

## Statusartikel

Ugeskr Læger 2022;184:V06210516

# Vurdering af næsens funktion ved computational fluid dynamics

Daniel Bräuner Skansing<sup>1</sup>, Matthias Mandø<sup>2</sup>, Michael Boelstoft Holte<sup>3</sup> & Knud Larsen<sup>1</sup>

1) Øre-Næse-Halsafdelingen, Sydvestjysk Sygehus, Esbjerg, 2) Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet Esbjerg, 3) Kæbekirurgisk Afdeling, Sydvestjysk Sygehus, Esbjerg

Ugeskr Læger 2022;184:V06210516

**HOVEDBUDSKABER**

- I Danmark anvendes der ikke objektive målinger før kirurgi for nasal obstruktion.
- Computational fluid dynamics (CFD) er en ny og avanceret objektiv analysemetode med god korrelation til subjektiv perception.
- CFD kan potentielt bidrage til bedre diagnostik før indgreb i næsen og muliggør virtuel kirurgi.

Næsen er et komplekst organ, der har mange funktioner. Det er en del af de øvre luftveje, hvor luften filtreres, opvarmes og fugtes, inden den når lungerne. Slimhinderne i næsen fungerer som en del af vores immunforsvar og som en barriere for mikroorganismer. Lugtesansen er placeret øverst i næsehulen og når n. olfactorius via lugtnervefibrene. Ovenstående er bl.a. betinget af, hvordan luftens strømninger fordeler sig i næsehulen og passerer til svælget og nedre luftveje. Dermed har næsens opbygning stor betydning for dens funktion. Næsehulen opdeles i midten af næsens skillevæg, septum, der består af en brusket og en knoglet del. I lateralvæggen sidder de tre parrede muslingebeben, concha nasalis inferior, media og superior, som øger slimhindens overfladeareal og modulerer luftstrømmen igennem næsen. Når der opereres i næsen, vil der særligt ved indgreb på septum, septumplastik, og indgreb på concha inferior, konkotomi, ændres i luftstrømmen igennem næsen.

Derfor synes det oplagt, at der ved indgreb i næsen bliver foretaget en objektiv måling af næsens funktion før og efter, ligesom der ved ørekirurgi foretages audiometri. Objektive måleinstrumenter såsom rinomanometri, akustisk rinometri og peak nasal inspiratorisk flow er imidlertid ikke implementeret i næsekirurgien i Danmark og ej heller i flere andre lande [1, 2], da det ikke har bidraget væsentligt til bedre behandlingsresultater. Indikation for operation beror således kun på subjektive symptomer samt rinoskopi. Årsagen til dette er, at der er dårlig korrelation mellem patienternes subjektive fornemmelse af nasal obstruktion og de objektive målinger [3]. Septumdeviation blev i et stort internationalt multicenterstudie observeret hos op til 90% af patienterne, der af forskellige årsager blev set i øre-næse-hals-regi [4]. I mange tilfælde klager patienterne ikke over nasal obstruktion. Dette er en del af forklaringen på, at resultaterne af septumplastik er middelmådige. Et nyligt publiceret svensk studie viste, at der efter 12 måneder kun var bedring hos 63% af 888 patienter efter septumplastik [5]. Generelt er der ikke fuld konsensus om, hvilke patienter der har gavn af septumplastik. Det kan en ny objektiv analysemetode muligvis forbedre.

Computational fluid dynamics (CFD) er en ny og avanceret objektiv metode til analysering af næsens funktion,

og den har et stort potentiale til at udvide vores forståelse af næsens fysiologi og anatomi, forbedre kirurgien og inddrage virtuel kirurgi. Dermed muliggøres præoperativ planlægning af det kirurgiske indgreb og simulering af indgrebets effekt på luftstrømmen i næsen. Særligt i de seneste år er udviklingen gået stærkt, både forskningsmæssigt og teknologisk.

Formålet med denne artikel er at introducere begrebet CFD i Danmark, gennemgå hvilke nye informationer og fordele det giver ift. nuværende objektive målemetoder, samt hvilke udfordringer og begrænsninger der endnu er.

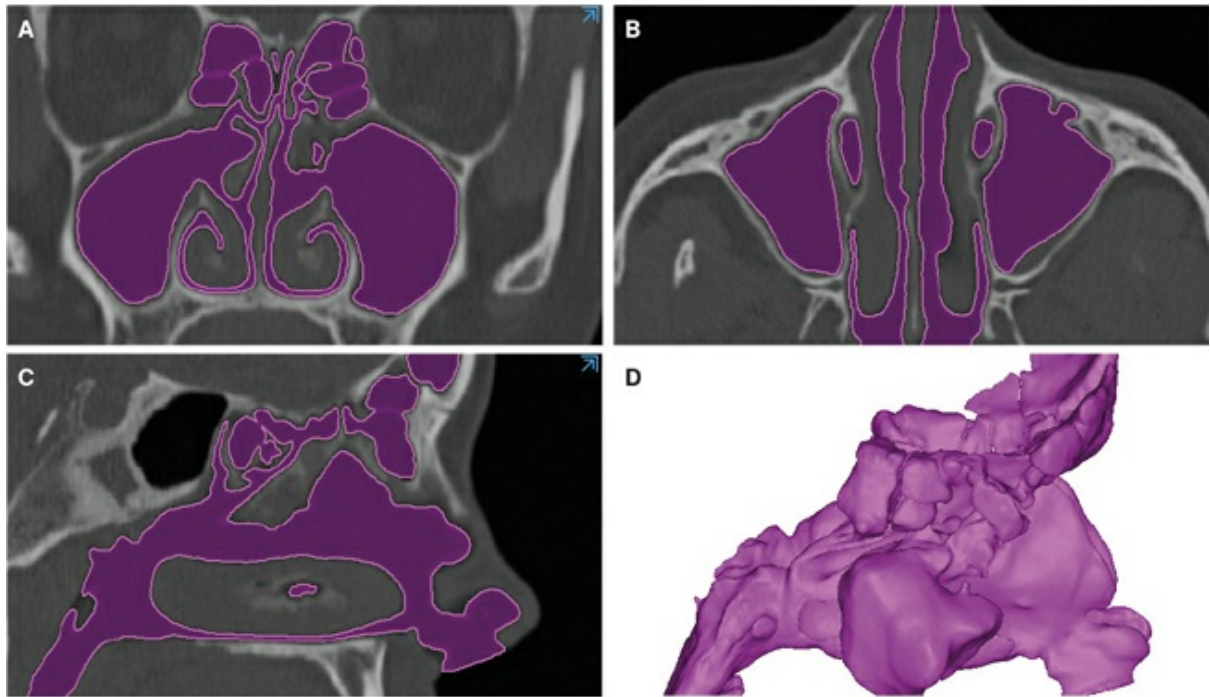
## COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

CFD er en objektiv metode, der er adapteret fra industrien. Ved hjælp af matematiske algoritmer og computersimulation undersøges væsker og gassers bevægelse og interaktion med solide overflader. Dette princip anvendes i den nasale luftvej, hvor der kan udarbejdes nøjagtige modeller af luftens strømninger, fugtighed og varmeudveksling fra næsefløjene til svælget samt vurderes partikeldeponering i næsehulen.

I starten af 1990'erne begyndte de første studier af nasal luftstrøm med CFD [6] at se lys. Dog er det først i de seneste ti år, at det virkelig er begyndt at vinde indpas, da computerteknologien nu tillader acceptable bearbejdningsstider for en tilfredsstillende fremstilling af den nasale luftvej [7].

Nasal-CFD baseres hyppigst på en CT af næse- og bihulesystemet (**Figur 1**), men kan også udføres ud fra en MR-skanning. Denne bearbejdes og segmenteres med software, der danner en virtuel tredimensional (3D)-rekonstruktion, som er opbygget af flere hundredetusinde til millioner af de celler [7] (**Figur 2**), der danner slimhindeoverfladernes afgrænsning for den komplekse anatomi i næsen. Der kan nu udføres forskellige computersimuleringer på 3D-modellen, hvor man forud for dette har sat randbetingelser for bl.a. temperaturer, trykforhold samt type og hastighed af luftstrøm igennem næsen for at simulere nasal vejrtrækning. Disse computersimuleringer kaldes CFD, der giver mulighed for at undersøge, hvordan luftstrømmen meget præcist fordeler sig i næse-bihule-systemet hos den specifikke patient, og hvilke afledte effekter det giver. CFD udmærker sig ved, at man får en nøjagtig grafisk fremstilling af dette, og hvilke steder i næsen der har størst indvirkning på dette. Således giver CFD et langt mere detaljeret og nuanceret billede af fysiologien i næsen, end det tidligere muligt at få. Software kan nu ændre i 3D-modellen, så man kan simulere kirurgi i næsen og herefter afprøve effekten med CFD, hvilket muliggør virtuel kirurgi.

**FIGUR 1** CT af den nasale luftvej i hhv. koronalt (A), aksialt (B) og sagittalt (C) plan, hvor næsehulen og bihulerne er farvet med lilla. D. En tredimensional rekonstruktion ud fra CT'en, hvorfra der nu er en model af den nasale luftvej.



**FIGUR 2** Den tredimensionale models overflade rekonstrueres med flere hundredetusinder til millioner af celler og danner en såkaldt meshmodel, hvorpå der kan udføres computational fluid dynamics-analyser såsom luftstrømninger, fugtighed og varmeudveksling.



---

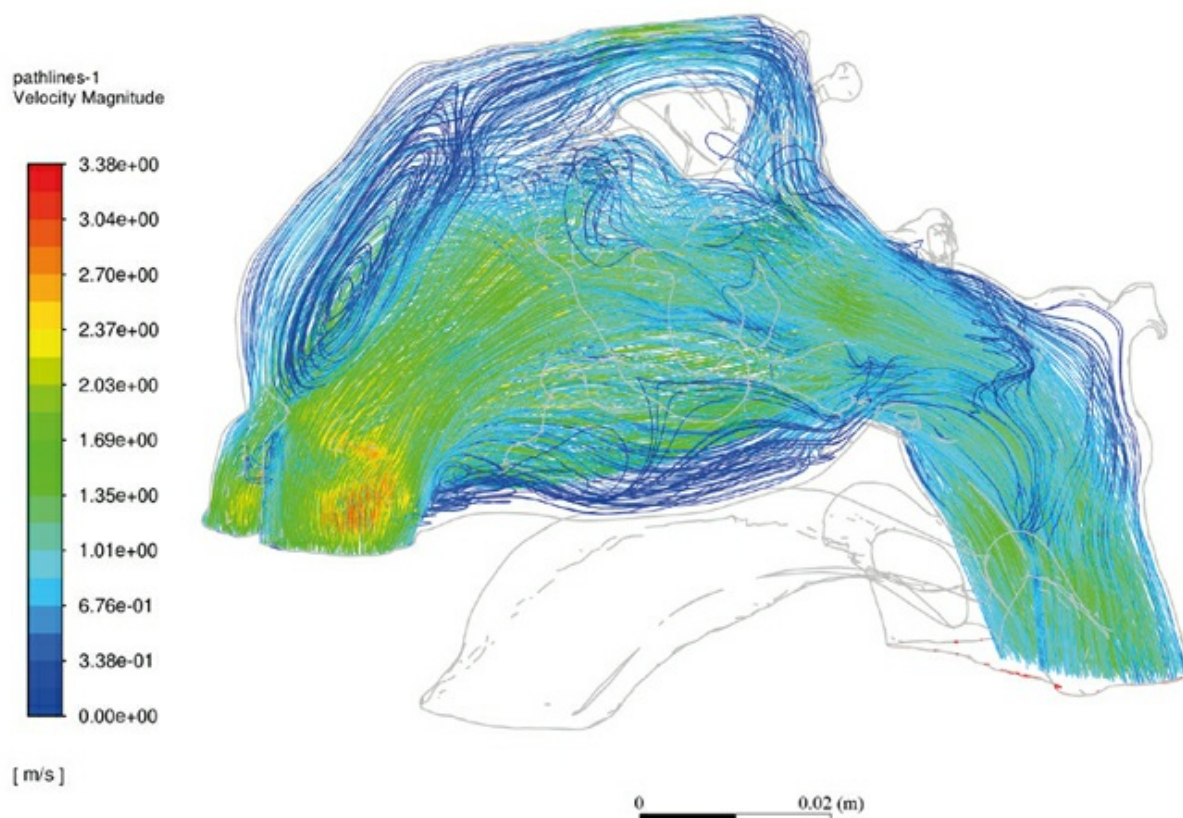
Herunder gennemgås kort de mest interessante og lovende undersøgelser, som CFD muliggør.

## ANVENDELSESMULIGHEDER FOR COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

### Luftstrøm og fordeling

De gængse objektive måleinstrumenter måler hhv. modstand, areal og hastighed af luftstrøm igennem næsen. CFD kan også simulere dette, men adskiller sig ved også at kunne vise, hvordan luften meget præcist fordeler sig i næsen og vise strømningsretninger (**Figur 3**). Således viser flere studier, at den primære luftstrøm igennem en rask næse med et lige septum primært foregår i området mellem septum, concha inferior og concha media samt meatus medius [2, 8-10].

**FIGUR 3** Illustrativ computational fluid dynamics-analyse af luftstrømninger igennem den nasale luftvej. Fra indgangen i næseborene til venstre mod svælg til højre i billedet. På billedet ses ved hjælp af farverne, at der er mest hastighed i nasal valve-regionen i starten af næsen, og at de primære luftstrømninger går igennem den midterste del af næsen mod svælg.



Derimod vil en anterior septumdeviation eller meget hypertrofiske concha inferior føre det mod loftet eller mod bunden af cavum nasi [8].

Flere studier viser også, at der er god korrelation mellem netop luftstrøm igennem den midterste del af næsen som beskrevet ovenfor og patienternes subjektive fornemmelse af luftpassage [2].

CFD har allerede medvirket til at udvide vores forståelse af, hvordan luftstrømmen bevæger sig igennem næsen [11].

### Heat flux

Temperatur og luftfugtighed i næsen kan simuleres, herunder heat flux som er et udtryk for varmeudveksling mellem luften og næsens slimhinde. Dette illustrerer, hvordan varmeudvekslingen foregår igennem den nasale luftvej hos patienter med eller uden patologi. Derved undgår man at skulle placere små termoreceptorer i næsehulen, hvilket kan risikere at ændre luftstrømmen og dermed kan forvrænge billedet af varmeudveksling [11, 12].

Heat flux får særligt meget opmærksomhed i CFD-forskningen, da flere nylige studier har vist god korrelation mellem heat flux og subjektiv perception af nasal stenose [1, 2, 13-16]. Dette stemmer også overens med tidligere studier, hvor man har koblet subjektiv perception med tilstedeværelsen af følereceptorer i næsens slimhinde, såkaldte trigeminal cool thermoreceptors [17]. Indånding af f.eks. mentol forbedrer betydeligt den subjektive fornemmelse af luft igennem næsen, uden at der sker strukturelle ændringer [18]. De samme receptorer formodes at være ansvarlige for den subjektive fornemmelse af varmeudveksling i næsens slimhinde ved inspiration [15]. Således er det formentligt mere klinisk betydende, hvordan luftstrømmen igennem næsen påvirker følereceptorerne, end hvilken modstand der kan måles i næsen.

Dette understreger, hvorfor objektive målemetoder som rinomanometri og akustisk rinometri, der netop måler nasal modstand og areal, ikke korrelerer så godt til den subjektive fornemmelse af nasal stenose [3].

### Wall shear stress

CFD kan også vise wall shear stress (WSS), der indikerer, hvor meget friktion luftstrømmen udøver på slimhinden. Det kan bl.a. anvendes til at forklare, hvorfor nogle septumperforationer giver symptomer, mens andre ikke gør. I et nyligt publiceret studie er det påvist, at WSS er markant forøget på den posteriore margin ved de symptomgivende septumperforationer og derved danner udtørring, skorper og blødning [19].

### Simulering af fordeling af næsespray

Næsespray kan konstrueres med forskellige partikelstørrelser, hvor CFD kan simulere fordeling af partikler i næse- og bihuler alt efter luftstrømmens hastighed igennem næsen. Det er interessant ved f.eks. bihulekirurgi, hvor et af formålene er at få lokalbehandlingen til at virke på et større område i slimhinderne postoperativt. Der er bl.a. lavet et studie af, hvilken effekt partikelstørrelse i næsespray samt størrelse af åbning til kæbehulen har på forsyning af lokalbehandling til kæbehulen [20]. Studiet viser også, at der før kirurgi nærmest ingen ventilation var i kæbehulen, men denne forøges markant efter kirurgi.

Det er også interessant at simulere, hvorledes anatomiske forandringer som f.eks. en septumdeviation betydeligt nedsætter deponering af næsespray i den obstruerede side [21].

### Virtuel kirurgi

CFD indeholder et stort potentiale for virtuel kirurgi, hvilket giver mulighed for at afprøve effekten af forskellige kirurgiske indgreb i næsen forud for operationen. Herved kan man undlade at operere på strukturer, der har lille eller ingen betydning for operationens resultat. Det er som tidligere nævnt velkendt, at septumplastik har varierende resultater, og her vil virtuel kirurgi med CFD være en oplagt mulighed for at optimere indgrebet. Der er allerede flere studier af virtuel kirurgi og septumplastik, der viser lovende resultater [22, 23]. En arbejdsgruppe fra Spanien og Australien [24] har udviklet software, der foresimpler CFD-processen, således at vejen fra en CT til CFD-simulering kan foregå med samme software. Derudover har forfatterne tilføjet et relativt brugervenligt modul til virtuel kirurgi, hvor der kan fjernes og tilføjes væv. Herefter kan CFD-simulering gentages på den nye anatomi, og forventet effekt af indgrebet kan evalueres. Det er stadigvæk virtuel kirurgi på et tidligt stadie, men er allerede nu anvendeligt i forskningsøjemed og formentligt snart som værktøj i klinikken.

## DISKUSSION

CFD er en spændende ny objektiv metode til analysering af næsens funktion. Forskningen inden for området har været i kraftig vækst igennem de senere år [7].

I Danmark anvendes der ikke objektive målinger til vurdering af næsens funktion pga. den ringe korrelation imellem objektive fund og subjektiv perception [3]. CFD har vist, at de nye objektive målinger såsom heat flux og luftstrøm igennem den midterste del af næsen viser god korrelation med patienternes fornemmelse af luft i næsen, hvilket gør metoden potentielt mere klinisk relevant end de tidligere objektive målemetoder. Som tidligere diskuteret af Eccles og Hopkins vil man næppe finde en objektiv metode, der korrelerer perfekt med subjektiv fornemmelse, da denne bl.a. er betinget af alder, socioøkonomisk status, køn og psyke [25, 26]. De supplerer hinanden, og CFD bringer nye muligheder i spil, herunder et stort potentiale for virtuel kirurgi, som kan blive et kærkomment hjælpemiddel til afgørelse af, hvilken kirurgi der egner sig bedst til den specifikke patient.

CFD har trods det store potentiale og den store interesse fortsat begrænsninger. Først og fremmest gøres der flere antagelser, f.eks. at væggene i næsen er ueftergivelige og at luftstrømmen er konstant. De matematiske algoritmer for udregning af type af luftstrøm er ikke eksakte, og der tages ikke hensyn til den nasale cyklus [11, 27, 28]. Derudover er metoden fortsat relativt tidskrævende og kræver stor computerkraft [16]. Foruden dette vil der ofte være behov for assistance ved en CFD-ekspert, selvom det er på vej hen mod automatisering via software [24]. Virtuel kirurgi er i tidlig fase og er indtil videre afhængig af manuel ændring af 3D-modellen, selvom der også er algoritmer under udvikling for dette [22]. Der er fortsat behov for at validere metoden, hvorfor større studier, der sammenligner CFD før og efter kirurgi med kliniske test og subjektive spørgeskemaer, endnu mangler [11]. Det vil være helt oplagt at anvende metoden til septumplastik og konkotomi.

På trods af ovenstående begrænsninger er der grund til at være særdeles optimistisk mht. denne nye metode, der allerede har bedret vores forståelse for næsens fysiologi. Nye teknologier og studier forbedrer konstant metoden, og derfor er en introduktion til metoden i Danmark aktuell. Arbejdsgruppen bag denne artikel er i gang med at undersøge CFD som objektiv analysemetode.

## KONKLUSION

CFD har potentiale til at kunne forbedre rinologien både som objektiv analysemetode og som værktøj til at udføre virtuel kirurgi før indgreb i næsen.

**Korrespondance** *Daniel Bräuner Skansing*. E-mail: [skansing@dadlnet.dk](mailto:skansing@dadlnet.dk)

**Antaget** 24. november 2021

**Publiceret på** [ugeskriftet.dk](http://ugeskriftet.dk) 31. januar 2022

**Interessekonflikter** ingen. Forfatterens ICMJE-formularer er tilgængelige sammen med artiklen på [ugeskriftet.dk](http://ugeskriftet.dk)

**Referencer** findes i artiklen publiceret på [ugeskriftet.dk](http://ugeskriftet.dk)

**Artikelreference** Ugeskr Læger 2022;184:V06210516

## SUMMARY

### Assessment of nasal function by computational fluid dynamics

Daniel Bräuner Skansing, Matthias Mandø, Michael Boelstoft Holte & Knud Larsen

Ugeskr Læger 2022;184:V06210516

This review summarises the knowledge of computational fluid dynamics (CFD) which combines fluid mechanics, mathematics and computer simulation to analyse airflow and air conditioning of the nasal airway. Traditional objective measures are hampered by low correlation to subjective outcome, whereas CFD variables such as heat flux and nasal middle airflow show good correlation. Studies also show great potential for virtual

surgery, when the nasal procedure is simulated, and CFD analyse the impact on airflow and conditioning to optimize surgical planning. CFD could be of great value in rhinology and improve nasal surgery.

## REFERENCER

1. Bailey RS, Casey KP, Pawar SS, Garcia GJM. Correlation of nasal mucosal temperature with subjective nasal patency in healthy individuals. *JAMA Facial Plast Surg.* 2017;19(1):46-52.
2. Casey KP, Borojeni AAT, Koenig LJ et al. Correlation between subjective nasal patency and intranasal airflow distribution. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;156(4):741-50.
3. André RF, Vuyc HD, Ahmed A et al. Correlation between subjective and objective evaluation of the nasal airway. *Clin Otolaryngol.* 2009;34(6):518-25.
4. Mladina R, &uji&; E, Šubari&; M, Vukovi&; K. Nasal septal deformities in ear, nose, and throat patients. *Am J Otolaryngo.* 2008;29(2):75-82.
5. Pedersen L, Schiöler L, Finjan S et al. Prognostic factors for outcome after septoplasty in 888 patients from the Swedish National Septoplasty Register. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2019;276(8):2223-8.
6. Keyhani K, Scherer PW, Mozell MM. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity. *J Biomech Eng.* 1995;117(4):429-41.
7. Inthavong K, Das P, Singh N, Sznitman J. In silico approaches to respiratory nasal flows: a review. *J Biomech.* 2019;97:109434.
8. Chen XB, Lee HP, Chong VF, Wang de Y. Assessment of septal deviation effects on nasal air flow:a computational fluid dynamics model. *Laryngoscope.* 2009;119(9):1730-6.
9. Zhao K, Jiang J. What is normal nasal airflow? *Int Forum Allergy Rhinol.* 2014;4(6):435-46.
10. Borojeni AAT, Garcia GJM, Moghaddam MG et al. Normative ranges of nasal airflow variables in healthy adults. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2020;15(1):87-98.
11. Leite SHP, Jain R, Douglas RG. The clinical implications of computerised fluid dynamic modelling in rhinology. *Rhinology.* 2019;57(1):2-9.
12. Lindemann J, Leiacker R, Rettinger G, Keck T. Nasal mucosal temperature during respiration. *Clin Otolaryngol Allied Sci.* 2002;27(3):135-9.
13. Kimbell JS, Frank DO, Laud P et al. Changes in nasal airflow and heat transfer correlate with symptom improvement after surgery for nasal obstruction. *J Biomech.* 2013;46(15):2634-43.
14. Sullivan CD, Garcia GJM, Frank-Ito DO et al. Perception of better nasal patency correlates with increased mucosal cooling after surgery for nasal obstruction. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2014;150(1):139-47.
15. Zhao K, Jiang J, Blacker K et al. Regional peak mucosal cooling predicts the perception of nasal patency. *Laryngoscope.* 2014;124(3):589-95.
16. Radulesco T, Meister L, Bouchet G et al. Functional relevance of computational fluid dynamics in the field of nasal obstruction: a literature review. *Clin Otolaryngol.* 2019;44(5):801-9.
17. Sozansky J, Houser SM. The physiological mechanism for sensing nasal airflow: a literature review. *Int Forum Allergy Rhinol.* 2014;4(10):834-8.
18. Eccles R. Menthol: effects on nasal sensation of airflow and the drive to breathe. *Curr Allergy Asthma Rep.* 2003;3(3):210-4.
19. Li C, Maza G, Farag AA et al. Asymptomatic vs symptomatic septal perforations: a computational fluid dynamics examination. *Int Forum Allergy Rhinol.* 2019;9(8):883-90.
20. Wofford MR, Kimbell JS, Frank-Ito DO et al. A computational study of functional endoscopic sinus surgery and maxillary sinus drug delivery. *Rhinology.* 2015;53(1):41-8.
21. Frank DO, Kimbell JS, Cannon D et al. Deviated nasal septum hinders intranasal sprays: a computer simulation study. *Rhinology.* 2012;50(3):311-8.
22. Moghaddam MG, Garcia GJM, Frank-Ito DO et al. Virtual septoplasty: a method to predict surgical outcomes for patients with nasal airway obstruction. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2020;15(4):725-35.
23. Radulesco T, Meister L, Bouchet G et al. Computational fluid dynamics and septal deviations-Virtual surgery can predict



- post-surgery results: a preliminary study including two patients. *Clin Otolaryngol.* 2020;45(2):286-91.
24. Burgos MA, Sanmiguel-Rojas E, Singh N, Esteban-Ortega F. DigBody: a new 3D modeling tool for nasal virtual surgery. *Comput Biol Med* 2018;98:118-25.
  25. Hopkins C. Re: correlation between subjective and objective evaluation of the nasal airway. *Clin Otolaryngol.* 2010;35(2):147-8;author reply 148.
  26. Eccles R, Doddi NM, Leong S. Re: correlation between subjective and objective evaluation of the nasal airway. *Clin Otolaryngol.* 2010;35(2):149;author reply 150.
  27. Li C, Jiang J, Dong H, Zhao K. Computational modeling and validation of human nasal airflow under various breathing conditions. *J Biomech.* 2017;64:59-68.
  28. Moore M, Eccles R. Normal nasal patency: problems in obtaining standard reference values for the surgeon. *J Laryngol Otol.* 2012;126(6):563-9.