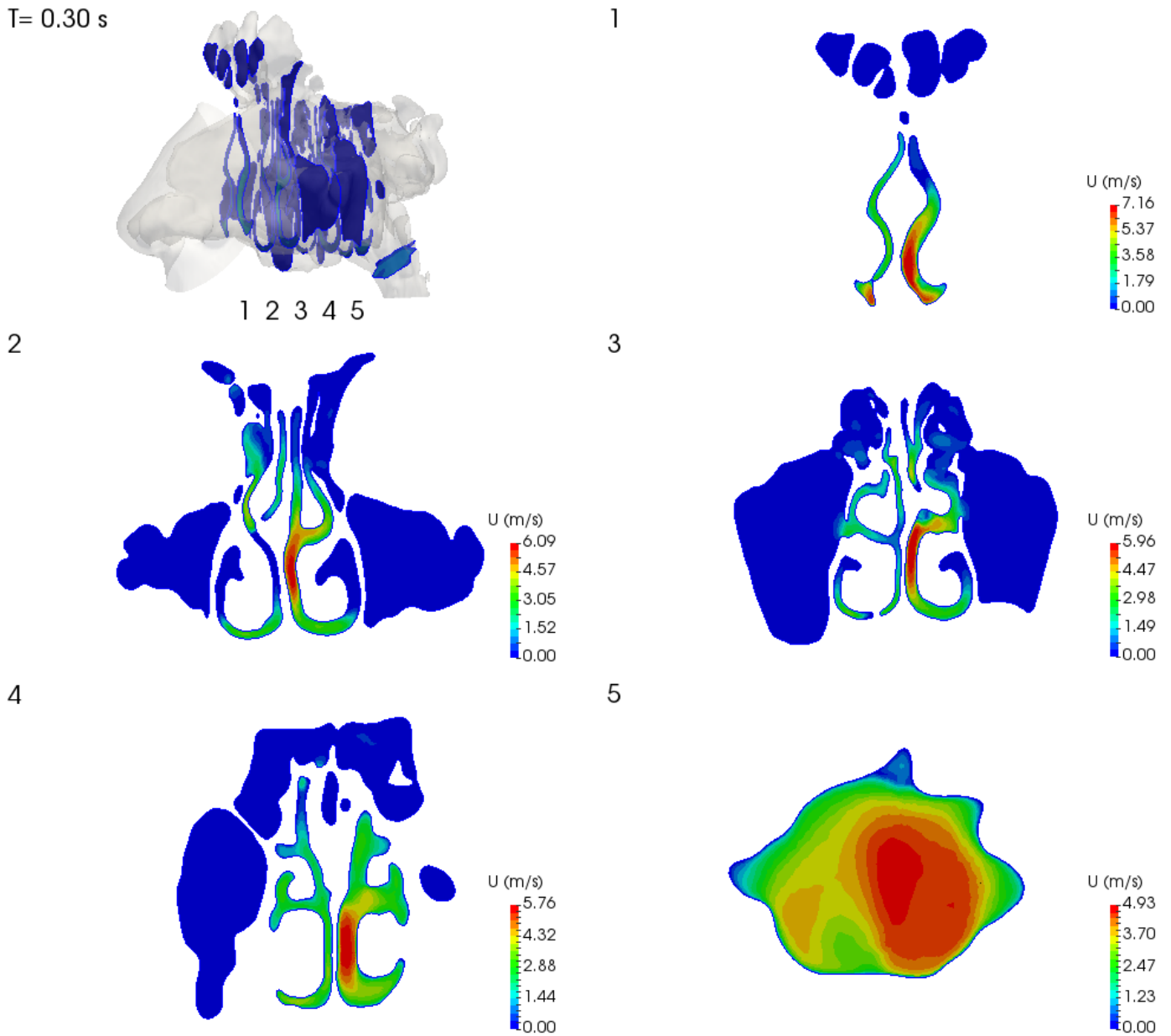
Izgled strujanja zraka kroz odabrane poprečne presjeke izrazito je sličan strujanju prilikom normalnog udisaja. Osnovna je razlika postizanje znatno većih brzina strujanja, što je posljedica povećanog protoka zraka zbog intenzivnijeg udaha. Kao i u prethodnom slučaju normalnog udisanja, tako je i ovdje moguće uočiti da se strujanje zraka, uz veće brzine, pojavljuje na području središnjeg dijela nosnih školjki tj. na području srednjeg nosnog hodnika. Brzine strujanja se smanjuju prema rubnim područjima gornjeg i donjeg nosnog hodnika, uz nešto manju raspršenost nego li je to slučaj prilikom normalnog udisanja, a zbog većeg prodora struje manje brzine na to područje. Strujanje kroz izlaznu plohu prema ždrijelu pokazuje jednaki pomak većih brzina prema lijevoj stijenci, ali uz šire područje pojave većih brzina. Mogu se vidjeti i zone bez strujanja fluida na području postojanja značajnijih prepreka strujanju kroz nosne hodnike. Osnovna razlika u odnosu na normalni udisaj se vidi u većem prodoru strujanja na gornja područja nosnih školjki tj. područje gornjeg nosnog hodnika, pa čak i pojava nešto izraženijeg strujanja kroz dijelove paranazalnih sinusa.

$T = 0.20$ s



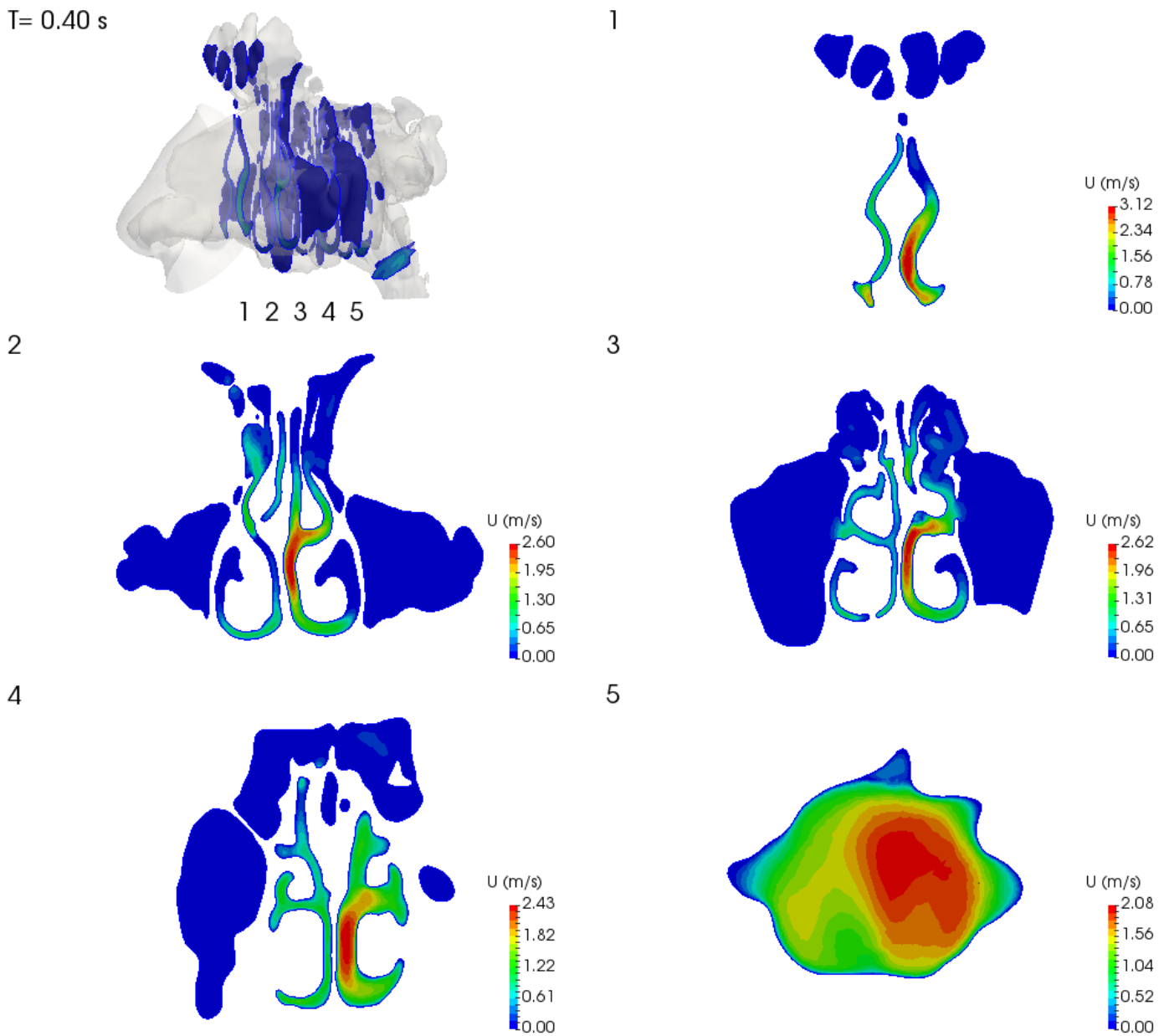
Slika 5.12: Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,2$ s.

$T = 0.30$ s



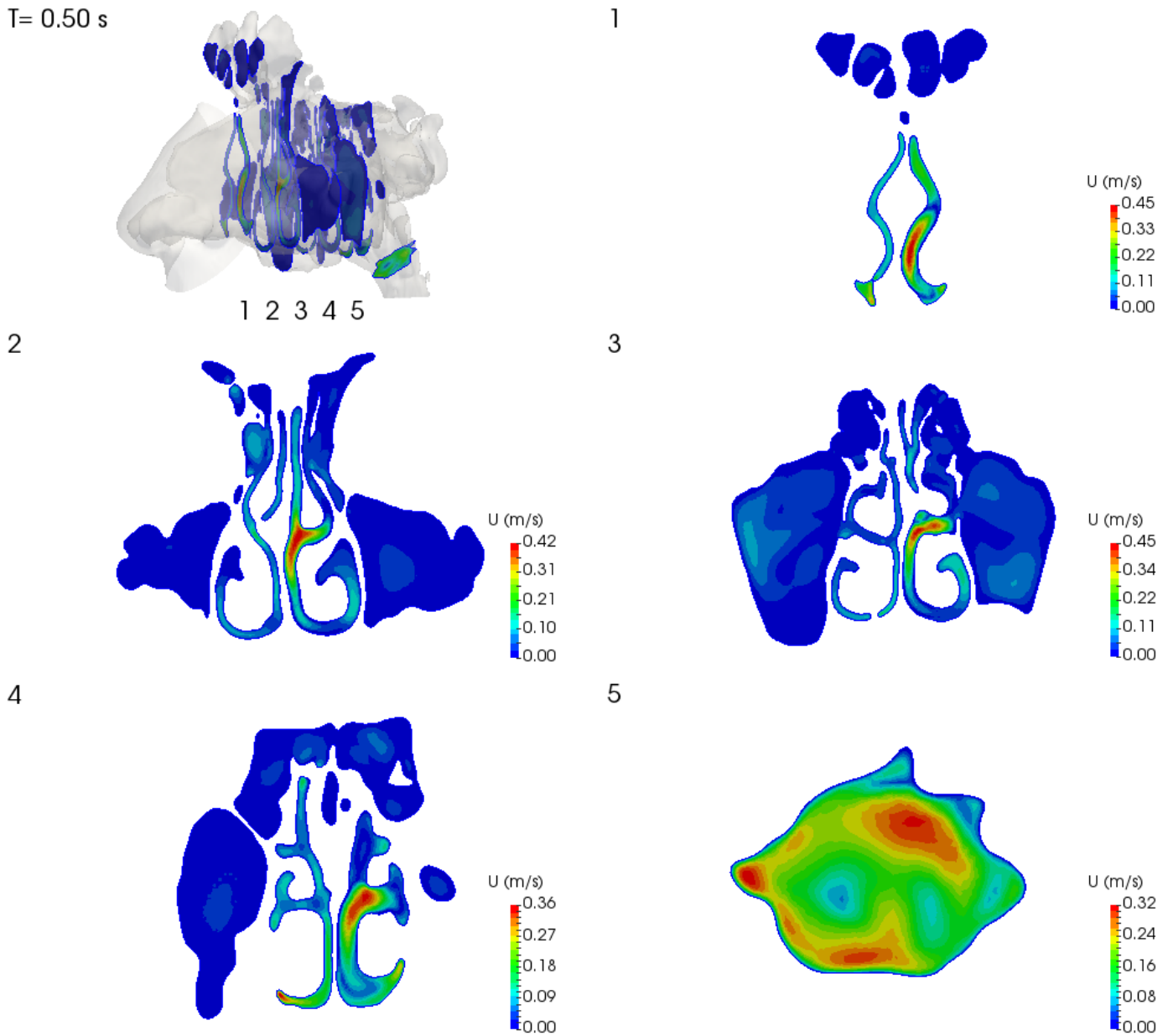
Slika 5.13: Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,3$ s.

$T = 0.40$ s



Slika 5.14: Poprečni presjek pri kratkom udisaju za $T = 0,4$ s.

$T = 0.50 \text{ s}$

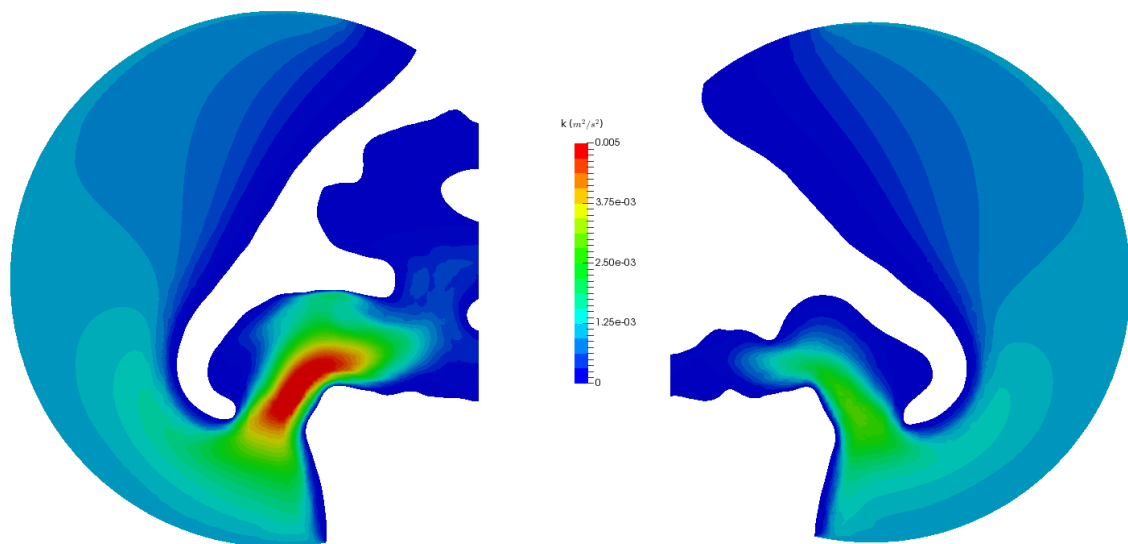


Slika 5.15: Poprečni presjek pri ikratkom udisaju za $T = 0,5 \text{ s}$.

5.4. Turbulentna kinetička energija

U ovom dijelu slijedi prikaz rezultata simulacija u pogledu pojave moguće turbulencije strujanja. Prihvati li se turbulentna kinetička energija k , kao svojevrsna mjera za prikazivanje pojave turbulencije i disipacije energije, moguće je zaključiti u kojim se područjima geometrije nosne šupljine može očekivati pojava turbulencije. Rezultati su prikazani za one vremenske trenutke tranzijentne simulacije, u kojima je poznato da se pojavljuju najveće brzine i protoci zraka.

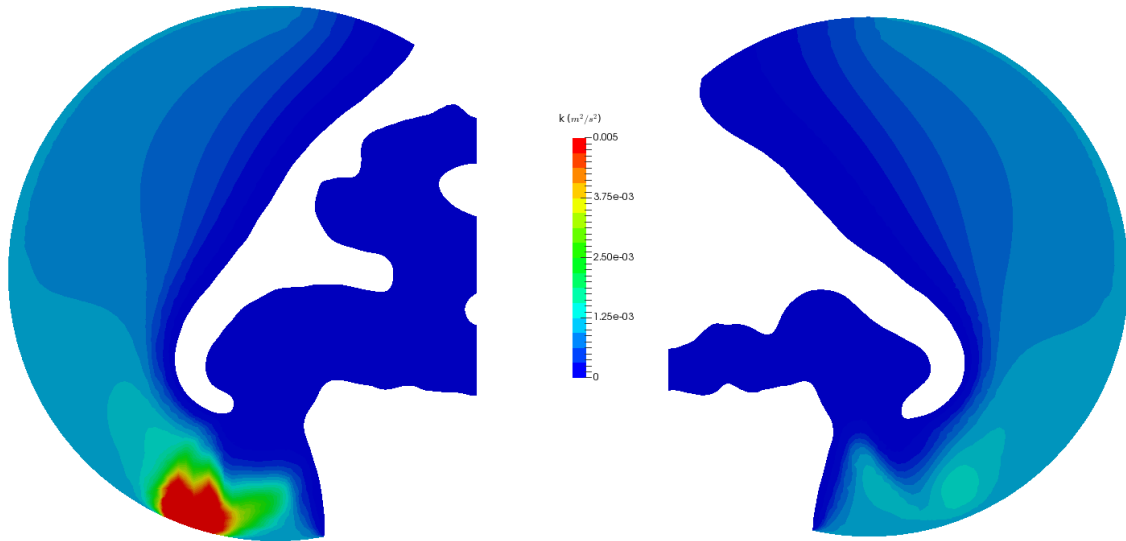
Prvo područje pojave turbulencije je područje na ulazu u nosnice, tj. vanjski dio nosa. To je područje prijelaza zraka iz okolne atmosfere u unutrašnjost nosa, gdje se zbog nagle promjene geometrije povećava disipacija energije te pojava turbulencije. Prikazana je promjena kinetičke energije turbulencije na dva presjeka, postavljena na sredinu lijeve i desne nosnice. Iste su ravnine korištene za prikaz kinetičke turbulentne energije za sva tri simulirana slučaja disanja tj. za normalni udisaj, izdisaj i kratki udisaj (Slike 5.16, 5.17, 5.18).



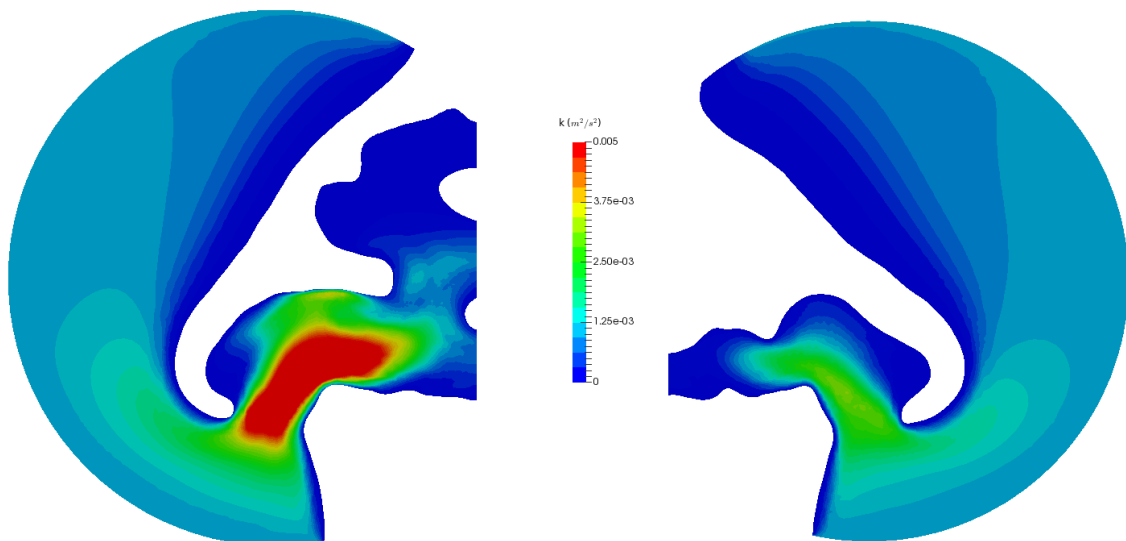
Slika 5.16: Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri normalnom udisaju za $T = 1$ s.

Korištenjem jednake skale za sva tri slučaja, intuitivno se mogu prikazati razlike u iznosima kinetičke energije turbulencije navedenih slučajeva. Može se uočiti kako se u slučaju normalnog udisanja (Slika 5.16), i u slučaju kratkog udaha (Slika 5.18), veći iznosi turbulentne kinetičke energije pojavljuju u strujanju u lijevu nosnicu. To se može povezati s izraženom razlikom u protoku i brzinama, koje se ostvaruju u pojedinim nosnicama. Naime, desna nosnica ostvaruje puno manje protoke te se ostvaruju i manje brzine, što rezultira i nižim vrijednostima kinetičke turbulentne energije. Iznos kinetičke energije turbulencije na presjeku desne nosnice pokazuje približno jednake vrijednosti, unatoč značajnim razlikama u brzinama koje se javljaju u ova dva slučaja, dok je iznos kinetičke energije turbulencije na lijevoj nosnici puno veći prilikom kratkog intenzivnog udisaja nego li prilikom normalnog udisanja. Prilikom izdisanja moguće je vidjeti značajno niže vrijednosti kinetičke energije turbulencije, uz veće iznose na lijevoj u odnosu na desnu nosnicu. Pojava turbulencije na poprečnom presjeku lijeve nosnice ne odvija se unutar same nosne šupljine, kao u prethodnim slučajevima, već je vidljiva na području odmaknutom od ulaza u nosnicu (Slika 5.17).

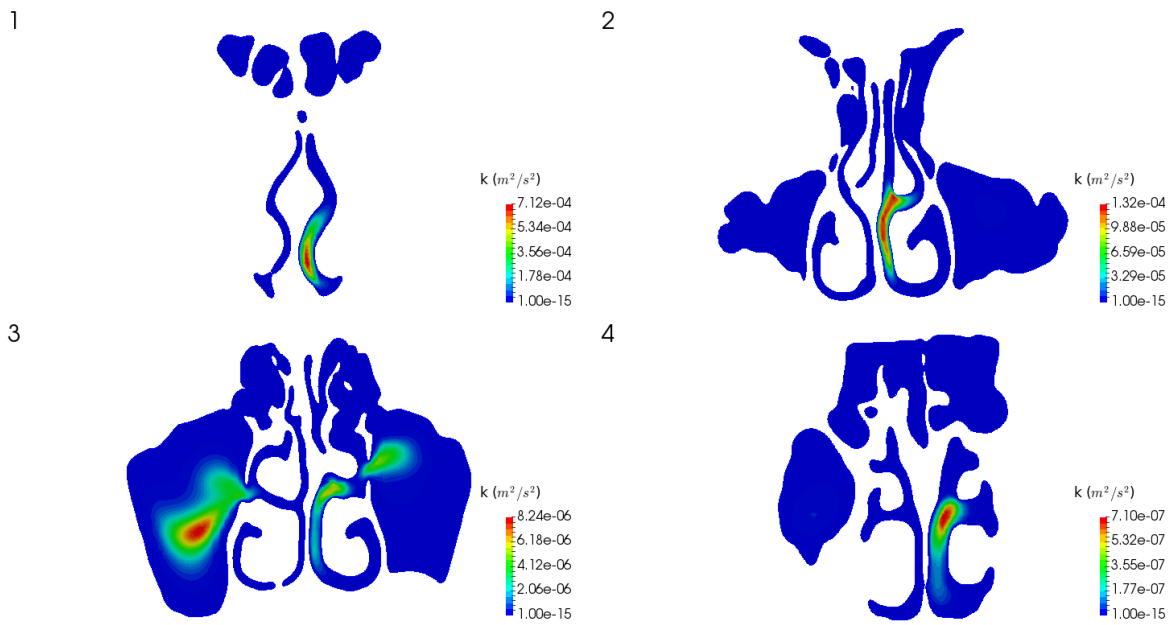
Osim moguće turbulencije na ulazu u nosnice vanjskog nosa, zanimljivo je promatrati i moguću pojavu turbulencije te iznose kinetičke energije turbulencije kroz područje nosnih hodnika šupljine nosa. Radi jednostavnog prikazivanja strujanja, izabrana su četiri značajna presjeka nosnih hodnika okomito na strujanje zraka kroz njih. Prikazano je strujanje za slučajeve udisanja, izdisanja i kratkog udisaja (Slike 5.19, 5.20, 5.21).



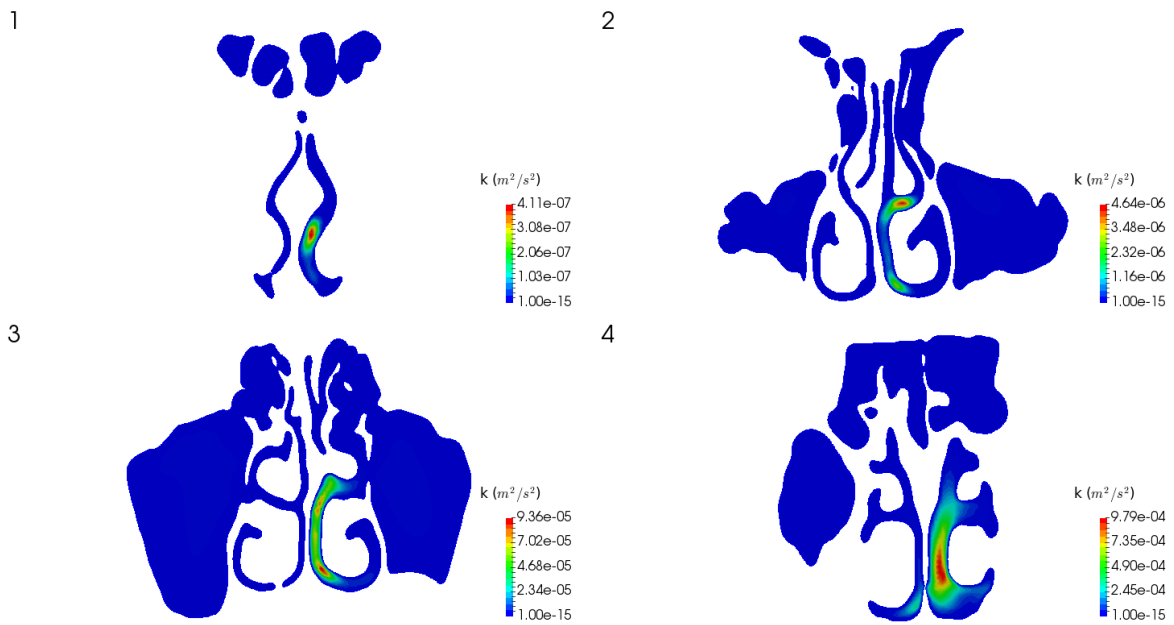
Slika 5.17: Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri normalnom izdisaju za $T = 1,5$ s.



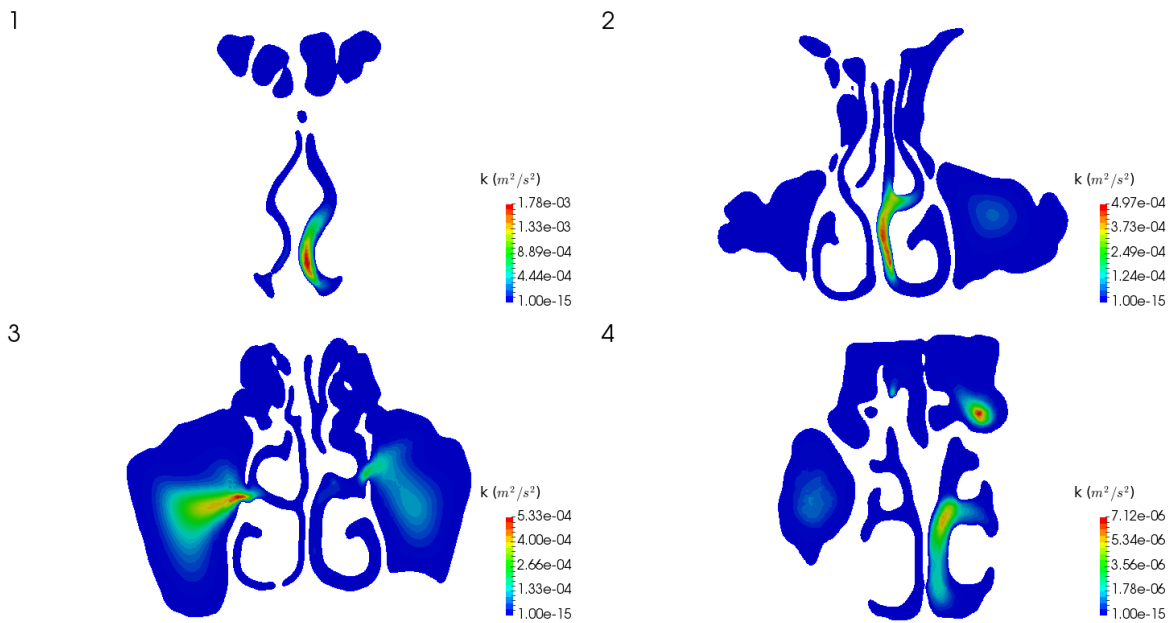
Slika 5.18: Turbulentna kinetička energija lijeve i desne nosnice pri kratkom udisaju za $T = 0,25$ s.



Slika 5.19: Presjek nosnih hodnika pri udisaju za $T = 1$ s.



Slika 5.20: Presjek nosnih hodnika pri izdisaju za $T = 1$ s.



Slika 5.21: Presjek nosnih hodnika pri kratkom udisaju za $T = 0,25$ s.

Slika 5.19 prikazuje raspodjelu kinetičke energije turbulencije u trenutku pojave približno maksimalnih brzina i protoka kroz nosnu šupljinu, za vrijeme ciklusa normalnog udisanja. Prolaskom kroz nosne hodnike, više vrijednosti kinetičke energije turbulencije, zadržavaju se na području srednjeg nosnog hodnika (*lat. meatus medius*), dok se na području donjih (*lat. meatus inferior*) i gornjih nosnih hodnika (*lat. meatus superior*) ne pojavljuju naznake turbulencije. Zanimljivo je primijetiti da se određena razina turbulencije pojavljuje na prijelazu iz nosnih hodnika u maksilarne sinuse, protežući se i na unutrašnjost sinusa. Pogledamo li presjeke koji se odnose na simulaciju kratkog, intenzivnog udaha (Slika 5.21), možemo primijetiti veće iznose kinetičke energije turbulencije. Raspodjela odgovara pojavama viđenim kod normalnog udisaja. Moguća turbulencija zadržava se na područjima veće brzine tj. na srednjem nosnom hodniku lijeve polovice nosne šupljine, dok se kroz sve nosne hodnike desne strane te gornji i donji nosni hodnik lijeve strane, može vidjeti veliki pad iznosa kinetičke energije turbulencije. I u ovom se slučaju može vidjeti pojava turbulencije na prijelazu iz nosnih hodnika u maksilarne sinuse te unutar maksilarnih sinusa. Bitno je primijetiti da se, osim u maksilarnim sinusima, naznake turbulencije mogu vidjeti unutar etmoidalnih sinusa, pojavom područja povećane kinetičke energije turbulencije. Slika 5.16 prikazuje presjeke nosnih hodnika

za simulaciju strujanja zraka prilikom izdisanja. Red veličine iznosa kinetičke energije turbulencije u ovom je slučaju znatno manji nego u prethodnim slučajevima, ali ostaje trend zadržavanja turbulencije na područjima srednjeg nosnog hodnika. Također možemo vidjeti gotovo izostanak turbulencije u desnim nosnim hodnicima uz naznake područja niske kinetičke energije turbulencije, u donjem nosnom hodniku blizu početka nosnih lijevaka prema prijelazu u ždrijelo.

6 | Zaključak

6.1. Ostvareni rad

U sklopu ovog rada nastojalo se uspostaviti metodologiju izrade numeričkog modela nosne šupljine i paranazalnih sinusa, na temelju podataka dostupnih klasičnim pregledima medicinske dijagnostike, te provesti CFD simulaciju strujanja zraka kroz nosnu šupljinu korištenjem paketa računalne dinamike fluida **OpenFOAM** [1].

Nakon uvodnog dijela rada u kojem je opisana složena anatomska građa nosne šupljine, objašnjen je postupak izrade modela geometrije nosne šupljine. Upoznavanje s anatomijom nosa omogućilo je donošenje odluke o tome koje je anatomske cjeline potrebno obuhvatiti u modelu te je pružilo naznake o izgledu strujanja koje možemo očekivati u simulaciji.

Na temelju stvarnih nalaza postojećeg pacijenta bilo je moguće iskoristiti sliku izrađenu postupkom računalne tomografije kao osnovu za gradnju trodimenzionalnog modela stvarne geometrije nosne šupljine. Osmišljena je metodologija izrade modela, primjenjiva na bilo kojeg pacijenta, te je vrijeme potrebno za izradu budućih modela smanjeno do unutar prihvatljivih granica. Utvrđen je detaljan postupak obrade i čišćenja prvobitne geometrije, primjenom jednostavno dostupnih programskih paketa, s ciljem stvaranja geometrije podložne korištenju u izradi numeričke mreže simulacije. Na temelju iste, napravljena je numerička mreža korištenjem alata **cfMesh**, prihvatljive veličine za primjenu na prosječnom osobnom računalu.

Zahvaljujući širokoj primjenjivosti alata `OpenFOAM`, na složenoj geometriji nosne šupljine uspješno je provedena tranzijentna simulacija strujanja zraka kroz nosnu šupljinu. Provedena je simulacija za cikluse udisanja i izdisanja, kao i simulacija strujanja zraka pri kratkom i intenzivnom udisaju. Korišten je $k-\omega$ *SST* model turbulencije [13].

Rezultati simulacija potvrdili su očekivanja o općenitom izgledu strujanja kroz nosnu šupljinu, te su upotpunili saznanja o detaljima tog strujanja. Dobiveni su podaci o raspodjeli protoka struje zraka kroz geometriju nosne šupljine, kao i podaci o raspodjeli brzine kroz presjeke geometrije. Prikazan je utjecaj opstrukcija unutar nosne šupljine na izgled strujanja, a korištenjem modela turbulencije dobivene su naznake o područjima pojave turbulentnosti strujanja.

6.2. Nastavak istraživanja

Zahvaljujući uspostavljenoj i opisanoj metodologiji izrade CFD simulacije strujanja zraka kroz nosnu šupljinu, moguće je stvoriti realnu sliku strujanja kroz stvarnu geometriju nosa pacijenta. Otvara se mogućnost izrade simulacije strujanja za veći broj pacijenata različitih geometrija nosa. Provođenje simulacija za veći broj pacijenata s različitim oboljenjima nosne šupljine, kao i niza zdravih pacijenata, omogućilo bi stvaranje širokog atlasa strujanja zraka kroz različite tipove geometrija nosne šupljine. Izrada takve baze podataka dala bi detaljan uvid u specifičnosti strujanja zraka zdravog ili oboljelog. Poznavanje tako detaljne slike strujanja dalo bi uvid u mehanizme odvijanja određenih procesa unutar nosne šupljine i sinusa, te otvorilo mogućnost otkrivanja novih spoznaja o prevenciji i liječenju oboljenja ovog područja. Na konkretnom slučaju pacijenta čiji su nalazi korišteni prilikom izrade ovog modela, moguće je provesti novu simulaciju nakon zahvata na septumu nosne šupljine pacijenta, ako novi nalazi budu dostupni nakon završetka zahvata. U tom bi slučaju bilo moguće usporediti strujanja kroz nosnu šupljinu istog pacijenta prije i poslije zahvata, te ustvrditi točan utjecaj zahvata na strujanje u nosu.

S obzirom na to da nosna šupljina sudjeluje i u pripremi zraka za disanje ovlaživanjem i zagrijavanjem zraka, model bi se mogao unaprijediti na način da obuhvaća modele izmjene topline te uzima u obzir vlažnost zraka. Moguća je izrada simulacije na teme-

lju postojeće geometrije koja bi prikazala pojave povezane s unošenjem različitih sitnih čestica sa strujom zraka u nosnu šupljinu, te pokazala moguća područja zadržavanja istih.

Konačno, moguća je provesti validaciju rezultata numeričke simulacije kako bi se utvrdila pouzdanost dobivenih rezultata. U tom bi se slučaju moglo provesti detaljno mjerenje slike strujanja akustičnom rinometrijom i sličnim dijagnostičkim metodama, a ako takve metode nije moguće provesti, preostaje mogućnost izrade 3D ispisa na temelju modela geometrije korištenog u simulaciji i provođenja eksperimenta.

Sažetak

ATLAS STRUJANJA U NOSNOJ ŠUPLJINI

Luka Balatinec

Ovaj se projekt bavi istraživanjem strujanja zraka u nosnoj šupljini s ciljem izrade detaljnog *Atlasa strujanja nosa* za geometriju dobivenu skeniranjem stvarne anatomije individualnog pacijenta. U radu je objašnjena složena anatomija i fiziologija nosne šupljine, te njen utjecaj na strujanje koje se razvija u nosu. Prikazana je metodologija izrade računalnog modela nosne šupljine i eksternog nosa na temelju slike izrađene računalnom tomografijom (CT). Pomoću izrađenog modela napravljena je numerička mreža i proveden je niz CFD simulacija unutar paketa za računalnu dinamiku fluida OpenFOAM, za tranzijentno nestlačivo strujanje zraka kroz nosnu šupljinu za proces normalnog udisanja, izdisanja i za proces kratkog udaha. Uključen je i prikaz rezultata numeričke simulacije za navedene oblike disanja, uz odgovarajući komentar uočenih pojava.

Ključne riječi: Atlas strujanja nosa, OpenFOAM, nosna šupljina, računalna dinamika fluida

Abstract

ATLAS OF NASAL FLOWS

Luka Balatinec

This project investigates the idea of researching air flows inside the nasal cavity for the purpose of creating a comprehensive atlas of nasal flows, based on medical scans of the real anatomy of a patient. This project includes a detailed overview of the anatomical and physiological complexities of the nasal cavity, and their influence on the nasal flow. The project describes the methodology used to create a computer model of the nasal cavity, based on scans created using computational tomography (CT), and their application in numerical simulations using the `OpenFOAM` toolbox. All numerical simulations used a mesh with an appropriate resolution to calculate a transient incompressible air-flow through the nasal cavity for normal inhalation, exhalation and a quick inhalation. The project also includes the acquired results for all simulated air flows with the appropriate explanation of noticed phenomena.

Key words: Atlas of nasal airflow, OpenFOAM, computational fluid dynamics, nasal cavity

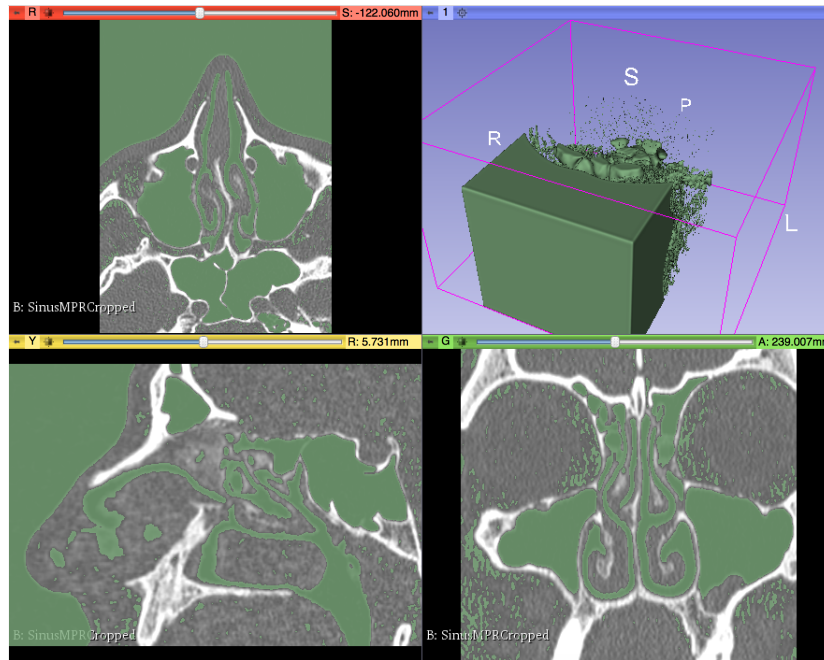
A | Prilog

A.1. Izrada geometrije u paketu *3DSlicer*

Za izradu volumena geometrije iz podataka dobivenih CT uređajem korišten je programski paket *3DSlicer*. Ovaj besplatni programski paket stvoren je upravo kako bi omogućio izradu trodimenzionalnih prikaza snimaka izrađenih tehnologijom radioloških snimanja. Može jednostavno učitati dokumente u većini formata korištenih u medicinskoj praksi, a omogućava i zapis u stereolitografskom (STL ili .stl) formatu, korištenom, među ostalim, u inženjerskoj praksi.

Pokazano je [27, 28] da *3DSlicer* omogućava prikaz učitano CT formata u sve tri ravnine pogleda (frontalna transverzalna i sagitalna) kao u obliku 2D slika te, njihovim superponiranjem, u 3D prostoru u obliku volumena. Razlučivanje između pojedinog tkiva organa koje želimo prikazati u prostoru, vrši se prema nijansama sivo-bijele skale CT snimke. Funkcijom odabira interesnog područja izolirano je područje nosa i nosne šupljine, kako bi se smanjila veličina konačnog modela i računalne mreže, i smanjila potreba za naknadnom obradom. Odabir tkiva vrši se pomoću svjetline točkaka na CT slici izraženoj u *Hounsfieldovim jedinicama* (HU). Za neki odabrani raspon svjetline u obzir se uzimaju samo ona tkiva prikazana točkama svjetline unutar zadanog raspona [29]. Za potrebe ovog rada ne želi se prikazati tkivo koje gradi nos i nosnu šupljinu, već se želi obuhvatiti volumen unutar anatomije koji je ispunjen zrakom. Upravo se iz tog razloga odabire vrijednost svjetline točkaka CT snimke koja odgovara gustoći zraka (Slika A.1). Problem koji se pojavljuje korištenjem ove metode je što se zrak, osim što ispunjava prostor nosne šupljine, nalazi i u okolini glave pacijenta i u sitnim nakupinama tkiva

gustoće slične zraku. To dovodi do pojave dva velika problema, od koji je prvi da je uz željeni volumen zraka unutar nosne šupljine vezan zrak izvan nosa, a drugi je problem pojava sitnih volumena koji nisu povezani sa željenim volumenom zraka. Navedeni se problemi rješavaju naknadnom doradom modela.

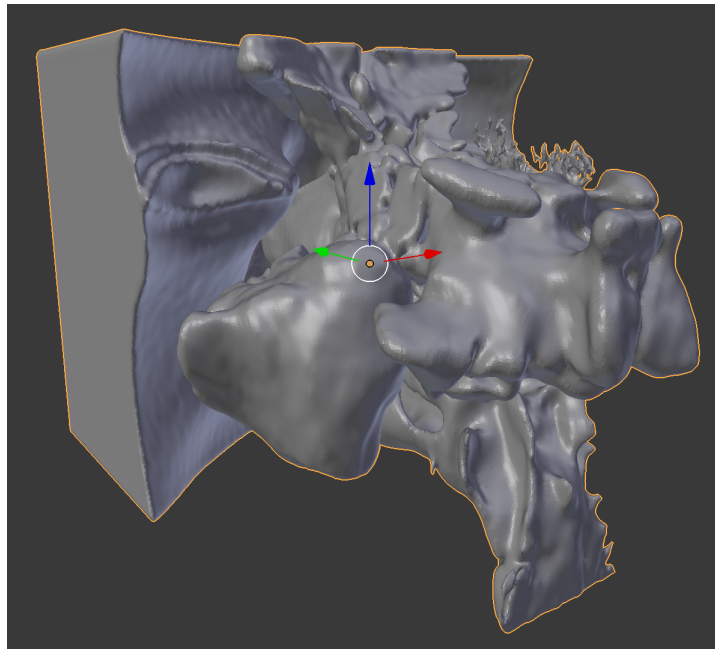


Slika A.1: Izrada volumena u paketu *3Dslicer*.

A.2. Obrada dobivenog modela u paketu *Blender*

Zbog nesavršenosti na volumenu napravljenom uz pomoć programskog paketa *3DSlicer*, potrebno je izvršiti određene dorade. U tu je svrhu korišten programski paket za manipulaciju i obradu 3D modela, vizualnih animacija i videa, pod nazivom *Blender*. Iako neki prijašnji autori [30], baveći se sličnim problemima strujanja u nosnoj šupljini, predlažu CAD (eng. *Computer aided design*) programske pakete, koji su u široj primjeni unutar područja inženjerske prakse (*Free CAD*), odabran je *Blender*. Razlog korištenja *Blendera* jest mogućnost manipulacije kompliciranim modelima, bez pojave problema s korištenjem prosječnog osobnog računala, činjenici da je program dostupan besplatno te lakoćom rukovanja plohami i volumenima.

Osnovni problem kojeg je bilo potrebno ispraviti na modelu volumena nosne šupljine izrađenim korištenjem paketa *3DSlicer*, je veći broj manjih volumena, tzv. volumnih otoka. To su mali volumeni, približne gustoće zraka ili prostori unutar tkiva ispunjeni zrakom, koji su obuhvaćeni istim postupkom izrade unutar nosne šupljine. Budući da nisu povezani s glavnim volumenom, ne zanimaju nas u simulaciji i nepotrebno povećavaju veličinu proračunske mreže, te ih je iz tog razloga potrebno ukloniti. Blender omogućava jednostavno označavanje svih volumena koji nisu izravno povezani s glavnim volumenom [31, 32] te njihovo zajedničko brisanje. Uklanjanjem volumenskih otoka, prvi je dio obrade u paketu Blender završen (Slika A.2), te je sada potrebno ukloniti volumen zraka koji okružuje lice pacijenta.

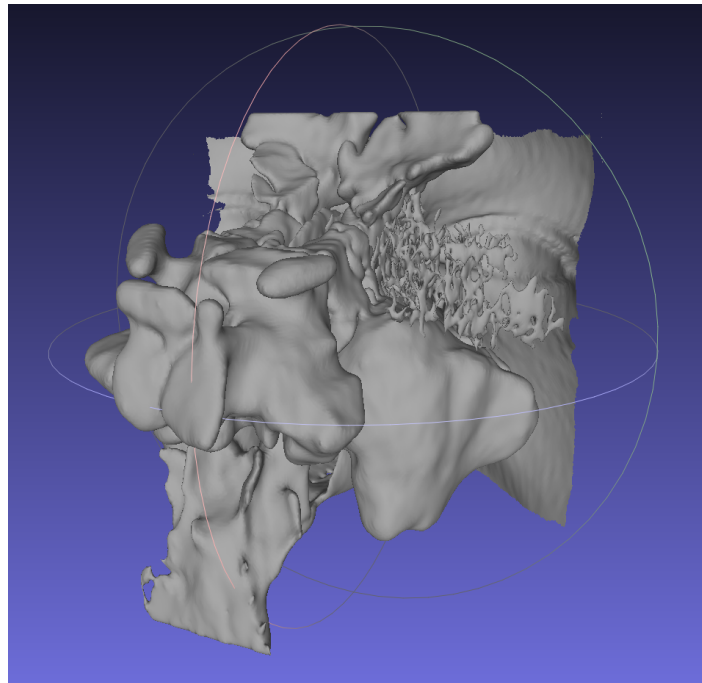


Slika A.2: Model nakon obrade u paketu *Blender*.

A.3. Obrada modela u paketu *MeshLab*

Kako bi se uspješno uklonio nepotrebni dio modela, potrebno je koristiti programski paket koji omogućava laku manipulaciju plohami, točkama i bridovima koji grade trodimenzionalni model. Odabran je paket *MeshLab* jer sadrži sve potrebne funkcije, omogućuje rad sa STL formatom zapisa te je dostupan za besplatno korištenje.

MeshLab omogućava brisanje dijelova geometrije označavanjem i brisanjem rubnih ploha koje ih tvore. Uz mogućnost brisanja samo vidljivih ploha, *MeshLab* nam omogućava jednostavno uklanjanje dodirnih točaka željenog dijela geometrije modela s neželjenim. Nakon toga preostaje označavanje bilo koje plohe na neželjenoj geometriji i brisanje svih ploha neželjene geometrije povezanih s označenom plohom. Ponavljanjem ovog postupka, uklonjena je geometrija volumena zraka ispred lica pacijenta i neki manji dijelovi neželjene anatomije (Slika A.3).



Slika A.3: Dio nepotrebne geometrije prije otklanjanja

A.4. Obrada rubnih ploha i povezivanje geometrije

Dosadašnji koraci u procesu izrade modela nosne šupljine svodili su se na brisanje nepotrebni dijelova prvobitne geometrije i čišćenje iste. Time smo dobili uređenu geometriju stijenke koja omeđuje unutrašnjost nosne šupljine i određuje nepropusnu plohu modela. Kako bismo postavili rubne uvjete matematičkog modela, potrebno je imati plohe na ulazu i izlazu iz prostora strujanja. Za što je korišten programski paket *Blender*.

Otvori nosnica su ulaz u nosnu šupljinu, ali je teško pretpostaviti oblik strujanja koji bi se javio na ulazu. Kako bi se osigurala stabilnost i točnost simulacije, domenu je bolje proširiti i postaviti dalje od samog ulaza u nosnu šupljinu. Odabrano je korištenje sfere kao omeđujuće plohe. Postavljena sfera okružuje vanjski nos i nosnice te njome obuhvaćeni volumen predstavlja dio atmosfere ispred nosa pacijenta.

Model nosne šupljine završava dijelom ždrijela kroz koje zrak putuje prema plućima, prolazeći kroz tracheu. Modeliranje izlaza daleko je jednostavnije od modeliranje ulaza u nosnu šupljinu, budući da se kao izlaz koristi ravna ploha. Izlaznu rubnu plohu postojećeg modela bilo je potrebno korigirati jer je model završavao neravnom plohom. Programski paket *Blender* jednostavno omogućava brisanje postojećeg izlaza i stvaranje nove, ravne plohe kao izlaza iz nosne šupljine.

Prilikom korištenja modela u numeričkoj simulaciji, potrebno je omogućiti prepoznavanje različitih rubnih ploha (eng. *patch*). Kako bi se svaki od sastavnih elemenata modela prepoznao kao zasebna rubna ploha, svaki je element modela pohranjen kao zaseban model u STL formatu, te naknadno povezan u cjelinu. Tako je svaki dio modela definiran kao zasebna rubna ploha u cjelovitom modelu, što omogućuje postavljanje rubnih uvjeta na svaku plohu.

B | Video zapisi

S obzirom na to da je izradom ovog projekta proučavano tranzijentno nestlačivo strujanje zraka kroz nosnu šupljinu, postavlja se pitanje prikaza tranzijentnog strujanja u sklopu pisanog rada. Rezultati su unutar rada prikazani slikama strujanja za određene vremenske intervale koji se smatraju reprezentativnim za cjelovito strujanje. Kako se radi o simulacijama tranzijentnog strujanja, najboljim se prikazom strujanja kroz geometriju model smatra video zapis. Iz tog je razlogu priložen optički disk (CD) na kojem je moguće pronaći odabrane video zapise rezultata simulacije:

- **1_udisaj.mp4** - Video zapis strujanja opisanog strujnicama pri normalnom udisaju.
- **2_udisaj_kratki.mp4** - Video zapis strujanja opisanog strujnicama pri kratkom udisaju.
- **3_izdisaj.mp4** - Video zapis strujanja opisanog strujnicama pri normalnom izdisaju.
- **4_presjek_udisaj.mp4** - Video zapis strujanja kroz poprečne presjeke nosne šupljine pri normalnom udisaju.
- **5_presjek_udisaj_kratki.mp4** - Video zapis strujanja kroz poprečne presjeke nosne šupljine pri kratkom izdisaju.
- **6_presjek_izdisaj.mp4** - Video zapis strujanja kroz poprečne presjeke nosne šupljine pri normalnom izdisaju.

Navedene je video zapise moguće naći i na mrežnim stranicama na adresi: <http://foam-extend.fsb.hr/dissemination/student-thesis/nasal-flow-simulation/>

C | Popis izvora slika

- Slika 2.1: „Gornji i donji dišni putevi” na stranici br. 6 preuzeta je 21.03.2018. s internetske stranice <http://afairgo.net/upper-respiratory-tract-infection/>
- Slika 2.2: „Dijelovi vanjskog nosa” na stranici br. 7 preuzeta je 21.03.2018. s internetske stranice <http://teachmeanatomy.info/head/organs/the-nose/external-nose/>
- Slika 2.3: „Hrskavični i koštani dio nosa” na stranici br. 8 preuzeta je 24.03.2018. s internetske stranice https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2302_External_Nose.jpg
- Slika 2.4: „Alarna hrskavica” na stranici br. 8 preuzeta je 24.03.2018. s internetske stranice <http://www.davisrhinoplasty.com/rhinoplasty-glossary-terms.html>
- Slika 2.5: „Područja unutarnjeg nosa” na stranici br. 9 preuzeta je 24.03.2018. s internetske stranice <http://teachmeanatomy.info/head/organs/the-nose/nasal-cavity/>
- Slika 2.6: „Građa unutarnjeg nosa” na stranici br. 9 preuzeta je 23.03.2018. s internetske stranice <http://www.ajnr.org/content/34/12/2233>
- Slika 2.7: „Šupljine unutar nosa” na stranici br. 11 preuzeta je 02.04.2018. s internetske stranice <http://teachmeanatomy.info/head/organs/the-nose/nasal-cavity/>
- Slika 2.8: „Paranasalni sinusi” na stranici br. 12 preuzeta je 02.04.2018. s internetske stranice <https://www.slideshare.net/mgmcricri1234/paranasal-sinuses-60434951>
- Slika 2.9: „*Kiesselbachov* pleksus” na stranici br. 14 preuzeta je 05.04.2018. s internetske stranice <https://aneskey.com/epistaxis-5/>

- Slika 2.10: „Oboljenja nosne šupljine” na stranici br. 19 preuzeta je 05.04.2018. s internetske stranice https://www.researchgate.net/figure/CT-scan-of-PNS+showing-deviated-nasal-septum-to-right-concha-bullosa-on-the-left-side_fig1_232807370
- Slika 3.1: „Računalna tomografija – CT” na stranici br. 23 preuzeta je 07.04.2018. s internetske stranice <http://planesofthebody.wikispaces.com/Planes+of+the+Body>

Literatura

- [1] H. Jasak. Openfoam: Open source cfd in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1:89–94, 2009.
- [2] Henry Gray. *Anatomy of the Human Body*. Lea & Febiger, Philadelphia, 20th edition, 1918.
- [3] Željko Bumber, Vladimir Katić, Marija Nikšić-Ivančić, Boris Pegan, Vlado Petric, and Nikola Šprem. *Otorinolarinologija*. Ljevak, Zagreb, 2004.
- [4] Antonio Kobaš. Dišni sustav. Škola za medicinske sestre Vinogradska, Zagreb, 2014.
- [5] Elaine N. Marieb. *Essential of Human Anatomy & Physiology*, volume 11. 11th edition, 2015.
- [6] Ranko Mladina. *Otorinolarinologija*. Školska knjiga, Zagreb, 2008.
- [7] Vladimir Katić and Drago Prgomet. *Otorinolarinologija i kirurgija glave i vrata*. Naklada Ljevak, Zagreb, 2009.
- [8] Terry Des Jardins. *Cardiopulmonary Anatomy & Physiology: Essentials of Respiratory Care*. Delmar, New York, 5th edition, 2012.
- [9] R.S. Dhillon and C.A. East. *Ear, Nose and Throat and Head and Neck Surgery*. Churchill Livingstone, London, 2nd edition, 2000.

- [10] D Elad, R Liebenthal, B L Wenig, and S Einav. Analysis of air flow patterns in the human nose. *Medical & biological engineering & computing*, 31(6):585–92, nov 1993.
- [11] Andrija Hebrang and Zvonko Kusić. *Radiološke i nuklearnomedicinske pretrage*. Naklada Ljevak, Zagreb, 2003.
- [12] Andrija Hebrang and Ratimira Klarić-Čustović. *Radiologija*. Medicinska naklada, Zagreb, 2007.
- [13] F.R. Menter. Zonal two equation k - ω turbulence models for aerodynamic flows. In *Proceedings of 24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, USA, 1993.
- [14] R. Keser. *Block-coupled solution algorithms for 2-equation turbulence models*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2016.
- [15] T. Uroić, H. Jasak, and H. Rusche. Implicitly coupled pressure–velocity solver. In H. Jasak J. M. Nobrega, editor, *OpenFOAM: Selected papers of the 11th Workshop*. Springer, 2017.
- [16] C.M. Rhie and W.L. Chow. A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*, 21:1525–1532, 1983.
- [17] S.V. Patankar and D.B. Spalding. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International journal of heat and mass transfer*, 15:1787–1806, 1972.
- [18] R. Issa. Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, 62:40–65, 1986.
- [19] T. Uroić and H. Jasak. Block-selective algebraic multigrid for implicitly coupled pressure-velocity system. *Computers&Fluids*, 167:100–110, 2018.
- [20] Franjo Juretić. *cfMesh User Guide*, volume 01. Creative Fields, Zagreb, 2010.
- [21] W. O. Fenn, H. Rahn, and A. B. Otis. Respiratory system. *Annual Review of Physiology*, 12:179–204, 1950.

- [22] V. Kulish. *Human Respiration: Anatomy and Physiology, Mathematical Modeling, Numerical Simulation and Applications*. WIT Press, Boston, 2006.
- [23] Allison Hunt, Andrea Marinelli, Devin Oakes, and Edward G Roberts. *Modeling and Measuring Nasal Airflow*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2008.
- [24] A J Bates, D J Doorly, R Cetto, H Calmet, A M Gambaruto, N S Tolley, G Houzeaux, and R C Schroter. Dynamics of airflow in a short inhalation. *Journal of the Royal Society Interface*, 12:15, 2014.
- [25] D.B. Spalding B.E. Launder. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3:269–289, 1974.
- [26] D.C. Wilcox. Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, 26:1299–1310, 1988.
- [27] S. Pujol. 3D Data Loading and Visualization.
- [28] Sonia Pujol, Kitt Shaffer, and Ron Kikinis. 3D Visualization of DICOM Images for Radiological Applications.
- [29] Sonia Pujol. Slicer Welcome Tutorial, 2016.
- [30] Chiara Pesci. *OpenNOSE : an open-source procedure for the simulation of nasal aerodynamics*. PhD thesis, Politecnico di Milano, 2013.
- [31] Jonathan Lampel. *The Beginners Guide to Blender*, 2015.
- [32] Blender Community. *Blender User Manual*, 2015.