

Sveučilište u Zagrebu  
Medicinski fakultet

Filip Đerke, Luka Filipović-Grčić

**Subatmosferski tlak unutar duralnih sinusa:  
novi pogledi**

Zagreb, 2016.

Ovaj je rad izrađen u Laboratoriju za neuropatofiziologiju Hrvatskog instituta za istraživanje mozga pod vodstvom prof. dr. sc. Marijana Klarice i eksperimentalnom pomoći mr. sc. Branka Mišea, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

## **Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu:**

HIIM	Hrvatski institut za istraživanje mozga
SR	<i>Sinus rectus</i>
SS	<i>Sinus sigmoideus</i>
SSI	<i>Sinus sagittalis inferior</i>
SSS	<i>Sinus sagittalis superior</i>
ST	<i>Sinus transversus</i>

# Sadržaj:

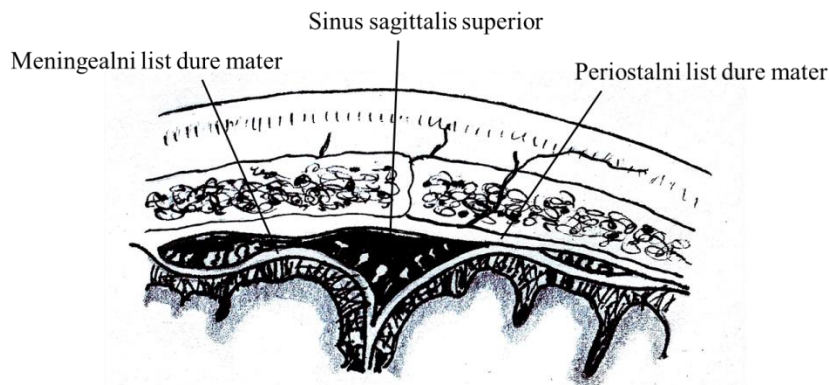
1. Uvod .....	1
2. Hipoteza.....	5
3. Opći cilj i specifični ciljevi rada .....	6
4. Materijali i metode.....	7
4.1. Izrada modela duralnih sinusa .....	7
4.2. Mjerenje tlakova unutar modela duralnih sinusa .....	9
5. Rezultati.....	11
6. Rasprava.....	12
7. Zaključak.....	14
8. Zahvale.....	15
9. Popis literature.....	16
10. Sažetak.....	18
11. Summary.....	19

## 1. Uvod

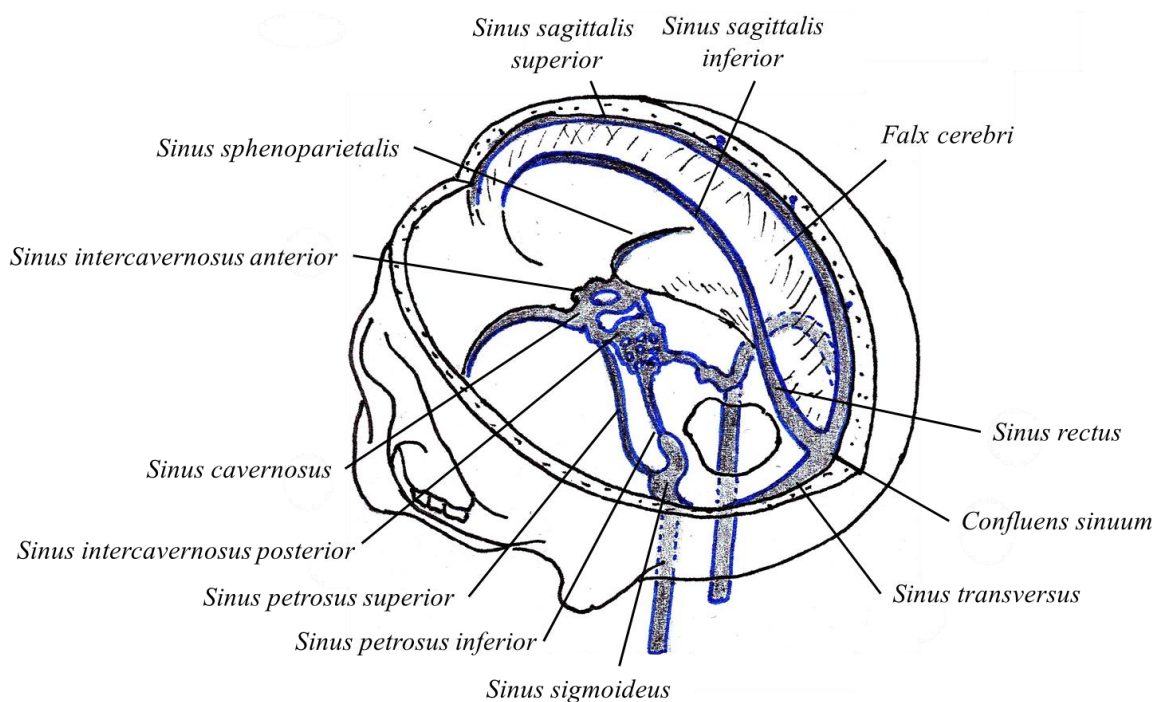
Kranijalni duralni sinusi su venski prostori djelomično krutih stijenki građenih od dure i bez zalistaka. Primaju krv iz unutrašnjosti lubanjske šupljine, tj. iz moždanih vena i odvođuju u bulbus superior vene jugularis interne. Njihova stijenka je djelomično rigidna, građena od meningealnog i periostalnog lista kranijalne dure visoke elastičnosti, a male plastičnosti zbog kolagena koji gradi njezine stijenke (Slika 1), za razliku od stijenke spinalne dure koja sadrži razmjerno više elastina (Maikos i sur. 2008; Fernández-de-las-Peñas i sur. 2009). Na ovaj način se osigurava ravnomjeran tijek krvi i sprječava da se promjene u volumenu cirkulirajuće krvi značajnije prenose na mozak. Kao što je spomenuto, kranijalni sinusi predstavljaju složenu vensku strukturu koja se sastoji od sljedećih dijelova (Slika 2): *Sinus sagittalis superior* (SSS), *sinus sagittalis inferior* (SSI), koji se ulijeva u *sinus rectus* (SR), te *sinus occipitalis*. Oni se ulijevaju u *confluens sinuum* iz kojeg na lijevu i desnu stranu izlazi *sinus transversus* (ST), na koji se nastavlja *sinus sigmoideus* (SS). Osim njih postoje još i *sinus cavernosus*, *sinus petrosus superior* i *sinus sphenoparietalis* (Fanghaenel i sur. 2009). Prema istraživanju s trodimenzionalnom CT venografijom iz 2010., krv iz SSS se dominantno drenira preko desnog ST, a krv iz SR uglavnom preko kontralateralnog ST (Fukusumi i sur. 2010).

Dimenzije duralnih sinusa do sada nisu detaljnije opisane u dostupnoj literaturi. Od postojećih podataka čini se da su dimenzije SSS-a sljedeće: dužina  $25,6 \pm 1,6$  cm i promjer  $6,7 \pm 2,0$  mm horizontalno i  $5,3 \pm 1,8$  mm vertikalno, u razini koronarne suture (Brockmann i sur. 2010). Međutim, nedostaju detaljne anatomske analize odnosa s drugim sinusima, te detaljni podatci o njihovim dimenzijama. Prema tome, nedostaje i ukupni volumen trodimenzionalne volumetrije duralnih sinusa, pa je nepoznat i volumen venske krvi unutar duralnih sinusa. Tlak unutar duralnih sinusa je mjereno i poznato je da je vrijednost tlaka u uspravnom položaju niža od atmosferskog, tj. negativna (Cottrel i sur. 2010). Takve tvrdnje potkrepljuju i radovi iz 1983. i 1986. u kojem je dostupnost duralnih sinusa za vrijeme kraniotomije iskorištena za mjerenje tlaka u njima pri različitim kirurškim položajima (Iwabuchi i sur. 1983 i 1986). I ovdje su pri sjedećem položaju izmjereni negativni tlakovi. Nedostatak istraživanja, međutim, leži u činjenici da su tlakovi mjereni samo na jednom mjestu, točnije u *confluens sinuum* (Iwabuchi i sur. 1983 i 1986). Proučavanjem literature teško se može zaključiti iz ostalih dostupnih studija u kojem položaju i na kojoj točki unutar sinusa je mjereno taj tlak.

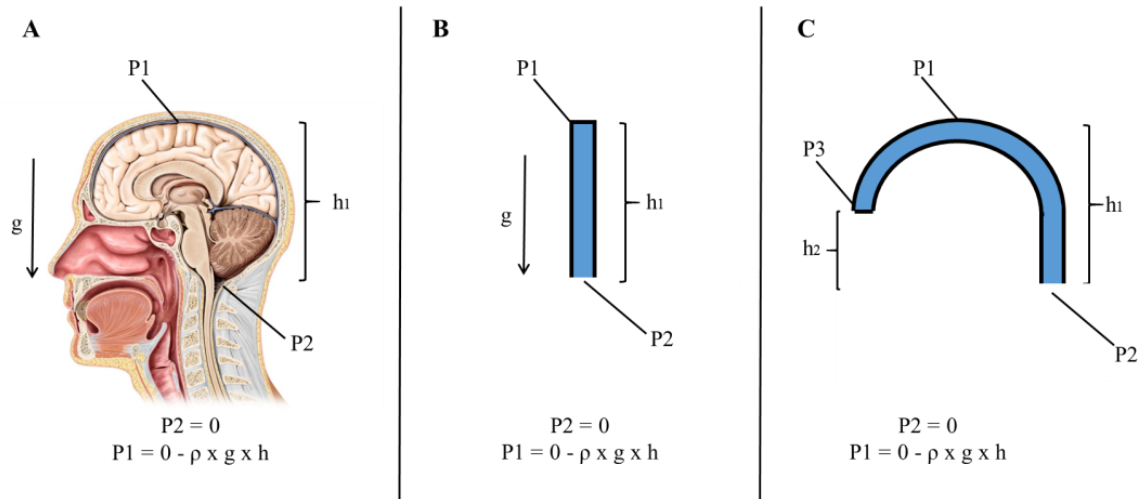
U našem je laboratoriju ranije publicirano da intrakranijski tlak cerebrospinalnog likvora pri uspravnom položaju također ima negativne vrijednosti (Klarica i sur. 2014). Naime, postavljena je hipoteza da unutar kranija, tj. unutar intrakranijskog duralnog prostora tekućina (krv i likvor) imaju sudbinu kao i tekućina unutar krute cijevi koja ima jedan otvor na donjem dijelu izložen atmosferskom tlaku (Slika 3 B). Sukladno toj hipotezi, u ovom radu želimo provjeriti ponaša li se tlak u duralnim sinusima slično kao i likvorski tlak unutar intrakranijskih duralnih prostora, tj. ovisi li o anatomskim dimenzijama duralnih sinusa, mjestu gdje se mjeri i položaju tijela u kojem se mjerenje vrši. Da bismo to ispitali izradili smo novi model duralnih sinusa od krutih plastičnih cjevčica koji dimenzijama imitira glavne duralne sinuse (SSS i ST) prema snimkama magnetne duralne venografije nekoliko pacijenata obrađenih u poliklinici Neuron Hrvatskog instituta za istraživanje mozga (HIIM).



Slika 1. Prikaz frontalnog presjeka tvrde duralne ovojnice mozga, njezinog periostalnog (vanjskog) i meningealnog (unutarnjeg) lista, te duralnog sinusa (SSS) koji ti listovi čine.



Slika 2. Shema kranijalnih duralnih venskih sinusa. Vidi se položaj i međusobni odnosi sinusa označenih linijama: Sinus sagittalis superior, Sinus sagittalis inferior, Sinus rectus, Confluens sinuum, Sinus transversus, Sinus sigmoideus, Sinus cavernosus, Sinus intercavernosus anterior, Sinus intercavernosus posterior, Sinus sphenoparietalis, Sinus petrosus superior, Sinus petrosus inferior.



Slika 3. **A.** Shema naše hipoteze prema kojoj bi tekućina (krv i likvor) unutar kranija, tj. unutar intrakranijskog duralnog prostora imala sudbinu kao i tekućina unutar krute cijevi koje ima jedan otvor na donjem dijelu izložen atmosferskom tlaku (B). U tom slučaju bi tlak u duralnim sinusima ( $P_1$ ) pri uspravnom položaju tijela bio negativan, tj. imao bi vrijednost koja odgovara visini ( $h$ ) stupca krvi između ušća unutarnje jugularne vene i mjesta mjerenja tlaka u samim sinusima. **B.** Hidrostatski tlak ( $P_1$ ) unutar cijevičice zatvorene na gornjem i otvorene na donjem dijelu prema zakonu o mehanici fluida manji je od atmosferskog tlaka ( $P_2$ ), a vrijednost mu odgovara visini ( $h_1$ ) cijevičice (Landau i sur. 2005). **C.** Shematski prikaz naše hipoteze prema kojoj bi se krv u duralnim sinusima ponašala kao tekućina unutar krute zavinute cijevi, začepnjene na jednom kraju, a na drugom otvorene spram atmosferskog tlaka. Sukladno zakonu o mehanici fluida tlak u duralnim venskim sinusima bi imao najniže vrijednosti na mjestu s najvećom hidrostatskom udaljenosti ( $h_1$ ) od otvora sinusa, a na svim mjestima s manjom hidrostatskom udaljenosti od otvora ( $h_2$ ) tlakovi bi pokazivali pozitivnije vrijednosti.  $\rho$ - gustoća tekućine,  $g$ - gravitacija,  $h_1, h_2$ - visine,  $P_1, P_3$ - hidrostatski tlakovi,  $P_2$ - atmosferski tlak



## 2. Hipoteza

U kraniju je dura fiksirana uz površinu kosti, kako je to opisano na Slici 1, s razmjerno većim udjelom kolagena u svom sastavu, što volumen njenih sinusa čini gotovo nepromjenjivim, dok je spinalna dura djelomično vezana za kost te sadrži razmjerno više elastina, uz veliki epiduralni prostor ispunjen venskim pleksusima i masnim tkivom, što omogućava promjenjivost njenog volumena. Naša je pretpostavka da tlak u duralnim sinusima pada do negativnih vrijednosti prilikom uspravnog stava u skladu sa zakonom o mehanici fluida (Slika 3) (Landau i sur. 2005 i Schwarz i sur. 2002) i da te vrijednosti ovise o anatomskim dimenzijama duralnih sinusa, mjestu gdje se mjere i položaju tijela u kojem se mjerenje vrši.

Smatramo da će krv u sinusima imati sličnu sudbinu kao i intrakranijski likvor, tj. kao i svaka tekućina unutar posude čvrstih stijenki koja je otvorena na jednom kraju (na ulazu u vene jugularis interne) (Slika 3). Naime, promjene tlaka u duralnim sinusima trebale bi biti slične kao i promjene tlaka likvora u kraniju, dakle u skladu sa zakonom o mehanici fluida (Klarica i sur. 2014) primijenjenom na tekućinu u cijevi zatvorenoj na gornjem dijelu i otvorenoj na donjem dijelu na koju djeluje gravitacija kao što je to za likvor sugerirano u radovima iz 2011. i 2014. (Jurjević i sur. 2011 i Klarica i sur. 2014).

Prema našoj novoj hipotezi očekujemo da će tlak u duralnim sinusima biti onoliko negativan koliko iznosi hidrostatska udaljenost od mjesta mjerenja u sinusima do ušća sigmoidnog sinusa u venu jugularis internu, odnosno, da će tlak pri uspravnom položaju tijela biti negativan, s najnižim vrijednostima mjerljivim u točki na "SSS-u" koja je hidrostatski najudaljenija od otvora sinusa (točka II na Slici 4).

### 3. Opći cilj i specifični ciljevi rada

U svrhu dokazivanja naše hipoteze napravili smo novi model duralnih venskih sinusa, pritom se fokusirajući na najveće sinuse (Sinus sagittalis superior, Sinus transversus i Sinus sigmoideus). Model se sastoji od dviju čvrstih plastičnih cijevi spojenih tako da jedna predstavlja "SSS", a druga "ST" i "SS" (Slika 4). Cjevčica koja predstavlja "SSS" začepljena je gumenim čepom na prednjem kraju, a jedan "SS" također je začepljen gumenim čepom (Slika 4). Model je konstruiran prema snimkama magnetne duralne venografije nekoliko odraslih pacijenata obrađenih u poliklinici Neuron Hrvatskog instituta za istraživanje mozga (HIIM).

Tlakovi se mjere na tri mjesta na modelu koji odgovaraju anatomskim pozicijama na vrhu "SSS-a", 7 cm niže i kaudalno na "SSS-u" te 5 cm niže, tj. 12 cm ispod vrha "SSS-a", odnosno na "ST-u". Važno je uočiti kako je prva točka tj. vrh "SSS-a" hidrostatski udaljena 16 cm od ušća sigmoidnog sinusa u venu jugularis internu. Druga točka (točka III na slici 4), a to je stražnji dio "SSS-a" od tog je ušća udaljena 9 cm, a treća točka (točka I na slici 4), tj. "ST" udaljen je 4 cm. Model će biti fiksiran na ravnoj ploči, zajedno sa pretvaračima tlaka, a tlakovi se mjere u položaju koji odgovara ležanju u horizontali, kao na lijevom boku. Potom se ravna ploča za koju su model i pretvarači tlaka pričvršćeni uspravi u vertikalu (90°) te se ponovno izmjere tlakovi.

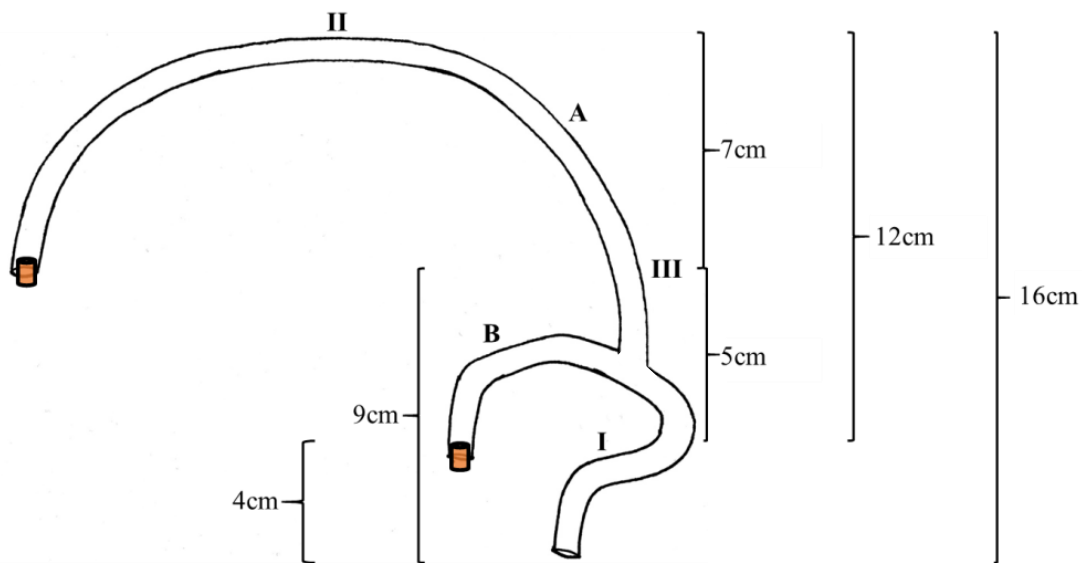
## 4. Materijali i metode

### 4.1 Izrada modela duralnih sinusa

Model duralnih sinusa izrađen je prema snimkama magnetne duralne venografije duralnih sinusa odraslih muškaraca dobivenom od nekoliko pacijenata obrađenih u poliklinici Neuron. Model je napravljen od plastičnih cjevčica, materijala koji ima slične biofizičke karakteristike kao i duralni sinusi. Unutarnji promjer plastičnih cjevčica iznosi 0,5 mm, a cjevčice su savitljive i prozirne. Model se sastoji od dvije plastične cjevčice koje su međusobno spojene po principu obrnuto postavljenog slova "T" i čine jednu cjelinu. Duža cjevčica (oznaka A na Slici 4) dugačka je 31 cm i predstavlja anatomski model *sinus sagittalis superior*. Kraća cjevčica (oznaka B na Slici 4) dugačka je 22 cm i predstavlja anatomski model lijevog i desnog *sinus transversus*-a. Duža cjevčica je s prednje (frontalne) strane zatvorena gumenim čepom, dok se na stražnjoj strani spaja s kraćom cjevčicom. Spoj dviju cjevčica anatomski odgovara *confluens sinuum*-u, a osigurano je od curenja tekućine ili ulaska zraka silikonskim premazom izvana (Silicone sigillante, Saratoga int. Sforza S. P. A., Italija).

Obje su cjevčice savijene kako bi anatomski imitirale izgled i položaj duralnih sinusa. Tri kontrolne točke bile su visina kaudalnog kraja duže cjevčice, najviša točka duže cjevčice i visina spojišta dviju cjevčica. Model smo u zadanom položaju učvrstili bakrenom žicom kojom smo na određenim mjestima s vanjske strane obložili cjevčice.

Model smo napunili destiliranom vodom, pritom pazeći da u modelu nemamo zraka. Ukupan volume tekućine u modelu iznosi 10 ml.



*Slika 4. Shema našeg originalnog modela duralnih venskih sinusa koji je načinjen od plastičnih cijevi (A i B) spojenih po principu obrnutog slova "T", oblikovanih prema snimkama magnetne duralne venografije pacijenata poliklinike Neuron. Na slici su rimskim brojevima označene pozicije mjerenja tlaka u duralnim sinusima: I- Transverzalni sinus (4 cm hidrostatske udaljenosti od otvora), II-Sagitalni sinus-vrh (16 cm hidrostatske udaljenosti od otvora) i III-Sagitalni sinus-stražnji dio (9 cm hidrostatske udaljenosti od otvora) . Prikazane su i hidrostatske razlike tlakova pojedinih mjernih pozicija u odnosu jedne na drugu i u odnosu na ušće unutarnje jugularne vene. Vide se i čepovi na prednjem otvoru "SSS-a" i jednom otvoru "ST-a".*

## 4.2 Mjerenje tlakova unutar modela duralnih sinusa

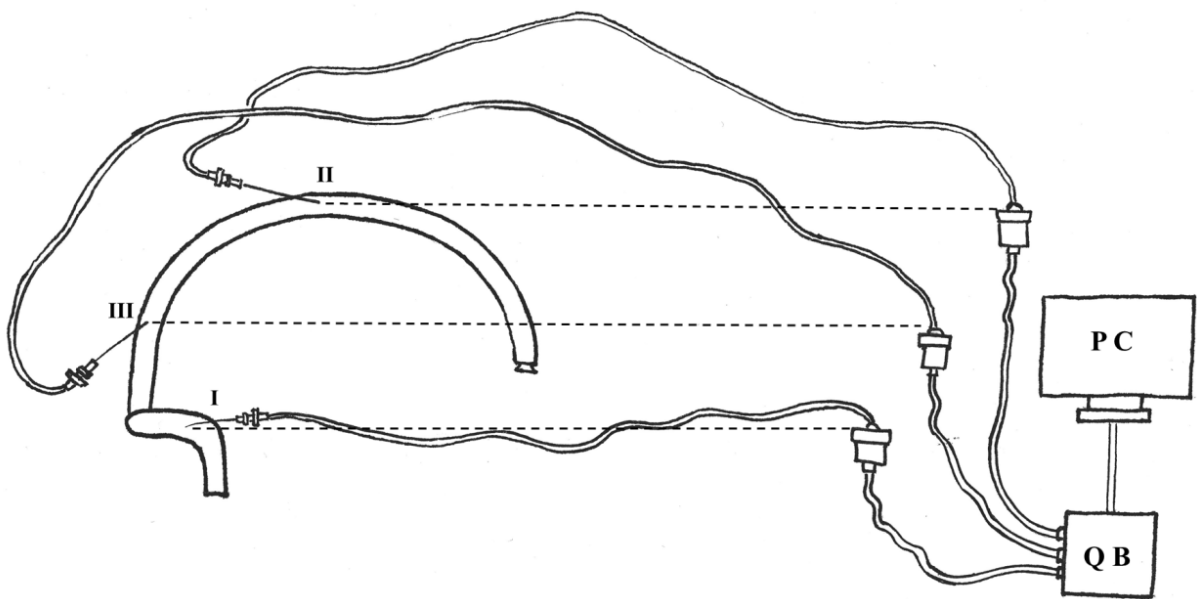
Za mjerenje tlaka u modelu duralnih sinusa izabrali smo tri mjesta označena rimskim brojevima na Slikama 4 i 5:

- I. Transverzalni sinus
  - II. Sagitalni sinus - vrh
  - III. Sagitalni sinus – stražnji dio
- Visinska razlika između kanila u vrhu sagitalnog sinusa i one u transverzalnom sinusu (I. i II.) iznosila je **12 cm**, a između vrha sagitalnog sinusa i ušća jugularnih vena **16 cm** (Slika 4).
  - Visinska razlika između kanile u stražnjem dijelu sagitalnog sinusa i one u transverzalnom sinusu (III. i I.) iznosila je **5 cm**, a između transverzalnog sinusa i ušća jugularnih vena **4 cm** (Slika 4).
  - Visinska razlika između kanile u stražnjem dijelu sagitalnog sinusa i one u vrhu sagitalnog sinusa (III. i II.) iznosila je **7 cm**, a između stražnjeg dijela sagitalnog sinusa i ušća jugularnih vena **9 cm** (Slika 4).

Na zadanim mjestima zagrijanom iglom su probušene rupe kroz cjevčice te su umetnute kanile. U blizini probušene rupe stavljen je silikon kako bi se preveniralo curenje tekućine i ulaženje zraka u model. Vrh svake kanile nalazio se u sredini unutrašnjosti cjevčice. Rupe su bušene pod kutom, tangencijalno na zakrivljenost modela, a kanile su gledale u suprotnom smjeru od smjera toka krvi u sinusima. Kanile su jednim krajem završavale u unutrašnjosti modela, a na drugi je kraj bio spojen na cjevčicu koja je završavala u pretvaraču tlaka (Gould P23 ID, Gould Instruments, Cleveland, OH, SAD).

Za mjerenje tlaka korišten je pretvarač tlaka (Gould P23 ID, Gould Instruments, Cleveland, OH, SAD) učvršćen na drvenoj ploči i postavljen u istu hidrostatsku ravninu kao i mjerna kanila (Slika 5). Pretvarači tlaka bili su spojeni na računalo preko pojačala (QUAD Bridge i PowerLab/800, AD Instruments Ltd., Castle Hill, NSW, Australija) tako da su analogni podaci pretvarani u digitalne i na računalu se očitavali kao krivulja promjene tlaka.

Izvedena su tri mjerenja po 5 minuta u horizontalnom i vertikalnom položaju modela pritom pazeći da pretvarači tlaka budu u istoj ravnini (odnosno visini) kao i mjerno mjesto pripadajuće kanile.



*Slika 5. Shema modela duralnih venskih sinusa i njegov položaj na ravnoj ploči za mjerenje tlakova (na lijevom boku). Prikazane su pozicije mjerenja (I, II, III) i kanile u njima, te pretvarači tlaka koji su bili pričvršćeni za ploču u hidrostatskoj razini odgovarajućih kanila (isprekidana linija). Pretvarači su spojeni na pojačalo (QB) koje je spojeno na osobno računalo (PC) na kojem smo očitavali i bilježili rezultate.*

## 5. Rezultati

U Tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja tlaka tekućine u modelu pri horizontalnom položaju kao na lijevom boku i vertikalnom položaju (90°). Također su navedeni očekivani tlakovi za pojedina mjesta mjerenja temeljem zakona o mehanici fluida. Vidi se kako su tlakovi u horizontali podjednaki, kao što se to i očekivalo i variraju između 14 i 16 cm H<sub>2</sub>O. Srednje vrijednosti tlakova mjerenih na položajima I, II i III u uspravnom položaju (vertikala) su negativne i iznose -4,6 cm H<sub>2</sub>O (I), -16,1 cm H<sub>2</sub>O (II) i -9,5 cm H<sub>2</sub>O (III), što se podudara s očekivanim vrijednostima iz naše hipoteze. Osim toga, vide se razlike tlakova između pojedinih mjernih točaka, pa je tako razlika srednjih vrijednosti tlaka između pozicija I i II 11,5 cm H<sub>2</sub>O, između pozicija I i III 4,8 cm H<sub>2</sub>O, te između pozicija II i III 6,7 cm H<sub>2</sub>O.

*Tablica 1. Očekivane vrijednosti i izmjerene vrijednosti tlaka (cm H<sub>2</sub>O) u modelu duralnih sinusa u horizontalnom i uspravnom (vertikala) položaju na tri različita mjesta označenih rimskim brojevima I, II, III u skladu sa slikom 4 i 5. Prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tlakova u tri mjerenja ( $M_{\pm}$ ) uz standardne pogreške srednjih vrijednosti (SEM).*

	Horizontala			cmH <sub>2</sub> O	Vertikala			cmH <sub>2</sub> O
	1	2	3	<b>M<sub>±</sub>-SEM</b>	1	2	3	<b>M<sub>±</sub>-SEM</b>
<b>I.</b>	16,5	16,3	16,0	<b>16,3<sub>±</sub>0,2</b>	-4,3	-4,6	-5,0	<b>- 4,6<sub>±</sub>0,3</b>
<b>II.</b>	14,6	14,0	13,7	<b>14,1<sub>±</sub> 0,4</b>	-15,5	-16,2	-16,7	<b>- 16,1<sub>±</sub> 0,5</b>
<b>III.</b>	15,9	15,5	14,9	<b>15,4<sub>±</sub>0,4</b>	-9,0	-9,5	-9,9	<b>- 9,5<sub>±</sub> 0,4</b>
<b>Očekivani rezultati</b>								
<b>I.</b>				<b>16</b>				<b>-4</b>
<b>II.</b>				<b>16</b>				<b>-16</b>
<b>III.</b>				<b>16</b>				<b>-9</b>

## 6. Rasprava

Izmjereni tlakovi tekućine unutar našeg originalnog modela duralnih sinusa bili su u skladu s našom hipotezom. U uspravnom položaju imali su negativne vrijednosti, kakve smo i očekivali po zakonu mehanike fluida. To znači da bi tlak na najvećoj hidrostatskoj udaljenosti od otvora cijevi u kojoj se tekućina nalazi trebao biti najnegativniji. To se i potvrdilo s obzirom na to da je srednja vrijednost tlaka izmjenjenog u točki II (vrh "SSS-a") pri uspravnom položaju iznosila -16,1 cm H<sub>2</sub>O, dok su vrijednosti izmjerene u drugim točkama bile manje negativne, tj. u točki III (stražnji dio "SSS-a") iznosila je -9,5 cm H<sub>2</sub>O, a u točki I ("ST") iznosila je -4,6 cm H<sub>2</sub>O. Također, razlike u tlaku među pojedinim točkama mjerenja odgovarale su njihovim međusobnim razlikama u hidrostatskoj visini.

Dosadašnji modeli venskih duralnih sinusa spomenuti u dostupnoj literaturi uglavnom su se bazirali na životinjskim modelima ili teoretskim modelima fokusiranim na trombotska stanja u sinusima, te prema tome i nisu dali tlakove koje bismo očekivali u fiziološkim stanjima u različitim položajima tijela (Mosso i sur. 2008, Stolz i sur. 1999, Liang i sur. 2001 i Qvarlander i sur. 2013).

Kao što je već rečeno, tlakovi u duralnim sinusima su mjereni tijekom operacija u bolesnika s različitim patologijama. No, i ta su istraživanja ustvrdila da je tlak u sinusima pri uspravnom položaju negativan, ali bez suvislog objašnjenja zašto se takav tlak javlja (Iwabuchi i sur. 1986).

Jedan od poticaja za ovo istraživanje bio je i rad s našeg fakulteta objavljen 2014. u PlosOne koji je ukazao da u kraniju tlak likvora treba biti negativan u uspravnom položaju. Istu hipotezu primijenili smo na tlak u duralnim sinusima, za koje iz literature znamo da mogu biti negativni. Naši rezultati na modelu ukazuju na to da ne postoji značajnija razlika likvorskog tlaka i tlaka u duralnim sinusima, a što dovodi u pitanje hipotezu prema kojoj se likvor dominantno apsorbira u duralne sinuse pasivno, pod većim gradijentom tlaka (Guyton i sur. 2003).

Rezultati naših pokusa pokazuju kako ti tlakovi u uspravnom položaju trebaju biti negativni i da se ponašaju u skladu sa zakonom fluida. Stoga je za očekivati da će tlakovi u sinusima biti negativni i da će korelirati s udaljenošću od otvora sinusa na bazi lubanje što bi trebalo potvrditi u istraživanju na eksperimentalnim životinjama i na ljudima. Nema bitne razlike u tlaku likvora i duralnih sinusa pa je za očekivati da se apsorpcija cerebrospinalnog



likvora ne odvija u skladu s klasičnim konceptom, već prema radu o novim spoznajama stvaranja i gibanja cerebrospinalnog likvora (Bulat i sur. 2011).

Čini se kako duralni sinusi funkcioniraju kao sifon u koji se ulijeva krv i prelijeva se iz sinusa u venu jugularis internu. Dok smo u uspravnom položaju taj sifon je u obrnutom položaju slova "U".

## **7. Zaključak**

Naš originalni model duralnih sinusa ukazuje da tlak u venskim sinusima ovisi o položaju tijela, te da taj venski tlak u uspravnom položaju varira fiziološki ovisno o hidrostatskom položaju točke gdje se mjerenje vrši u odnosu na otvor duralnih sinusa. Rezultati jasno ukazuju kako duralni sinusi funkcioniraju kao sifon čime doprinosi očuvanju volumena intrakranijskih tekućina krvi i likvora pri različitim položajima tijela, što ima ključno evolucijsko značenje za perfuziju mozga pri uspravnom hodu.

## **8. Zahvale**

Zahvaljujemo doc. dr. sc. Milanu Radošu za snimke venografije duralnih sinusa kod pacijenata, mr.sc. Branku Mišeu i dipl. ing. Ljiljani Krznar na pomoći u oblikovanju eksperimentalnog modela i pomoći pri mjerenju tlakova u modelu.

## 9. Popis literature

1. Brockmann C, Kunze S, Scharf J. Computed tomographic angiography of the superior sagittal sinus and bridging veins. *Surg Radiol Anat*, 2011; 33(2):129-134.
2. Bulat M, Klarica M. Recent insights into a new hydrodynamics of the cerebrospinal fluid. *Brain Res Rev*, 2011; 65(2):99-112.
3. Cottrell JE, Young WY. *Cottrell and Young's Neuroanesthesia*. Elsevier Health Sciences, 2010; str. 75-77.
4. Fanghaenel J, Pera F, Anderhuber F, Nitsch R. *Waldeyerova anatomija čovjeka*. Golden marketing-tehnička knjiga, Zagreb, 2009; str. 251.
5. Fernández-de-las-Peñas C, Arendt-Nielsen L, Simons DG, Cuadrado ML, Pareja JA. *Tension type and Cervicogenic headache: patho-physiology, diagnosis and treatment*. Jones & Bartlett Publishers, Baltimore, 2009; str. 238-240.
6. Fukusumi A, Okudera T, Takahashi S, Taoka T, Sakamoto M, Nakagawa H, Takayama K, Kichikawa K, Iwasaki S. Anatomical evaluation of the dural sinuses in the region of the torcular herophili using three dimensional CT venography. *Academic radiology*, 2010; 17(9):1103-1111.
7. Guyton C, Hall JE. *Medicinska fiziologija*. Medicinska naklada, 2003; str. 709-715.
8. Iwabuchi T, Sobata E, Suzuki M, Suzuki S, Yamashita M. Dural sinus pressure as related to neurosurgical positions. *Neurosurgery*, 1983; 12(12):203-207.
9. Iwabuchi T, Sobata E, Ebina K, Tsubakisaka H, Takiguchi M. Dural sinus pressure: various aspects in human brain surgery in children and adults. *Am J Physiol*, 1986; 250(3 Pt 2):H389-396.
10. Jurjević I, Radoš M, Orešković J, Prijić R, Tvrdeić A, Klarica M. Physical Characteristics in the New Model of the Cerebrospinal Fluid System. *Coll. Antropol.*, 2011; Suppl.1:51-56.
11. Klarica M, Radoš M, Erceg G, Petošić A, Jurjević I, Orešković D. The Influence of Body Position on Cerebrospinal Fluid Pressure Gradient and Movement in Cats with Normal and Impaired Craniospinal Communication. *PLoS ONE*, 2014; 9(4):e95229.
12. Landau LD, Lifshitz EM. *Fluid mechanics*, Elsevier Butterworth-Heinmann. Oxford, 2005. str. 5-7.
13. Liang L, Korogi Y, Sugahara T, Onomichi M, Shigematsu Y, Yang D, Kitajima M, Hiai Y, Takahashi M. Evaluation of the intracranial dural sinuses with a 3D contrast-enhanced MP-RAGE sequence: prospective comparison with 2D-TOF MR

- venography and digital subtraction angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2001; 22(3):481-492.
14. Maikos JT, Elias RA, Shreiber DI. Mechanical properties of dura mater from the rat brain and spinal chord. *J Neurotrauma*, 2008; 25(1):38-51.
  15. Mosso M, Schmid-Priscoveanu A, Straumann D, Baumgartner RW. Absence of gravity-dependent modulation of straight sinus flow velocity in healthy humans. *Ultrasound Med Biol*, 2008; 34(5):726-729.
  16. Qvarlander S, Sundström N, Malm J, Eklund A. Postural effects on intracranial pressure: modeling and clinical evaluation. *J Appl Physiol*, 2013; 115(10):1474-1480.
  17. Schwarz S, Georgiadis D, Aschoff A, Schwab S. Effects of body position on intracranial pressure and cerebral perfusion in patients with large hemispheric stroke. *Stroke*, 2002; 33(2):497-501.
  18. Stolz E, Kaps M, Kern A. Transcranial Color-Coded Duplex Sonography of Intracranial Veins and Sinuses in Adults: Reference Data from 130 Volunteers. *Stroke*, 1999; 30:1070-1075.

## **Filip Đerke i Luka Filipović-Grčić**

### **Subatmosferski tlak unutar duralnih sinusa: novi pogledi**

#### **10. Sažetak**

Duralni sinusi nalaze se između meningealnog i periostalnog lista intrakranijske dure mater. Tok krvi u ovim venskim strukturama opsežno je opisan u literaturi. Venska krv prolazi kroz nekoliko venskih sinusa koji se ulijevaju jedan u drugi počevši od sinus sagittalis superiora te u konačnici kroz lijevi i desni sinus sigmoideus. Iako je uočeno da promjena položaja tijela mijenja tlak u sinusima da bismo to objasnili izrađen je novi originalni model duralnih sinusa koji anatomskim i biofizičkim karakteristikama imitira duralne sinuse dobivene venografijom kod pacijenata. Postavljena je nova hipoteza prema kojoj tlakovi unutar duralnih sinusa imaju sudbinu koju prema zakonu o mehanici fluida ima tekućina unutar krute cijevi zatvorene na jednom kraju, kao u našem modelu. Rezultati ukazuju da se subatmosferska vrijednost tlaka pojavljuju u uspravnom položaju tijela, a veličina tlaka odgovara hidrostatskoj razini između otvora modela i mjesta gdje se mjerenje obavlja. Naše istraživanje ukazuje da se tlakovi i u likvoru i u duralnim sinusima ponašaju sukladno zakonu o mehanici fluida, te da ne ovise o gibanju tih tekućina.

Ključne riječi:

Duralni sinusi, tlak, model, zakon o mehanici fluida

**Filip Đerke and Luka Filipović-Grčić**  
**Subatmospheric pressure inside dural sinuses – new insights**

**10. Summary**

Dural venous sinuses are located between the meningeal and periosteal layer of intracranial dura mater. The blood flow in those vein structures has been extensively described in literature. Venous blood flows through venous sinuses, starting from the superior sagittal sinus and exiting through the left and right sigmoid sinus. It was noticed in literature that the change in body position leads to change in blood pressure in dural venous sinuses. Thus, in order to explore that phenomenon we developed and constructed an original model of venous dural sinuses, which imitates anatomical and biophysical characteristics of dural sinuses acquired through magnetic venography in patients. A new hypothesis was proposed, according to which the blood pressure within dural venous sinuses has the same fate as a fluid within a rigid pipe that is plugged on one end and opened at the other, such as in our model, what is in accordance with the law of fluid mechanics. Our results suggest the occurrence of subatmospheric pressure values in upright body position, with the pressure values proportionate to the hydrostatic distance of the measuring position from the opening end of the model. Our research suggests that the pressures of cerebrospinal fluid and venous blood depend on anatomical and biophysical characteristic of intracranial intradural space what is in accordance with the law of fluid mechanics, and do not depend on movement of those fluids.

Key words:

Dural sinuses, pressure, model, law of fluid mechanics