

Ispitivanje utjecaja oblika igle na učinkovitost ispiranja korijenskog kanala zuba

Sabalić, Lara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:696807>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA IRIGACIJSKE IGLE ZA ČIŠĆENJE ZUBNOG
KANALA**

Rijeka, ožujak 2024.

Lara Sabalić

0069084018

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA IRIGACIJSKE IGLE ZA ČIŠĆENJE ZUBNOG
KANALA**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, ožujak 2024.

Lara Sabalić

0069084018

IZJAVA

Izjavljujem da sam prema članku 7. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, samostalno izradila diplomski rad naslova „Optimizacija irigacijske igle za čišćenje zubnog kanala“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Čarije.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prije svega svojoj obitelji na podršci i razumijevanju kroz sve godine studiranja. Zahvaljujem se i svom mentoru i komentorici na strpljenju, vodstvu i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također, zahvaljujem se i svim svojim prijateljima i kolegama na svim zajedničkim trenucima i međusobnoj podršci. Na kraju, zahvaljujem se svima koji su doprinijeli završetku ovog studija i naravno Jakovu na neizmjerljivoj podršci i poticaju kroz sve izazove.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. PROBLEMATIKA ISPIRANJA KORIJENSKIH KANALA ZUBA | 3 |
| 3. CFD ANALIZA | 6 |
| 3.1. Teorijski pregled | 6 |
| 3.2. CFD simulacije strujanja fluida u korijenu zubnog kanala..... | 10 |
| 4. IZRADA GEOMETRIJE..... | 13 |
| 4.1. Model korijena zuba | 13 |
| 4.2. Modeli irigacijskih igla..... | 15 |
| 5. IZRADA NUMERIČKE MREŽE | 18 |
| 6. POSTAVKE SIMULACIJA..... | 21 |
| 6.1. Rubni uvjeti..... | 21 |
| 6.2. Numeričke postavke..... | 22 |
| 7. REZULTATI..... | 26 |
| 7.1. Konture tlaka i brzina..... | 28 |
| 7.1.1. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1} | 29 |
| 7.1.2. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1} | 30 |
| 7.1.3. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1} | 32 |
| 7.1.4. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1} | 34 |
| 7.2. Strujnice | 36 |
| 7.2.1. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1} | 37 |
| 7.2.2. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1} | 38 |
| 7.2.3. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1} | 39 |
| 7.2.4. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1} | 39 |

| | | |
|--------|--|----|
| 7.3. | Vektori brzina | 40 |
| 7.3.1. | Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1} | 41 |
| 7.3.2. | Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1} | 42 |
| 7.3.3. | Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1} | 42 |
| 7.3.4. | Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1} | 43 |
| 7.4. | Maksimalni izmjereni tlak na stijenci zubnog kanala..... | 44 |
| 8. | BUDUĆA PROŠIRENJA..... | 47 |
| 9. | ZAKLJUČAK..... | 52 |
| | LITERATURA | 53 |
| | POPIS SLIKA..... | 54 |
| | POPIS TABLICA | 56 |
| | SAŽETAK | 57 |
| | ABSTRACT..... | 58 |

1. UVOD

Čišćenje i dezinfekcija zubnih kanala predstavljaju bitan stomatološki postupak u cilju liječenja upale i bolesti zuba. Uspjeh ovakvog postupka ovisi o učinkovitosti čišćenja zubnih kanala. Do sada korištene irigacijske igle za čišćenje korijenskih kanala zuba, iako do određene mjere učinkovite, nisu u potpunosti efikasne što može dovesti do komplikacija tijekom liječenja zuba. Pojava računalne dinamike fluida (CFD) u stomatološkim istraživanjima predstavlja priliku za povećanjem učinkovitosti čišćenja korijenskih kanala zuba poboljšanjem dizajna irigacijske igle koja se koristi pri takvom zahvatu.

Jedan od izazova čišćenja zubnih kanala predstavlja složena anatomija korijena zuba. Korijen zuba čine uski i zakrivljeni kanali koje je teško u potpunosti očistiti te ih pri tome ne oštetiti. Učinkovitost korištenja irigacijske igle u tu svrhu, ovisi o toku fluida koji protječe zubnim kanalom, a pod utjecajem je dizajna same igle. Do sada korišteni, klasični dizajni irigacijskih igala često ne uspiju proizvesti optimalan tok fluida za irigaciju.

CFD analiza predstavlja jedan od mogućih pristupa za poboljšanje dizajna irigacijske igle. CFD je grana mehanike fluida koja koristi numeričku analizu za rješavanje problema koji uključuju analizu toka fluida. Primjenom CFD analize na dizajn irigacijske igle moguće je simulirati tok fluida prilikom izvođenja zahvata te uočiti nedostatke trenutnih dizajna. Uvid u tok fluida je od velike važnosti za poboljšanje dizajna igle kako bi se postigla maksimalna učinkovitost ispiranja i dezinfekcije zuba.

Primjena CFD analize u stomatološkim istraživanjima je relativno nova. U ovom radu prikazan je jedan od primjera korištenja CFD analize u cilju poboljšanja dizajna igle za irigaciju zubnog kanala te pripremu za buduću optimizaciju.

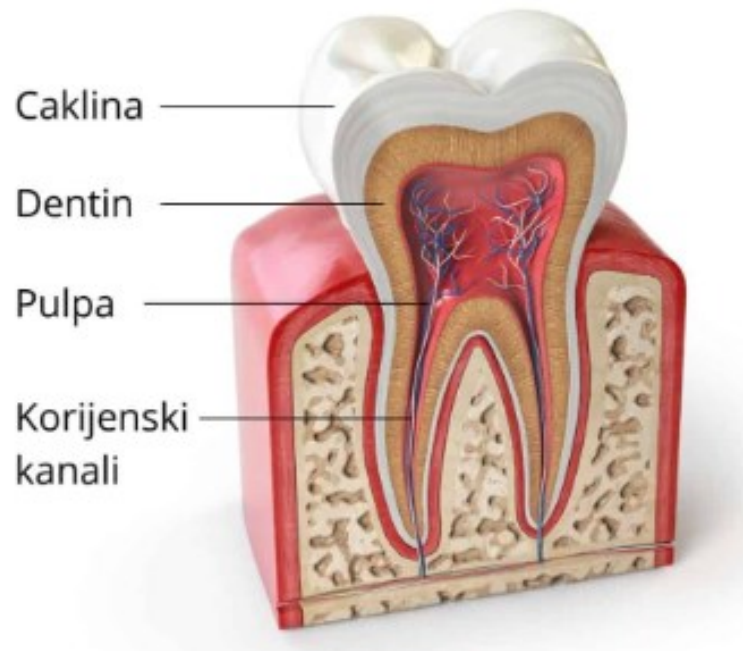
Predstavljena je metodologija rada koja uključuje izradu 3D modela zubnog kanala i četiri različita dizajna irigacijske igle korištenjem *Ansys* CFD softvera. Korištenjem navedenih modela provedene su simulacije ispiranja irigacijskim fluidom. Vizualiziran je tok fluida unutar korijenskih kanala pri različitim brzinama fluida na ulaznom presjeku. Na taj način omogućena je usporedba učinkovitosti raznih modela igla. U ovom radu pripremljeni su modeli za optimizaciju dizajna irigacijske igle izmjenom broja i položaja otvora za izlaz irigacijskog fluida.

Također, naglašava se potencijal korištenja CFD softvera kao alata za korištenje u stomatološke svrhe kako bi se doprinijelo napretku dentalne tehnologije te učinkovitijim i pouzdanijim tretmanima zuba.

U drugom poglavlju opisana je problematika irigacije zubnih kanala. Predstavljena je struktura zuba za bolje razumijevanje problema te su opisana postojeća ograničenja pri korištenju irigacijske igle. U trećem poglavlju opisani su temelji CFD analize i fizikalna pozadina pri rješavanju ovog problema. Predstavljen je teorijski pregled korištenih metoda za provođenje simulacija. U četvrtom poglavlju opisan je postupak odabira i izrade geometrija igla i korijenskog kanala. U petom poglavlju je opisan postupak izrade numeričkih mreža za različite modele. U šestom poglavlju su opisane postavke korištene za provedbu simulacija. U sedmom poglavlju su prikazani dobiveni rezultati koji uključuju konture tlaka, konture brzina, prikaz strujnica i prikaz vektora brzina. U osmom poglavlju je opisan potencijalni nastavak ovog istraživanja.

2. PROBLEMATIKA ISPIRANJA KORIJENSKIH KANALA ZUBA

Endodoncija ili liječenje korijenskog kanala zuba, je terapija koja se provodi u cilju liječenja upale zuba. Do upale zuba dolazi zbog infekcije živaca i korijenskih kanala bakterijama. Postupak liječenja upale zuba može biti dugotrajan proces, a uključuje čišćenje i dezinfekciju korijenskih kanala zuba. Jedan od načina čišćenja zubnih kanala je korištenjem irigacijske igle. Kako bi se mogla dizajnirati efikasna igla za irigaciju, potrebno je poznavati strukturu zuba. Zubi se sastoje od nekoliko dijelova, koje čine caklina, dentin, pulpa i korijenski kanali. Struktura zuba prikazani je na slici 2.1.



Slika 2.1 Dijelovi zuba [1]

Česti uzrok upale zuba je ulazak bakterija u korijenski kanal. Ukoliko upala napreduje može doći do bakterijske infekcije pulpe [1]. U tom slučaju je potrebno liječiti zub. Za izvođenje takvog tretmana treba uzeti u obzir razne čimbenike kako bi se izbjegle komplikacije tijekom liječenja. Pri izvođenju irigacije zubnog kanala bitno je osigurati da tlak irigacijskog fluida na živac i okolna tkiva nije prevelik kako bi se izbjegla potencijalna oštećenja te je od velike važnosti da fluid koji se koristi pri čišćenju, tj. irigans, dođe u kontakt sa cijelom površinom korijenskog kanala zuba [2].

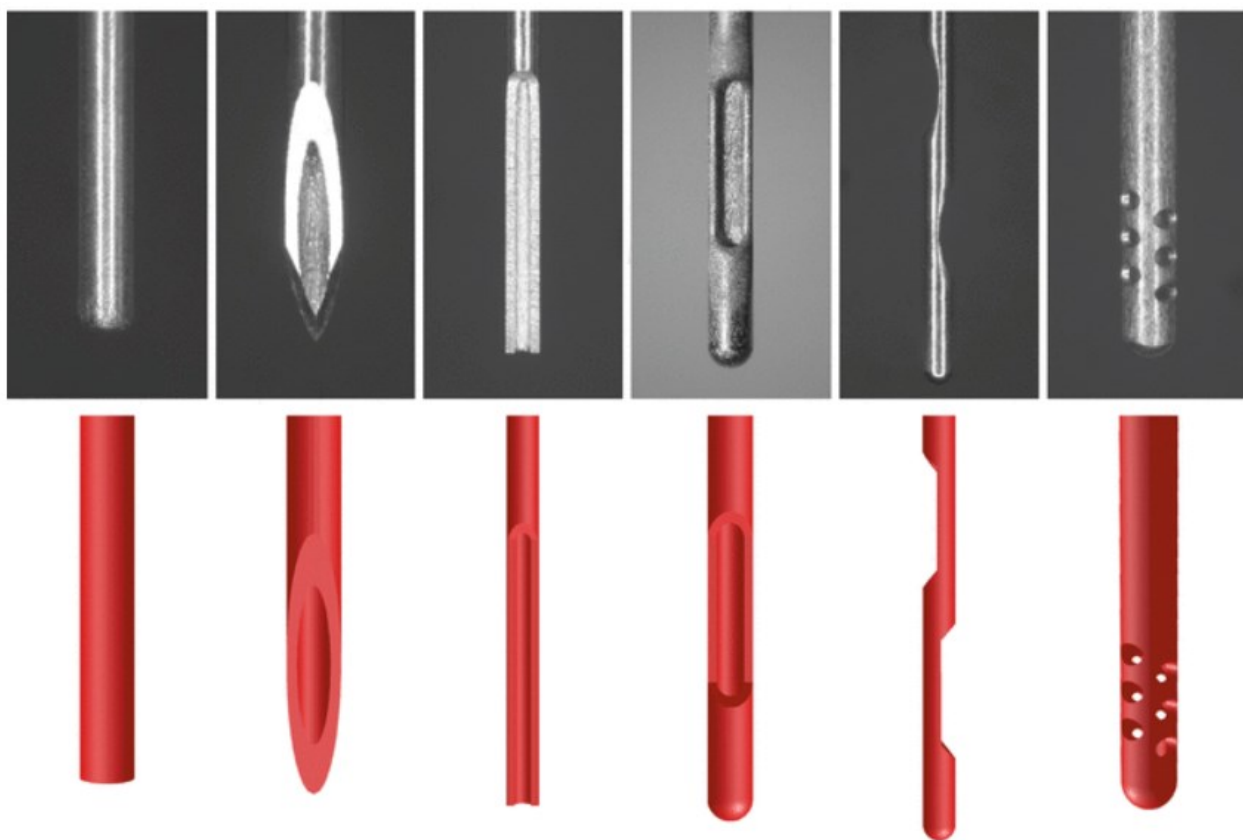
Fluid koji se koristi za ispiranje kanala trebao bi djelovati antimikrobno, djelovati lubrikacijski, otapati organska i anorganska tkiva, imati produženi članak, ne interferirati s cijeljenjem periapikalnih tkiva, ne bojiti zubnu strukturu, ne utjecati štetno na mogućnosti brtvljenja materijala za punjenje, biti jednostavan za upotrebu i biti jeftin [2].

Još nije razvijeno sredstvo koje ispunjava sve zahtjeve. Neka sredstva koja se danas koriste kao irigansi su najčešće natrijev hipoklorit, klorheksidin i razni kombinirani preparati iz razloga što niti jedan irigans ne zadovoljava kriterije u potpunosti [2].

Postoje određena ograničenja pri dizajniranju igle. Prilikom čišćenja kanala odabranim irigansom može doći do zaostajanja zraka u apikalnom dijelu korijenskih kanala prilikom ulaska fluida u kanal te dolazi do efekta „*vapor lock*“. Taj zarobljeni zrak onemogućuje protok fluida za ispiranje do apikalnog dijela korijenskog kanala [2]. Također, otvori na igli te ulazna brzina irigansa moraju biti takvi da se osigura protok fluida na način da zahvati sve teško dostupne i zakrivljene prostore, no u isto vrijeme tlak mora biti takav da ne dođe do oštećenja okolnih tkiva ili živca. Preveliki tlak može dovesti do toga da se fluidom oštete okolna tkiva, što može uzrokovati ozbiljnu bol, oticanje i potencijalno oštećenje živca. Previše agresivan pristup irigaciji zubnog kanala može zakomplicirati proces liječenja te produžiti oporavak pacijenta.

Razvijene su različite metode za čišćenje kanala kao što su šprice s posebno dizajniranim iglama (irigacijske igle), ultrazvučno ispiranje, lasersko ispiranje, ispiranje kavitacijom i sustavi irigacije s negativnim tlakom kako bi se poboljšala distribucija irigansa i učinkovitost irigacije [2]. Svaka metoda čišćenja zubnih kanala ima svoje prednosti i ograničenja.

Za slučaj korištenja irigacijske igle proizvedeni su različiti modeli igla. Oblik irigacijske igle ima značajan utjecaj na protok irigansa u apikalnom dijelu zubnog kanala. U svrhu poboljšanja učinkovitosti irigacijskih igla, ispitani su različiti modeli. Na primjer, u radu „*Syringe Irrigation: Blending Endodontics and Fluid Dynamics*“ ispitani su modeli prikazani na slici 2.2. [3].



Slika 2.2 Različiti modeli irigacijskih igla [3]

Irigacija korijenskih kanala zuba je složen postupak koji zahtijeva razmatranje raznih faktora kako bi se osiguralo potpuno čišćenje korijenskih kanala. Važno je uzeti u obzir tlak prilikom ispiranja kako bi se spriječilo oštećenja živca i tkiva, dok se odabir irigansa i ostala oprema moraju prilagoditi svakom slučaju pacijenta.

3. CFD ANALIZA

Računalna dinamika fluida (CFD) predstavlja granu mehanike fluida koja se bavi rješavanjem problema koji uključuju tok fluida. CFD omogućuje proučavanje složenih problema koji bi inače bili teško rješivi ili skupi za eksperimentalne metode.

Temelj CFD analize čine Navier Stokesove jednačbe. Ove jednačbe u potpunosti opisuju ponašanje fluida. Za rješavanje Navier Stokesovih jednačbi potrebno je diskretizirati domenu na konačan broj elemenata ili volumena. Diskretizacijom domene diferencijalne jednačbe se pretvaraju u skup algebarskih izraza koje računalo može rješavati.

Diskretizacija domene omogućuje izvršenje proračuna i analizu toka fluida. Za rješavanje diskretiziranih jednačbi koriste se metoda konačnih razlika, metoda konačnih elemenata i metoda kontrolnih volumena, koja je korištena i opisana u ovom radu. Svaka od ovih metoda ima različite karakteristike te se primjenjuje u skladu s prirodom problema koji se rješava. Kvaliteta mreže ovisi o raspodjeli elemenata te je bitna za osiguranje točnosti simulacije. Također, za simulaciju je potrebno definirati početne i rubne uvjete.

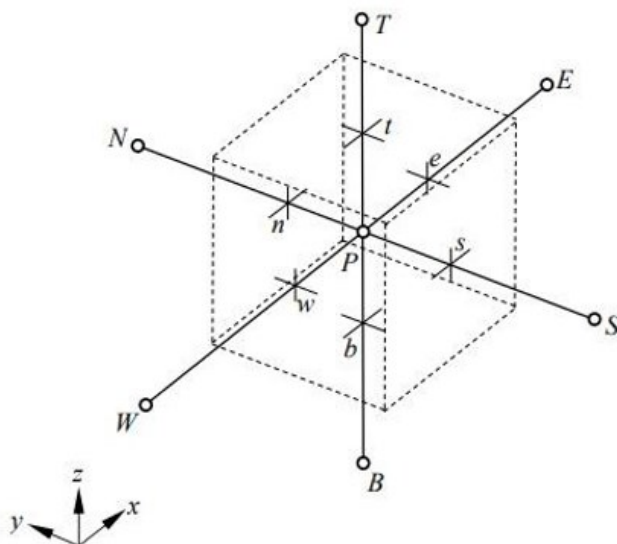
Za provedbu analize potrebno je izabrati prikladan model rješavanja, koji ovisi o turbulenciji fluida. Zatim se rezultati evaluiraju vizualizacijom i analizom. Validacija CFD analize osigurava točnost simulacija. Kroz taj proces CFD se pokazuje kao koristan alat u inženjerstvu. Omogućuje modeliranje i analizu kompleksnih problema.

3.1. Teorijski pregled

Prije provođenja CFD analize potrebno je znati i definirati:

- područje proračuna (domenu),
- početne i rubne uvjete,
- turbulentni model rješavanja,
- numeričku metodu rješavanja.

Izradom domene potrebno je definirati prostor koji će simulacija obuhvatiti. Zatim je domenu potrebno diskretizirati. Primjenom metode kontrolnih volumena, geometrija se zamjenjuje određenim brojem kontrolnih volumena čime se omogućuje detaljna analiza cijele promatranog područja. U praksi se najčešće domena dijeli na jednostavne geometrijske oblike kao što su kocka ili tetraedar, kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 Kontrolni volumen [4]

Na kvalitetu mreže utječu broj, veličina i raspored volumena unutar domene. U područjima gdje se očekuju značajne promjene fizikalnih varijabli kao što su brzina i tlak, potrebno je dodatno ugustiti mrežu. Povećanjem broja volumena diskretizacijske mreže potrebni su veći računalni resursi te se produžuje vrijeme proračuna. Izbor veličine i oblika kontrolnih volumena ovisi o složenosti problema.

Potrebno je definirati početne i rubne uvjete. Početni uvjeti se definiraju u slučaju nestacionarnog strujanja, a opisuju početne vrijednosti varijabli u svim čvorovima domene. Rubni uvjeti predstavljaju stanje varijabli na granici domene. Postoje različite vrste rubnih uvjeta, a nekih od kojih su ulazni rubni uvjet, izlazni rubni uvjet, rubni uvjet na stijenci, rubni uvjet simetrije, periodički rubni uvjet [4].

Definiranje rubnih uvjeta vrlo je važno za točnost CFD simulacije. Time se omogućuje stvaranje što realnijeg modela kako bi se dobili čim precizniji i točniji rezultati simulacija.

Navier Stokesove jednađbe predstavljaju temeljne jednađbe dinamike fluida te potpuno opisuju gibanje fluida. Ove jednađbe proizlaze iz osnovne jednađbe statike fluida i Eulerove jednađbe gibanja fluida [5]. Za Newtonovski fluid uz pretpostavku nestlačivog strujanja i konstantne viskoznosti Navier Stokesove jednađbe imaju sljedeći oblik u vektorskom zapisu:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \text{grad} p + \rho \mathbf{f} \quad (2.1)$$

Gdje je:

$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$ sila inercije,

$\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ kontaktna sila (smična),

$\text{grad} p$ kontaktna sila (tlak),

$\rho \mathbf{f}$ masena sila [5].

Jednađba očuvanja mase, ili jednađba kontinuiteta, osigurava kontinuitet mase, odnosno definira da se masa fluida ne stvara niti gubi prolaskom kroz kontrolni volumen. Količina mase koja ulazi u kontrolni volumen mora biti jednaka masi koja izlazi iz kontrolnog volumena, čime se osigurava konstanta vrijednost mase ili volumena fluida. Jednađba ima sljedeći oblik u vektorskom zapisu:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.4)$$

Gdje je:

$\nabla \cdot \mathbf{v}$ divergencija specifičnog volumena.

Skup navedenih jednađbi, uz početne i rubne uvjete, čini puni matematički model strujanja nestlačivih Newtonovskih fluida. Zbog svoje kompleksnosti, nije ih moguće riješiti analitički osim u specijalnim slučajevima s određenim pretpostavkama [5].

Kako bi postavke rješavanja bile potpune, potrebno je definirati model rješavanja navedenih jednađbi. Izravno rješavanje zahtijeva numeričku mrežu izuzetno visoke kvalitete te velike računalne

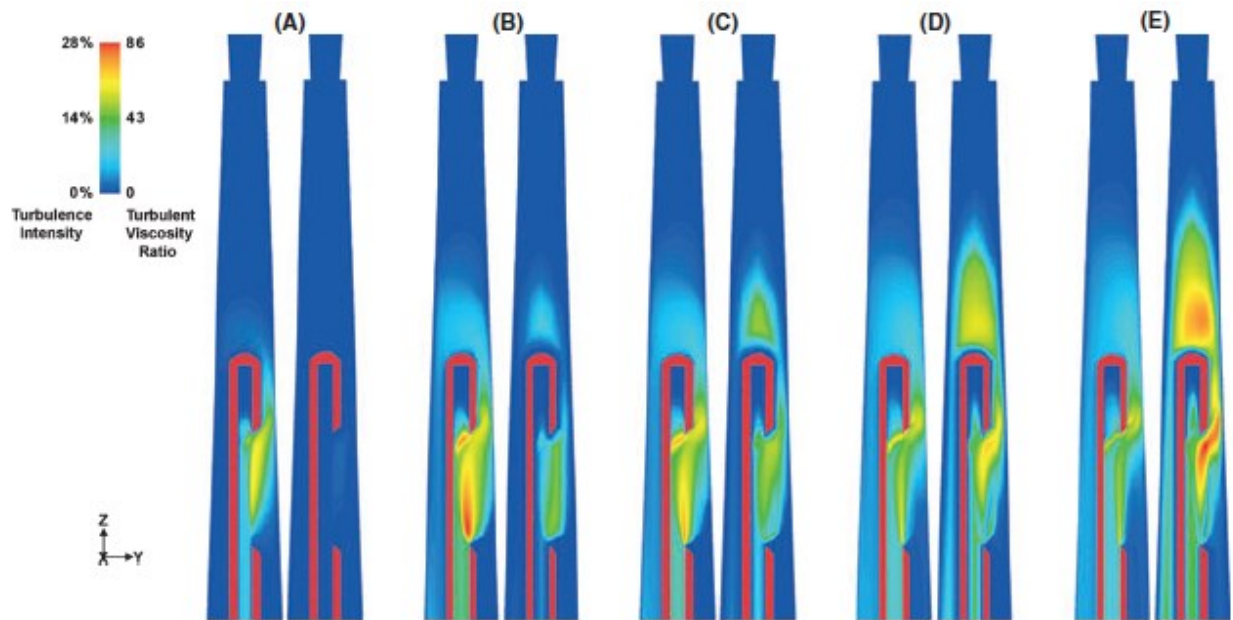
resurse. Iz tog razloga razvijeni su turbulentni modeli rješavanja koji aproksimiraju Navier Stokesove jednačbe čime se omogućuje njihovo rješavanje.

Neki od najčešće korištenih modela su $k - \omega$, $k - \omega SST$ i $k - \varepsilon$ modeli turbulencije. Kod odabira modela rješavanja bitno je uzeti u obzir specifičnost problema koji se rješava. Svaki model ima vlastite prednosti i nedostatke koje je bitno uzeti u obzir.

- $k - \omega$ model turbulencije rješava dvije dopunske jednačbe Reynoldsovim usrednjenim Navier-Stokesovim jednačbama za turbulentno strujanje. Fokus je na kinetičkoj energiji turbulencije (k) i na specifičnoj brzini disipacije (ω). Smatra se pogodnom za strujanja fluida u području blizu stijenke i u problemima s niskim Reynolds-ovim brojem zbog toga što dobro modelira viskozne podslojeve. Nedostatak ovog modela je osjetljivost na uvjete na ulaznom presjeku te manja robusnost u odnosu na druge modele.
- $k - \varepsilon$ model turbulencije također koristi dvije dopunske jednačbe. U ovom slučaju, fokus je na kinetičkoj energiji turbulencije (k) i na brzini disipacije (ε). Ovaj model je u širokoj primjeri za turbulentna strujanja fluida radi svoje robusnosti, iako ima određena ograničenja kod strujanja u blizini stijenke.
- $k - \omega SST$ („*Shear stress transport*“) model turbulencije predstavlja kombinaciju $k - \omega$ i $k - \varepsilon$ modela. $k - \omega$ model turbulencije dobro aproksimira turbulentna strujanja u viskoznim slojevima u blizini stijenki, a $k - \varepsilon$ model turbulencije dobro aproksimira turbulenciju daleko od stijenki u slobodnom toku [5]. Kombinacija ovih metoda čini ovaj model koristan u širokom spektru fizikalnih problema.

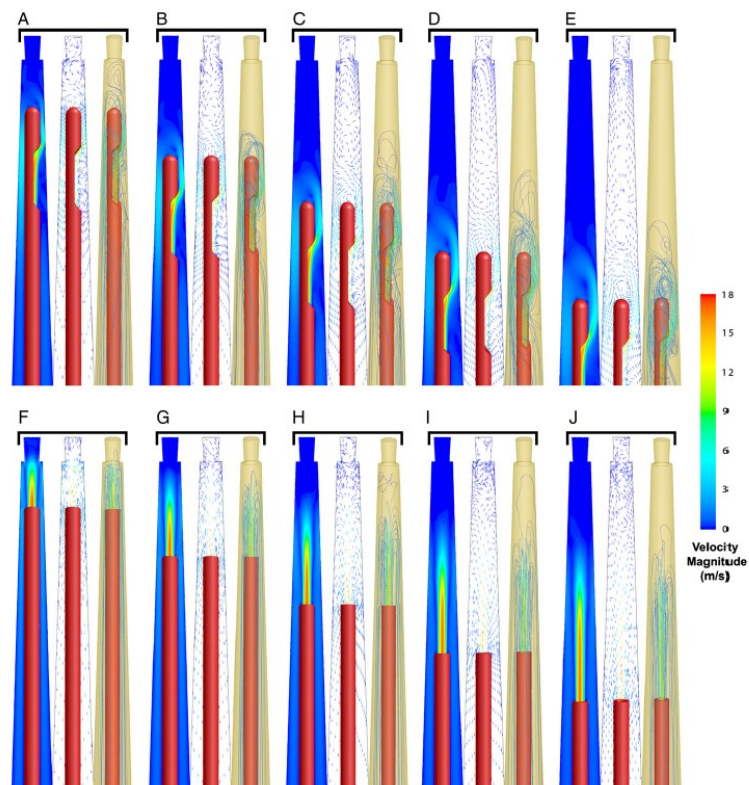
3.2. CFD simulacije strujanja fluida u korijenu zubnog kanala

Numeričke simulacije strujanja fluida za ispiranje zubnog kanala mogu omogućiti detaljniji uvid u sliku strujanja, što zbog malih dimenzija promatranog problema nije moguće provesti eksperimentalno. Navedeno je ispitano u radu Boutsoukis et al. 2009 [6] gdje se numeričkim pristupom ispitalo strujanje fluida u kanalu zuba za različite protoke (slika 3.2).

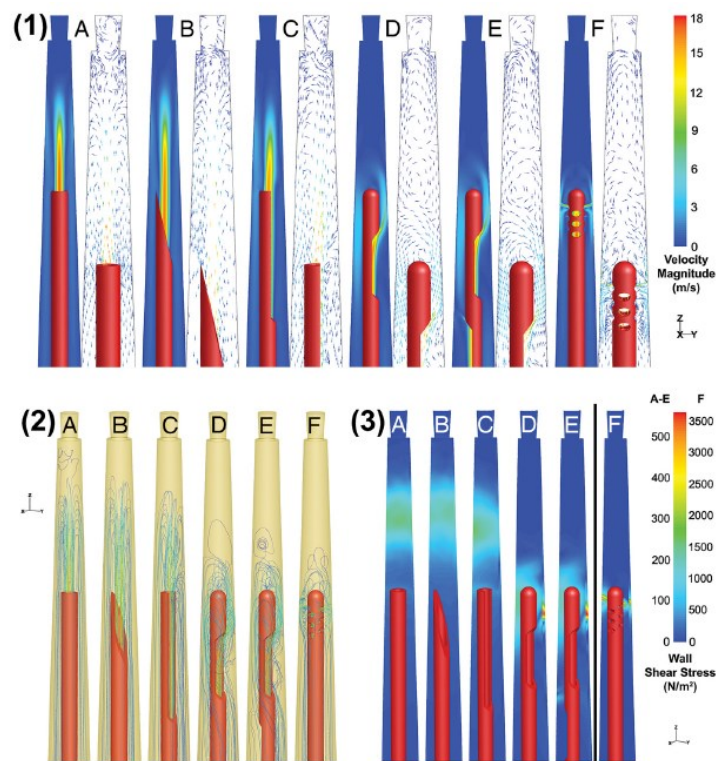


Slika 3.2 Ispitivanje strujanja fluida za različite protoke fluida [6]

Nakon potvrde o mogućnosti primjene numeričkih simulacija za dobivanje detaljnijeg opisa promatranog fenomena u radu Boutsoukis et al. 2010 [7] CFD simulacije su primijenjene kako bi se promatrao utjecaj dubine igle na efikasnost ispiranja. (Slika 3.3). U daljnjem radu Boutsoukis et al. [7] također su provedene i simulacije strujanja za različite izvedbe igla kako bi se ispitala efikasnost ispiranja i utjecaj geometrije na promatrani proces (Slika 3.4). Iz navedenog je vidljivo da se CFD simulacije sve više koriste u istraživanom području jer mogu pružiti informacije koje bi bilo iznimno teško dobiti eksperimentalnim ispitivanjima te bi zahtijevalo senzore visoke preciznosti koji bi mogli izmjeriti veličine od interesa.



Slika 3.3 Prikaz kontura brzina (lijevo), vektora brzina (sredina) i strujnica (desno) za različite izvedbe irigacijske igle i različite dubine igle [7]



Slika 3.4 Simulacije strujanja za različite izvedbe igla [7]

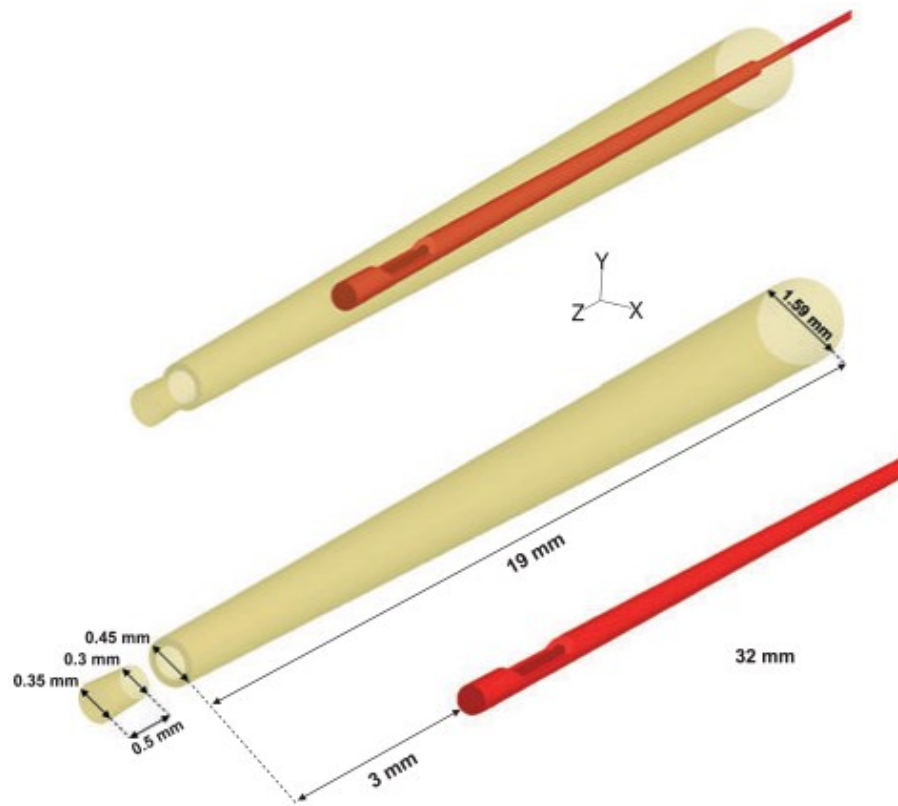
Može se primijetiti da navedena istraživanja koriste predefimirane oblike igli koje bi se daljnjim optimizacijskim procesom mogle poboljšati. Iz tog razloga, u ovom radu prvo su provedene numeričke analize za odabrane geometrije irigacijskih igala te su zatim definirane mogućnosti proširenja promatranog problema kroz parametrizaciju geometrije koja bi se daljnjim ispitivanjem mogla poboljšati te uz definirane uvjete, osobito ne premašivanja maksimalnog dozvoljenog tlaka u korijenu.

4. IZRADA GEOMETRIJE

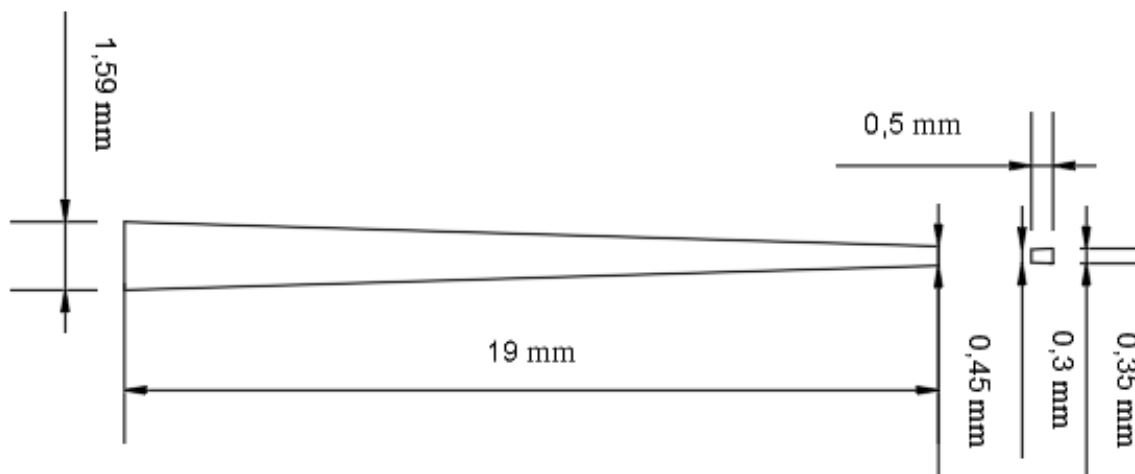
4.1. Model korijena zuba

Za potrebe simulacije potrebno je odabrati geometriju za modeliranje korijena zuba. S obzirom da se korijen zubnog kanala može značajno razlikovati od slučaja do slučaja, za ovaj rad preuzete su dimenzije korijena prethodno proučavane u radu „*Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a Computational Fluid Dynamics study*”, C. Boutsiouki, T. Lambrianidis i E. Kastrinakis [6], prikazan na slici 4.1.

Korijenski kanal je simuliran kao geometrijski odsječak stošca duljine 19 mm, s promjerom 0.45 mm (ISO 45) na punoj radnoj duljini, i promjerom od 1.59 mm na ulazu kanala, 19 mm koronarno. Oblik je usklađen s konačnim oblikovanjem kanala instrumentom na rotacijski pogon od Ni-Ti veličine 45 sa konusom 0.06 (K3, Sybron Endo, Orange, CA, SAD) korištenim na punoj radnoj duljini kako bi se standardizirao oblik kanala, kako je opisano u studiji (Boutsioukis et al 2007a). Apikalni završetak korijenskog kanala također je simuliran kao obrnuti odsječak stošca duljine 0.5 mm povezan s originalnim odsječkom. Promjer apikalnog dijela iznosi 0.3 mm, a promjer apikalnog foramena iznosi 0.35 mm. Geometrija apikalnog korijenskog kanala modelirana je prema podacima navedenim u studiji Ponce & Fernandez 2003, kako bi se simulirao oblik korijenskog kanala gornjeg središnjeg sjekutića. Smatra se da je igla postavljena 3 mm kraće od radne duljine, centrirana unutar kanala i nepomična [6].



Slika 4.1 Geometrijske karakteristike modela zubnog kanala [6]



Slika 4.2 Dimenzije modeliranog korijena zubnog kanala

U ovom radu, geometrije korijena su modelirane pomoću softvera *Ansys DesignModeler* (Slika4.3). Zbog postojeće simetrije, samo polovica je korištena u proračunu.



Slika 4.3 Korijenski kanal modeliran pomoću alata *Ansys DesignModeler*

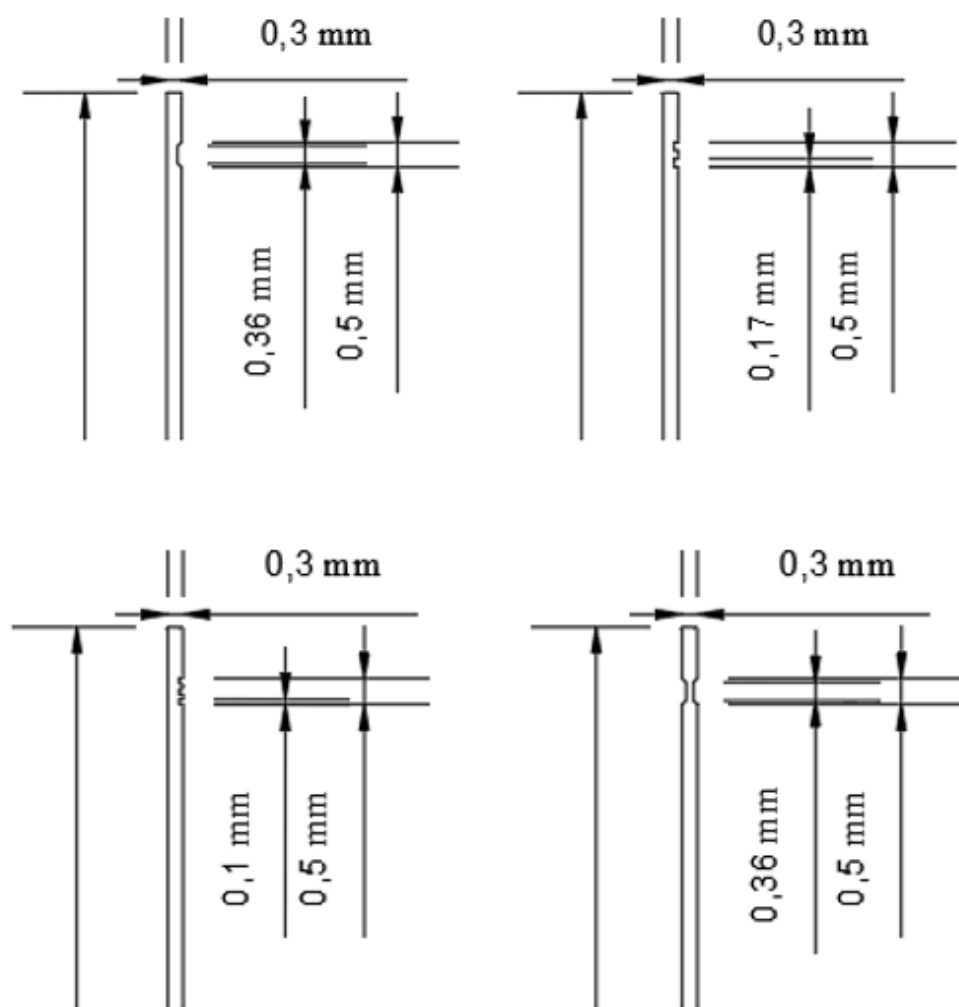
4.2. Modeli irigacijskih igla

Oblik odabrane igle (30G KerrHawe Irrigation Probe, KerrHawe SA, Bioggio, Švicarska) dobiven je iz stereoskopskog mikroskopa. Te slike su kalibrirane koristeći vanjski promjer igle, poznate iz studije (Boutsioukis et al 2007b) [6].



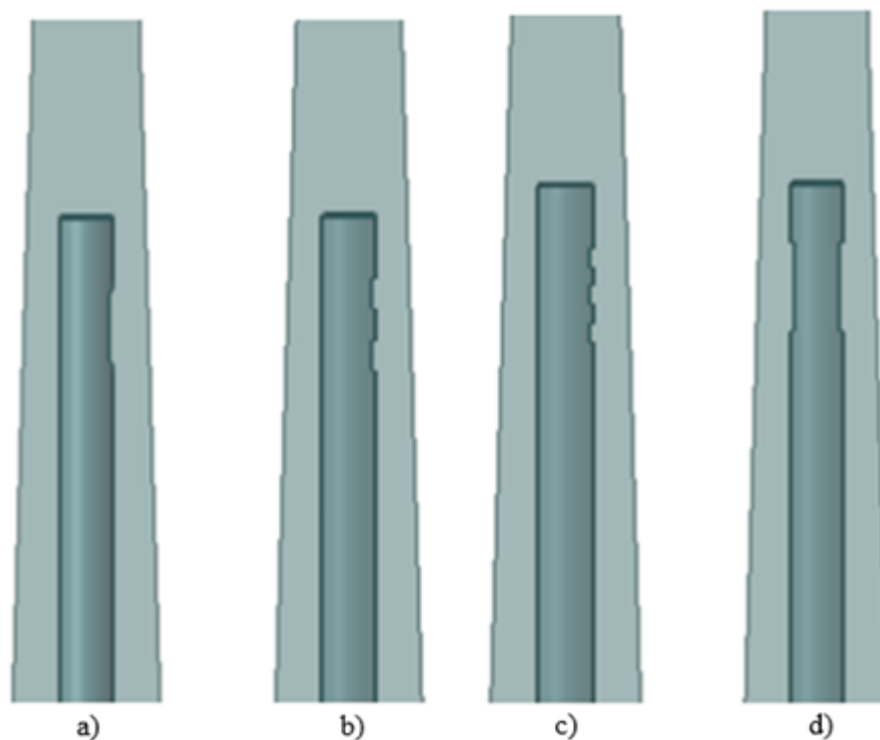
Slika 4.4 Usporedba igle s modeliranom geometrijom [6]

U ovom radu, odabrane su četiri različite izvedbe irigacijskih igli. Geometrije igala su modelirane prema prethodno navedenoj igli (Slika 4.4). Modeli se razlikuju prema otvoru za izlaz irigacijskog fluida, a to je napravljeno na način da je ukupna visina otvora uvijek ista te iznosi $0,5\text{ mm}$. Prema tome je izrađen prvi model, sa bočnim stranicama pod kutem 50° . Drugi model se sastoji od dva otvora za izlaz fluida, a udaljenost između otvora iznosi $0,167\text{ mm}$. Treći model je izrađen istim principom. Sastoji se od tri otvora za fluid, a udaljenost među njima iznosi $0,1\text{ mm}$. Četvrti model se sastoji od dva otvora za fluid na suprotnim stranama igle, a veličinom i pozicijom su jednaki kao u prvom modelu te iznose $0,5\text{ mm}$ i kutem 50° . Na slici 4.5 prikazan je detalj dimenzija otvora igala. Geometrije su modelirane pomoću *Ansys Design Modelera* te su prikazane u nastavku na slici 4.6.



Slika 4.5 Detalji dimenzija otvora irigacijskih igala

U nastavku, na slici 4.6 a) može se vidjeti geometrija igle samo s jednim otvorom koja odgovara originalno promatranoj geometriji. Na slici 4.6 b) može se vidjeti geometrija igle s dva otvora na fluid, ukupne veličine jednake prvom modelu. Na slici 4.6 c) može se vidjeti geometrija igle s tri otvora za fluid, ukupne veličine otvora jednak prvom modelu. Na slici 4.6 d) može se vidjeti geometrija igle s dva nasuprotna izlaza za fluid, s otvorima jednakih dimenzija kao u prvom modelu.

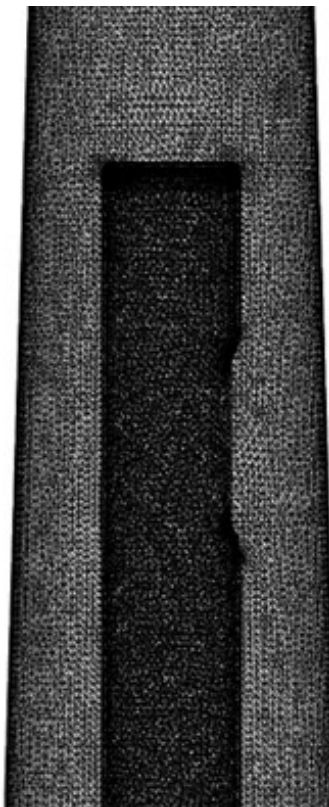


Slika 4.6 Korijski kanali i irigacijske igle modelirane u programu *Design Modeler*

5. IZRADA NUMERICKE MREŽE

Modelirane geometrije potrebno je omrežiti. Također, mrežu je potrebno ugustiti na dijelovima gdje dolazi do naglih promjena geometrije zbog nastanka recirkulacijskih zona. U tu svrhu korišten je alat *Vertex Sizing, Sphere of Influence*, a definiran je na rubovima otvora te na uglovima irigacijske igle. U nastavku su prikazani detalji omreženih geometrija, na kojima je vidljiv otvor irigacijske igle te su prikazane tablice s detaljima numeričkih mreža.

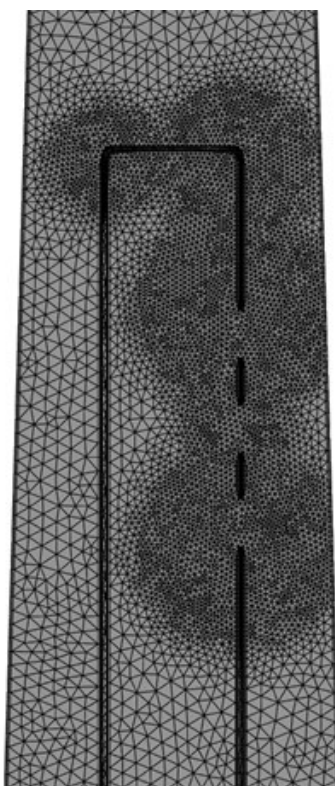
Na slici 5.1 prikazan je prvi omreženi model irigacijske igle i zubnog kanala. Na slici 5.2 prikazan je drugi omreženi model igle i zubnog kanala. Na slici 5.3 prikazan je treći omreženi model irigacijske igle i zubnog kanala. Na slici 5.4 prikazan je četvrti omreženi model irigacijske igle i zubnog kanala.



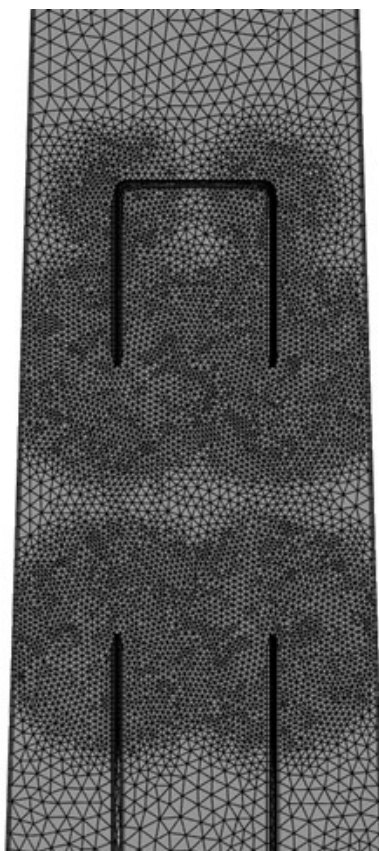
Slika 5.1 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s jednim otvorom



Slika 5.2 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s dva otvora



Slika 5.3 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s tri otvora



Slika 5.4 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s nasuprotnim otvorima

U tablici 5.1 prikazani su parametri numeričkih mreža korišteni za sve četiri promatrane geometrije. Prve dvije izvedbe su rješavane direktnim numeričkim rješavanjem, *Laminar* modelom, koji zahtijeva elemente što manjih dimenzija. Za razliku od prve dvije izvedbe, treća i četvrta su rješavane turbulentnim modelima $k - \omega SST$ i $k - \epsilon$. Pri rješavanju turbulentnim modelima moguće je koristiti mrežu s manjim brojem elemenata jer se ti modeli rješavaju Reynoldsov usrednjenim Navier Stokesovim jednačbama.

Tablica 5.1 Parametri numeričkih mreža

| | Geometrija 1 | Geometrija 2 | Geometrija 3 | Geometrija 4 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Veličina elementa | 0,000015 mm | 0,000015 mm | 0,00003 mm | 0,00003 mm |
| Veličina na ugušćenju | - | - | 0,00001 mm | 0,00001 mm |
| Ukupni broj elemenata | 7301658 | 7284701 | 1937228 | 2161923 |

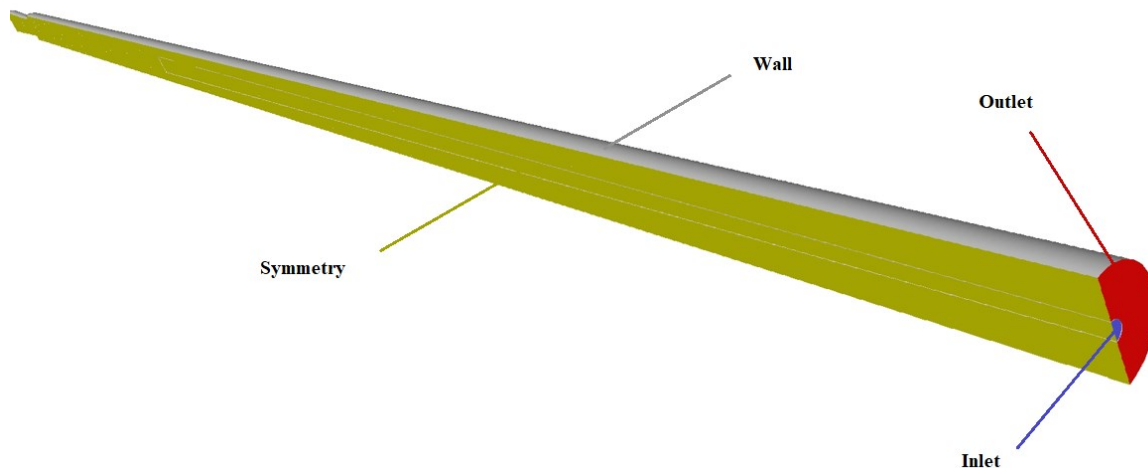
6. POSTAVKE SIMULACIJA

6.1. Rubni uvjeti

Nakon omrežavanja geometrija, potrebno je još definirati rubne uvjete. Za sva četiri modela irigacijske igle i zubnog kanala definirani su na isti način, kao što je prikazano na slici 6.1.

Definirani su:

- Ulazni rubni uvjet (*Inlet*),
- Izlazni rubni uvjet (*Outlet*),
- Rubni uvjet simetrije (*Symmetry*),
- Rubni uvjet na stijenci (*Wall*).



Slika 6.1 Rubni uvjeti domene

Na ulaznom presjeku koji je definiran na površini irigacijske igle, definirana je vrijednost ulazne brzine fluida. Na izlazu presjeku domene, koji je definiran na površini zubnog kanala, definiran je rubni uvjet *outflow* koji definira da sav fluid koji je ušao u domenu mora izaći na tom rubnom uvjetu. Kako se radi o simetričnom modelu te su promatrane samo stacionarne simulacije, moguće je

modelirati samo polovicu domene kako bi se ubrzao proces proračuna. Iz tog razloga je korišten rubni uvjet simetrije na odgovarajućoj površini. Rubni uvjet na krutoj stijenci definira da su brzine fluida uz stijenu jednake nuli.

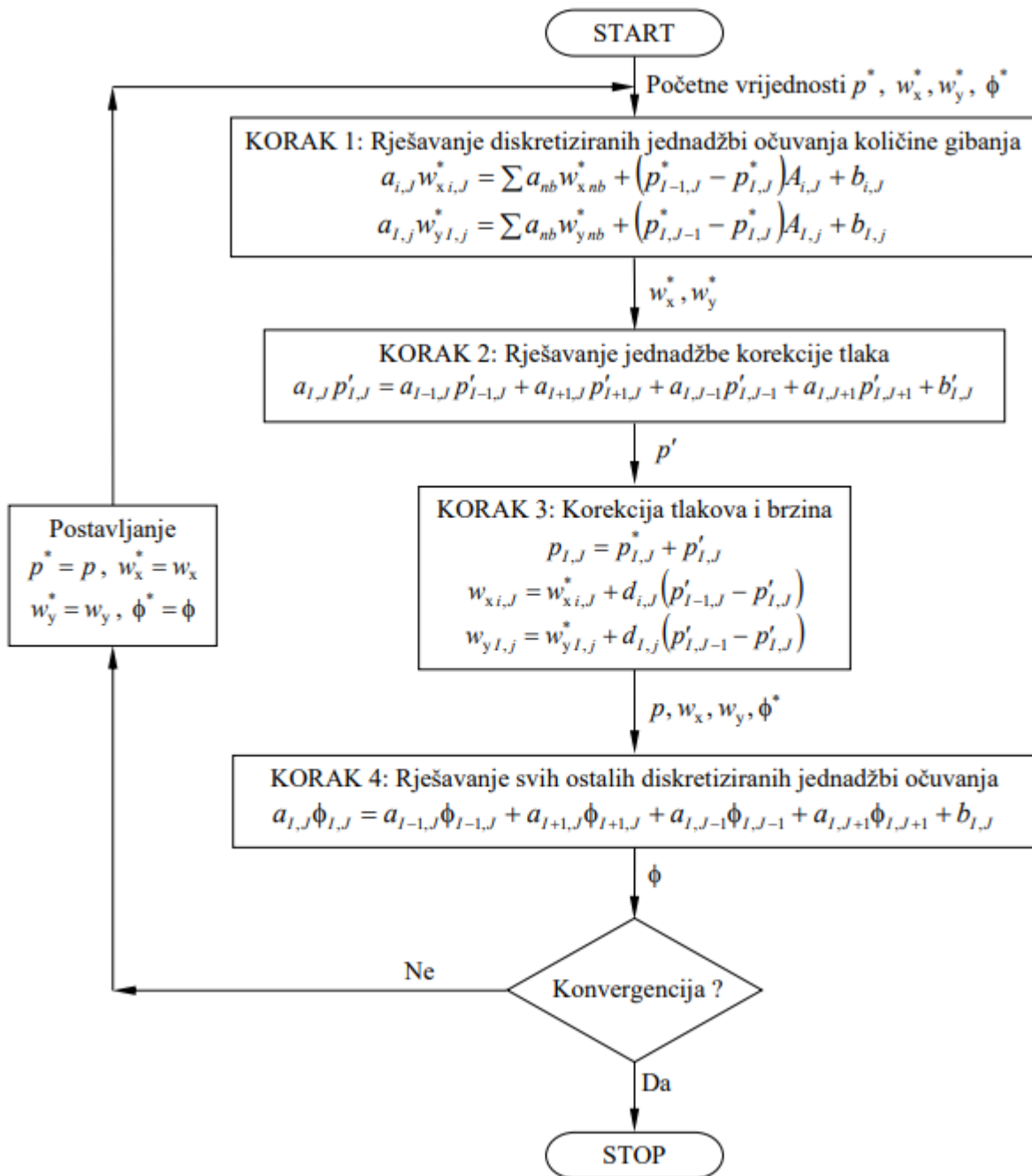
6.2. Numeričke postavke

Za rješavanje turbulentnih modela korišten je SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*) algoritam. U najširoj primjeni kod numeričkog rješavanja RANS modela Navier Stokesovih jednadžbi su numeričkih modeli bazirani na SIMPLE pristupu. Algoritam koristi iterativno rješavanje jednadžbi brzine i tlaka kroz sljedeće korake:

1. Rješavanje diskretiziranih jednadžbi očuvanja količine gibanja: brzine se izračunavaju pomoću pretpostavljenog polja tlaka
2. Rješavanje jednadžbe korekcije tlaka: izračunava se na temelju predikcija brzina
3. Korekcija tlakova i brzina: brzine se korigiraju pomoću novo izračunatog polja tlaka
4. Rješavanje ostalih diskretiziranih jednadžbi očuvanja
5. Postupak se ponavlja iterativno do konvergencije

Iako postoje napredniji algoritmi za rješavanje problema koji uključuju strujanje fluida, SIMPLE algoritam efikasno rješava probleme s promjenjivim tlakom i turbulentnim strujanjem fluida. Također, ovaj princip je prihvaćen iz razloga što ima niske računalne zahtjeve te je relativno jednostavan u programerskom smislu [5].

Na slici 6.2 prikazan je shematski tok SIMPLE algoritma.



Slika 6.2 Dijagram toka SIMPLE algoritma [4]

Za izvođenje svih simulacija korišten je *Ansys Fluent* rješavač verzija 19.2. U svim promatranim slučajevima definiran je irigans koji je u ovom slučaju fluid gustoće (ρ) 1040 kg/m^3 i dinamičke viskoznosti (ν) 0.000986 kg/ms . Simulacije su provedene za četiri različita slučaja ulaznih brzina strujanja 1 m s^{-1} , 6 m s^{-1} , 12 m s^{-1} i 20 m s^{-1} . Za različite brzine na ulaznom presjeku definirani su različiti modeli rješavanja. Za ulazne brzine strujanja fluida 1 m s^{-1} i 6 m s^{-1} korišten je *Laminar* model zbog Reynoldsovog broja koji tada je tada manji od 2300. Za ulaznu brzinu strujanja fluida 12 m s^{-1} razvija se prijelazni profil brzine u igli te je iz tog razloga korišten *k – ω SST* turbulentni model. Za ulaznu brzinu strujanja fluida 20 m s^{-1} razvija se turbulentni tok fluida u igli (Reynoldsov broj puno veći od 2300) te je iz tog razloga korišten *k – ϵ* turbulentni model.

U tablici 6.1 mogu se iščitati iznosi brzina na ulaznom presjeku igla te proračunate vrijednosti volumnih protoka fluida i Reynoldsovog broja za sva četiri odabrana modela irigacijskih igla.

Tablica 6.1 Stanje na ulaznom presjeku protoka irigacijskih igla

| Ulazna brzina (m s^{-1}) | Volumni protok fluida (mL s^{-1}) | Reynoldsov broj |
|-------------------------------------|--|-----------------|
| 1 | 0,07 | 316 |
| 6 | 0,42 | 1898 |
| 12 | 0,84 | 3797 |
| 20 | 1,41 | 6329 |

Volumni protoci fluida izračunati su sljedećim izrazom:

$$Q = u \cdot A \quad (6.1)$$

Gdje je:

Q protok fluida,

u prosječna brzina fluida,

A površina poprečnog presjeka igle.

Za proračun Reynoldsovog broja korišten je sljedeći izraz:

$$Re = \rho \cdot u \cdot D / \mu \quad (6.2)$$

Gdje je:

Re Reynoldsov broj,

ρ gustoća fluida,

u prosječna brzina strujanja fluida,

D karakterističan promjer irigacijske igle

μ kinematska viskoznost fluida.

Budući da je iz prethodno navedenih definiranih karakteristika fluida poznata samo dinamička viskoznost, potrebno je izračunati kinematsku viskoznost prema sljedećem izrazu:

$$\mu = \nu / \rho \quad (6.3)$$

Gdje je:

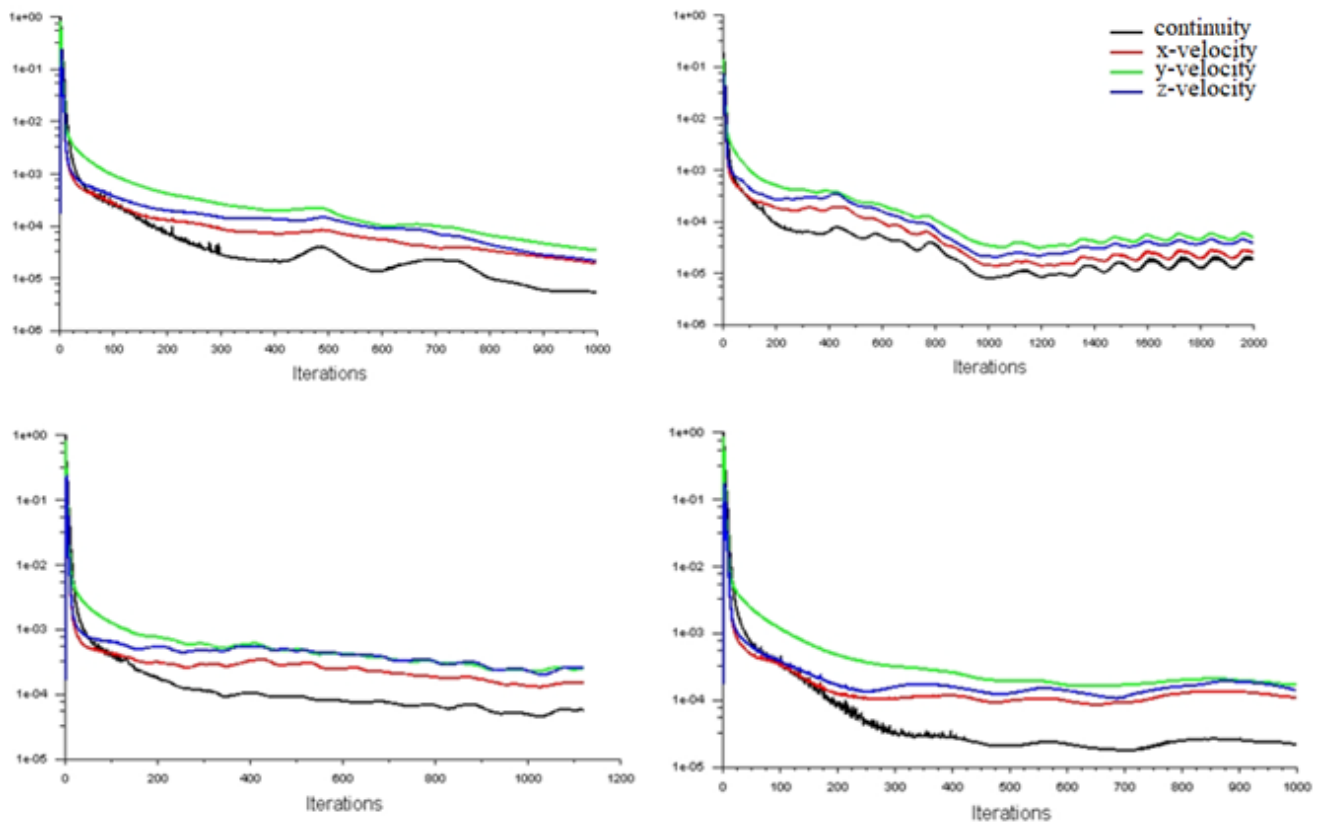
μ kinematska viskoznost fluida,

ν dinamička viskoznost fluida,

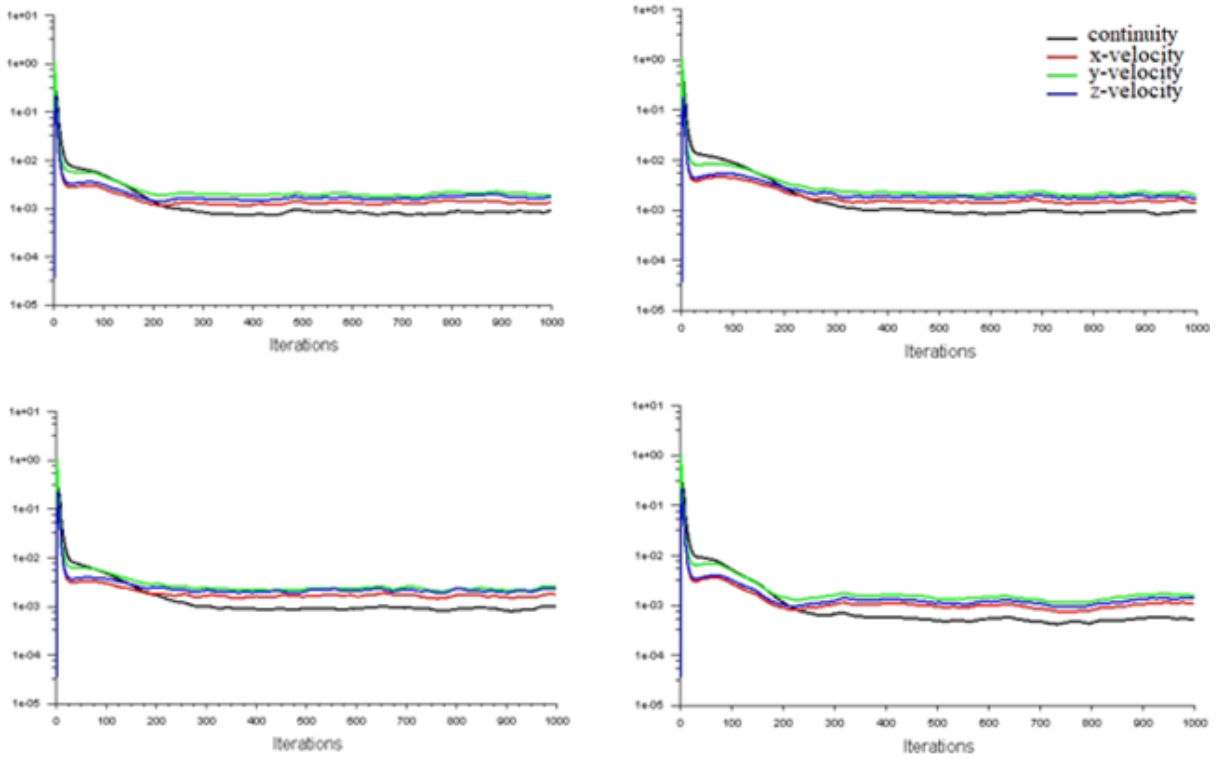
ρ gustoća fluida.

7. REZULTATI

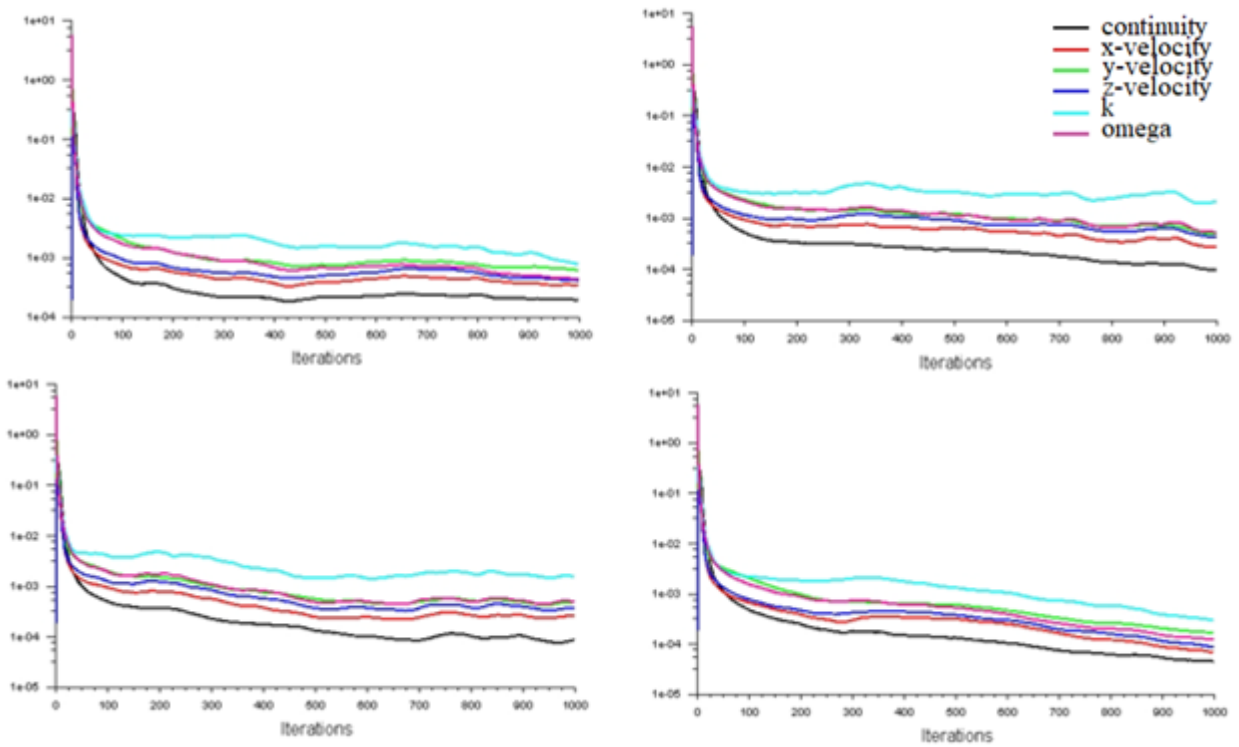
Uvjet konvergencije je postavljen na 10^{-5} za sve simulacije. Niti u jednom slučaju nije došlo do konvergencije iz razloga što niti jedan slučaj nije krajnje stacionaran, odnosno neće se stvoriti potpuno stacionarno stanje. U nastavku, na slikama 7.1, 7.2, 7.3 i 7.4, su prikazani dijagrami reziduala za sve modele pri različitim ulaznim brzinama fluida.



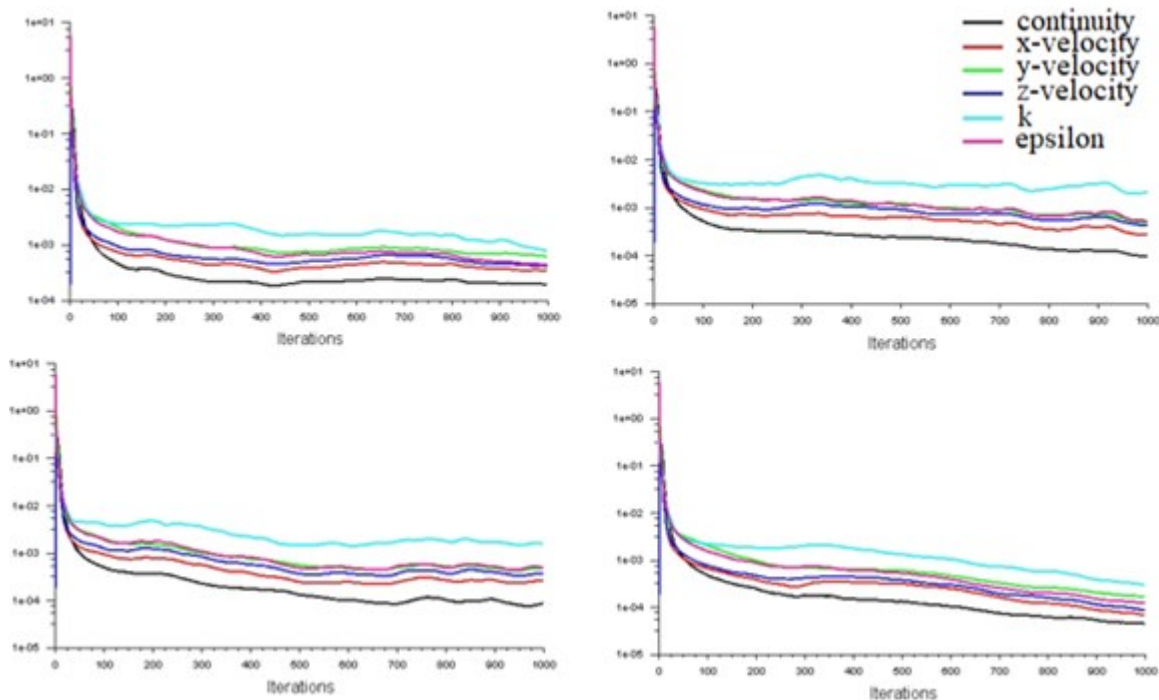
Slika 7.1 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1}



Slika 7.2 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1}



Slika 7.3 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1}



Slika 7.4 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1}

7.1. Konture tlaka i brzina

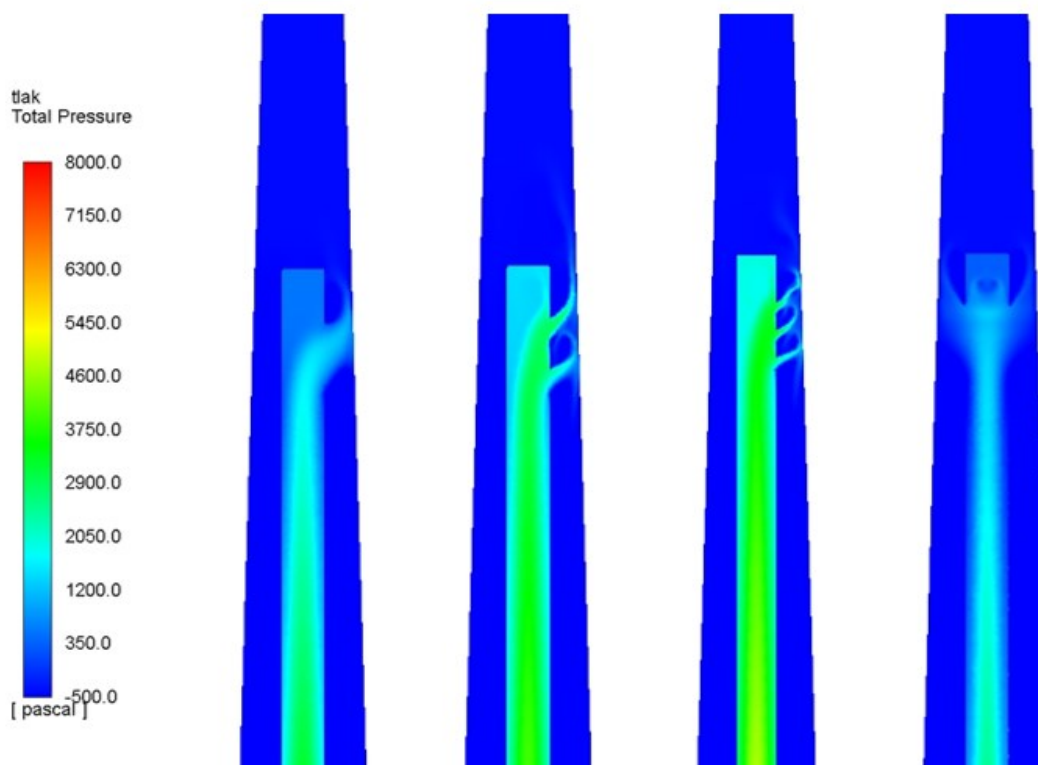
U nastavku su prikazani dobiveni rezultati simulacija. Prikazane su konture tlaka i konture brzina u blizini otvora irigacijske igle iz kojeg protječe irigacijski fluid.

Konture tlaka prikazuju vrijednosti *Total Pressure*, što predstavlja zbroj statičkog i dinamičkog tlaka. Vrijednost tlaka na izlazu iz irigacijske igle vrlo je bitna za ocjenu sigurnosti modela irigacijske igle kako ne bi došlo do oštećenja okolnog tkiva ili živca zuba pri irigaciji. Također, korisne su za proučavanje i identificiranje višeg i nižeg tlaka u toku fluida.

Konture brzina prikazuju vrijednosti *Velocity Magnitude*, što predstavlja vrijednosti brzine fluida u irigacijskoj igli i korijenu zuba. Korisno je prikazati konture brzina kako bi se moglo uočiti područja ubrzanja i usporavanja protoka fluida u odnosu na početnu brzinu.

7.1.1. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1}

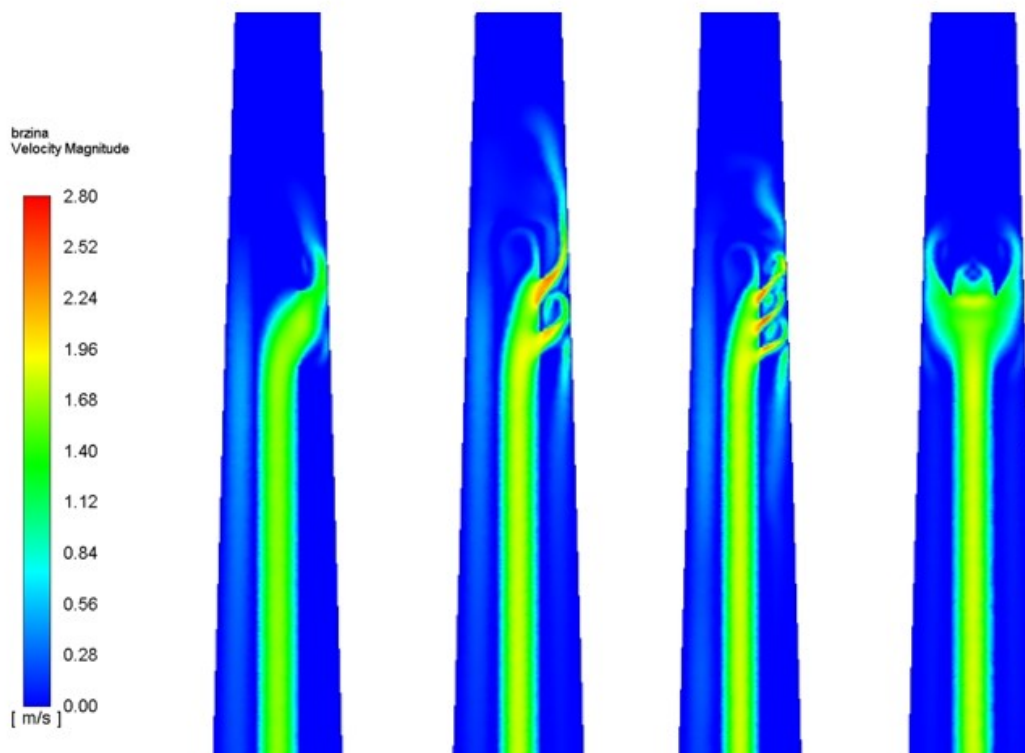
Na slici 7.5 prikazani su usporedno rezultati kontura tlaka pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 1 m s^{-1} za sva četiri modela igala.



Slika 7.5 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1}

Uočava se da treći model postiže najveće vrijednosti tlaka u okolini otvora igle te iznosi približno 4 kPa . Četvrti model, s dva nasuprotna izlaza za fluida, postiže najmanje vrijednosti tlaka u promatranom području.

Na slici 7.6 prikazani su usporedno rezultati kontura brzina pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 1 m s^{-1} za sva četiri modela igala.

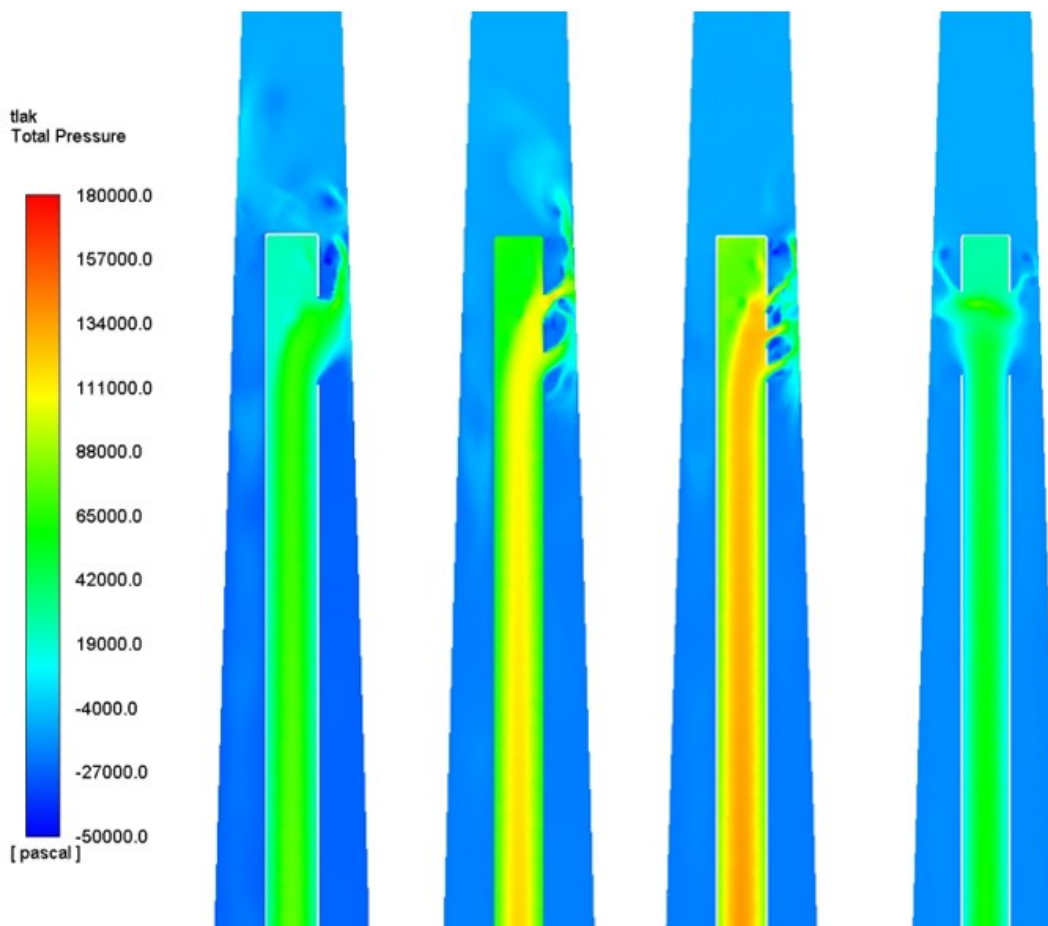


Slika 7.6 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1}

Uočava se da drugi i treći model, sa dva i tri otvora za izlaz fluida, postižu najveće brzine u okolini otvora za izlaz fluida te iznosi približno $2,5 \text{ m s}^{-1}$.

7.1.2. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1}

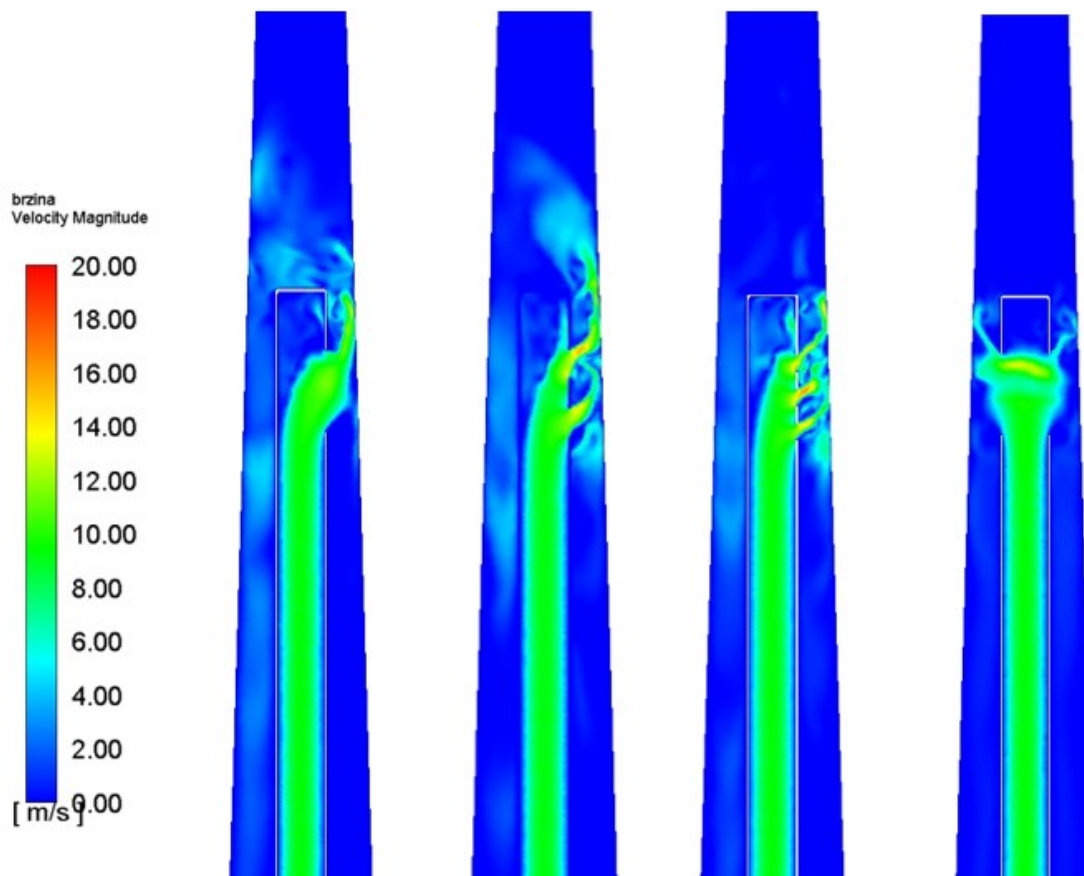
Na slici 7.7 prikazani su usporedno rezultati kontura tlaka pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 6 m s^{-1} za sva četiri modela igla.



Slika 7.7 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1}

Uočava se da treći model, kao u prethodnom slučaju, ostvaruje najveće vrijednosti tlaka pri izlazu iz irigacijske igle, a maksimalno iznosi približno 130 kPa . Također, prvi i četvrti model ostvaruju manje iznose tlaka u promatranom području u odnosu na ostale modele.

Na slici 7.8 prikazani su usporedno rezultati kontura brzina pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 6 m s^{-1} za sva četiri modela igala.

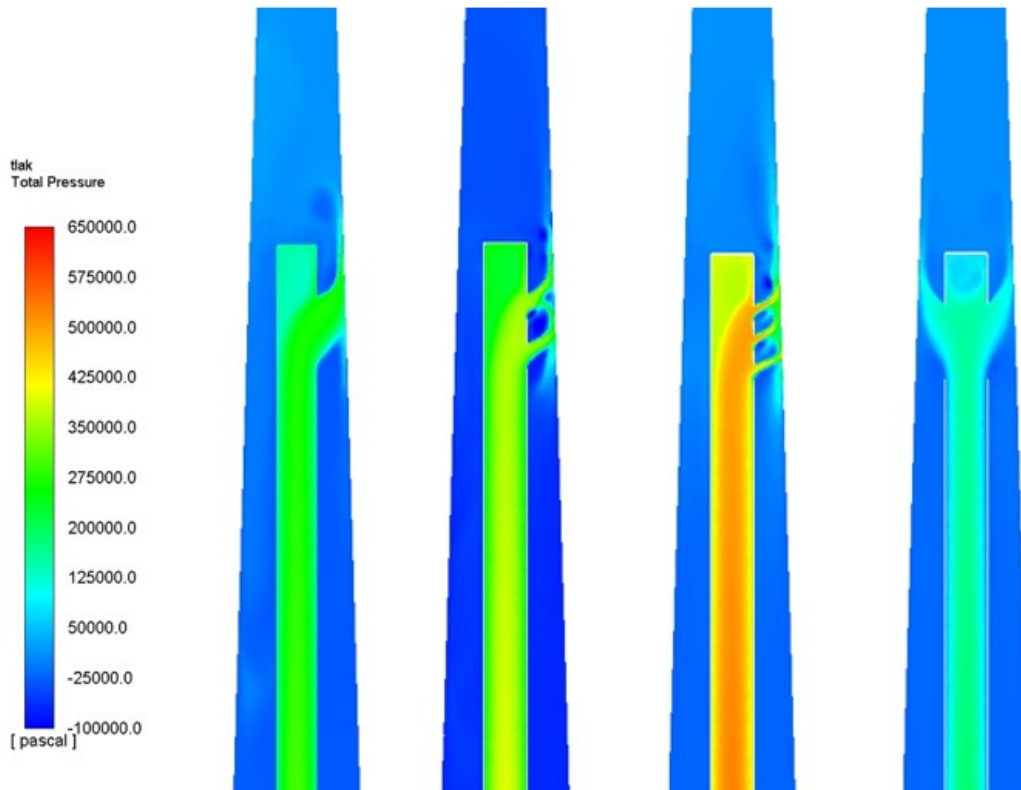


Slika 7.8 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1}

Uočava se da, kao u prethodnom slučaju, drugi i treći model postižu najveće vrijednosti brzina, a iznos maksimalne brzine je približno 17 m s^{-1} u promatranom području. Četvrti model ostvaruje najmanje brzine u promatranom području.

7.1.3. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1}

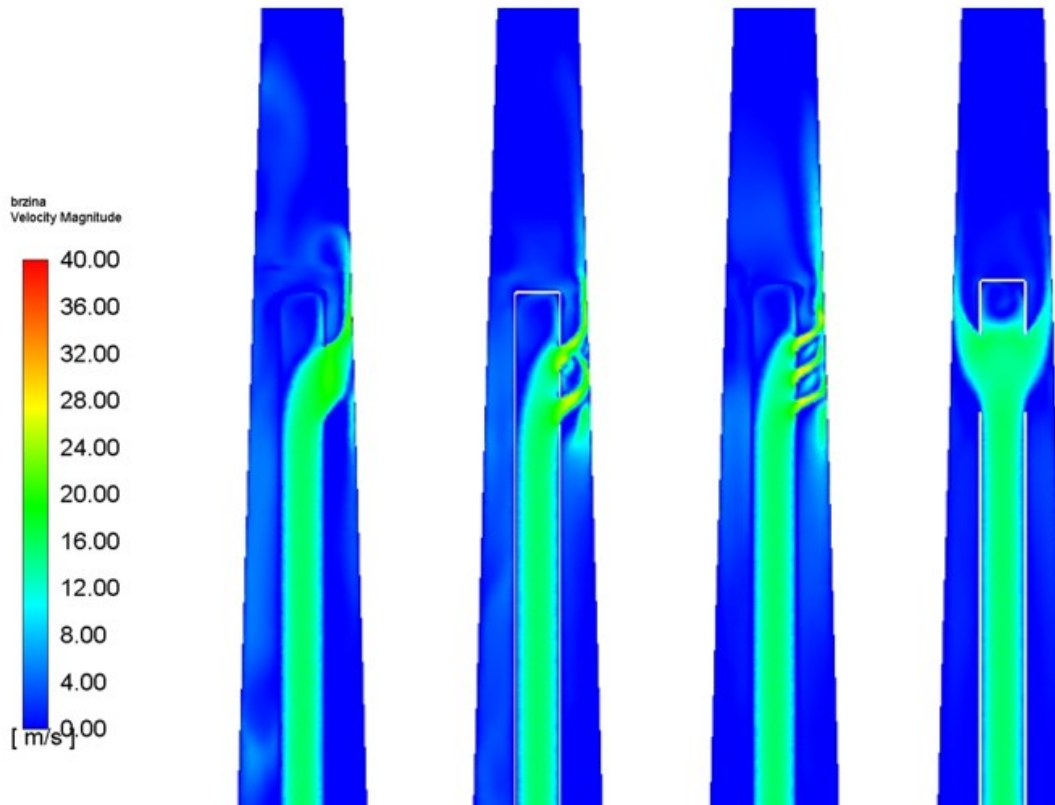
Na slici 7.9 prikazani su usporedno rezultati kontura tlaka pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 12 m s^{-1} za sva četiri modela igala.



Slika 7.9 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1}

Uočava se da, kao u prethodna dva slučaja, treći model ostvaruje najveći iznos tlaka u promatranom području, a maksimalno iznosi približno 400 kPa . Također, uočava se da četvrti model postiže najmanje iznose tlaka pri izlazu irigacijske igle.

Na slici 7.10 prikazani su usporedno rezultati kontura brzina pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 12 m s^{-1} za sva četiri modela igala.

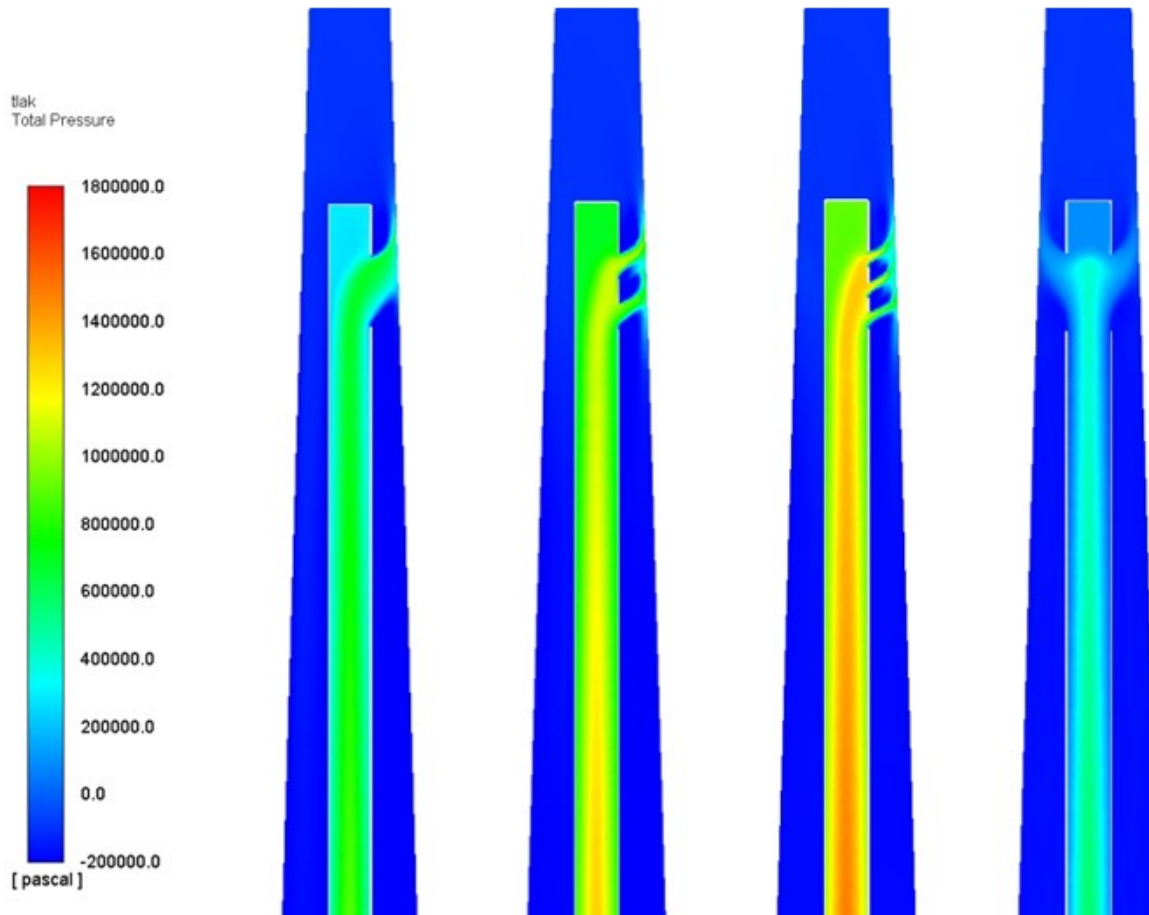


Slika 7.10 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1}

Kao u prethodnim slučajevima, drugi i treći model postižu najveće iznose brzine, a iznos maksimalne brzine je približno 30 m s^{-1} u promatranom području.

7.1.4. Konture tlaka i brzina pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1}

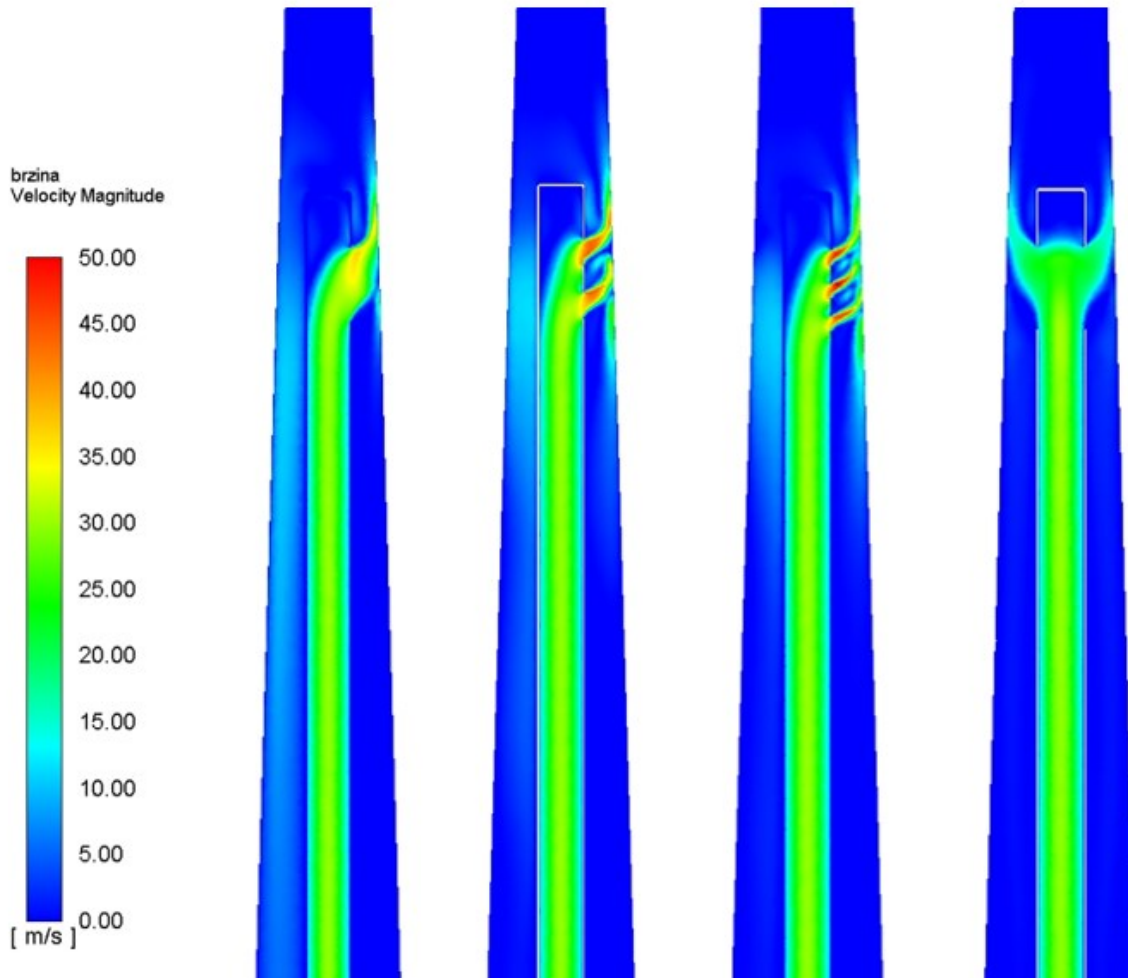
Na slici 7.11 prikazani su usporedno rezultati kontura tlaka pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 20 m s^{-1} za sva četiri modela igala.



Slika 7.11 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1}

Treći model, kao u prethodnim slučajevima, ostvaruje najveće iznose tlaka u promatranom području, a maksimalno iznosi približno 1300 kPa . Četvrti model ostvaruje najmanji tlak u odnosu na ostale modele.

Na slici 7.12 prikazani su usporedno rezultati kontura brzina pri ulaznoj brzini fluida za irigaciju od 20 m s^{-1} za sva četiri modela igala.



Slika 7.12 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1}

Uočava se da drugi i treći model ostvaruju veće brzine u promatranom području u odnosu na preostale modele, a iznos maksimalne brzine je približno 50 m s^{-1} u promatranom području.

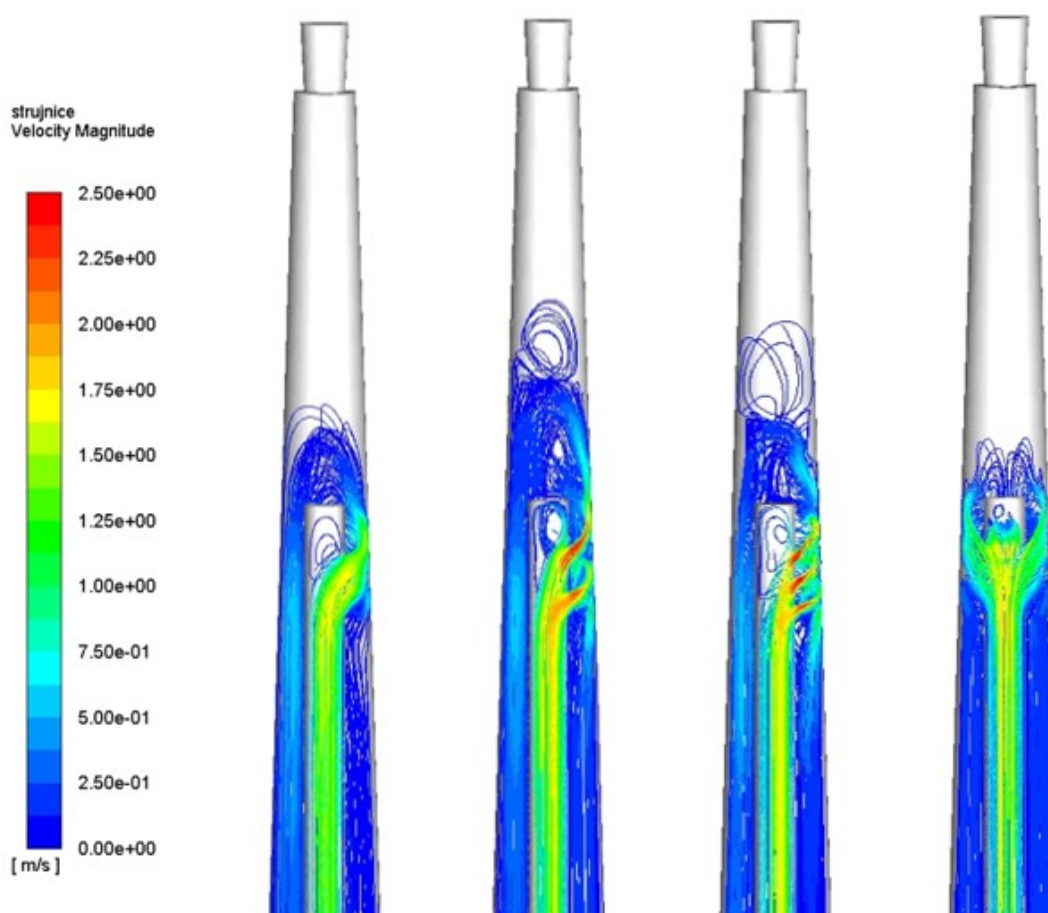
7.2. Strujnice

Vizualizacija strujnica u analizi protoka fluida daje dobar uvid u ponašanje fluida i obrazac protoka kroz domenu. Strujnice su prikazane prema vrijednostima brzina, *Velocity Magnitude*. Vizualizacijom strujnica moguće je uvidjeti u kojim područjima domene dolazi do pojave vrtloženja, što je općenito bitno prilikom optimizacije dizajna geometrije. Također, u ovom slučaju, može se analizirati hoće li

tok irigansa zahvatiti sva teško dostupna područja zubnog kanala, kao što je apikalni dio te hoće li čišćenje irigansom biti učinkovito.

7.2.1. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1}

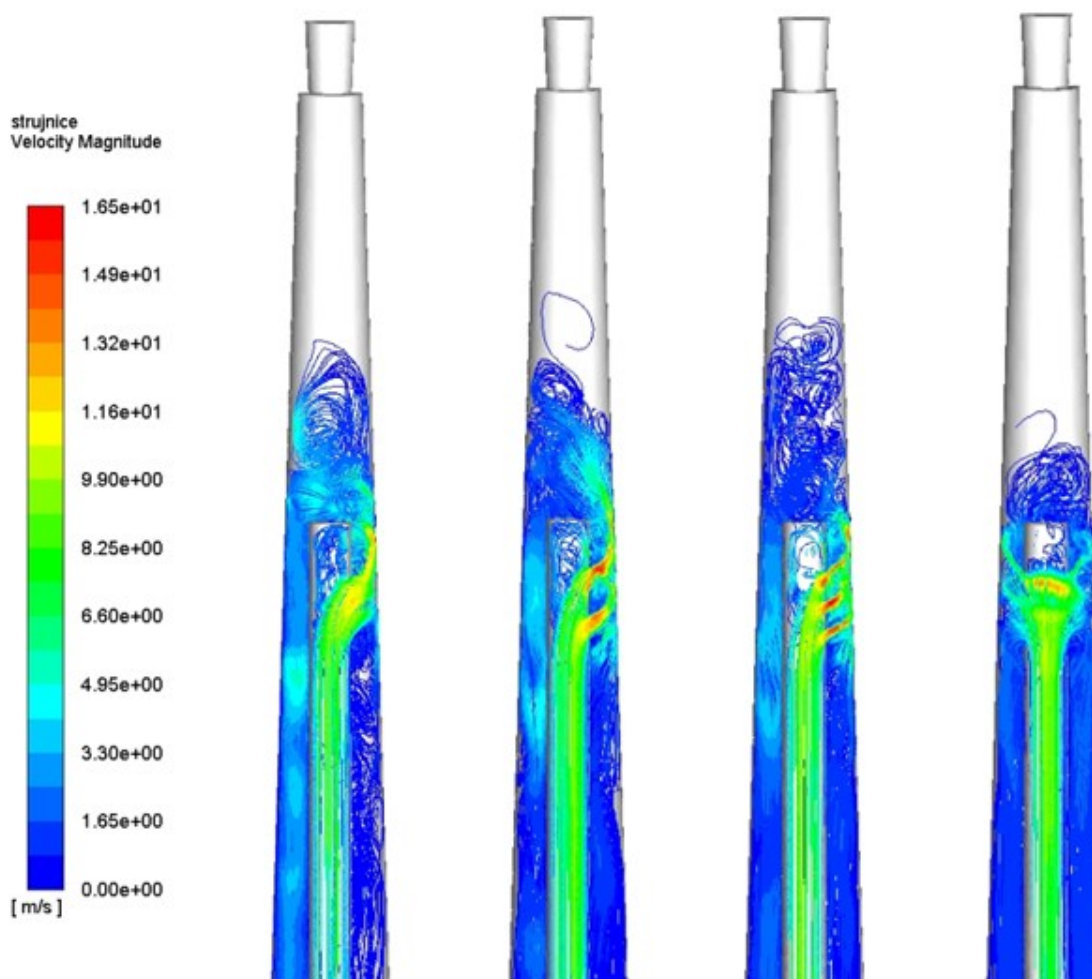
Na slici 7.13 prikazane su strujnice fluida pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1} . Uočava se da drugi model, s dva otvora za izlaz fluida, ostvaruje najviše vrtloženja prema apikalnom dijelu korijenskog kanala. S druge strane, četvrti model igle, s nasuprotnim otvorima, ostvaruje najmanje vrtloženja što nije poželjno prilikom ispiranja zubnih kanala.



Slika 7.13 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1}

7.2.2. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1}

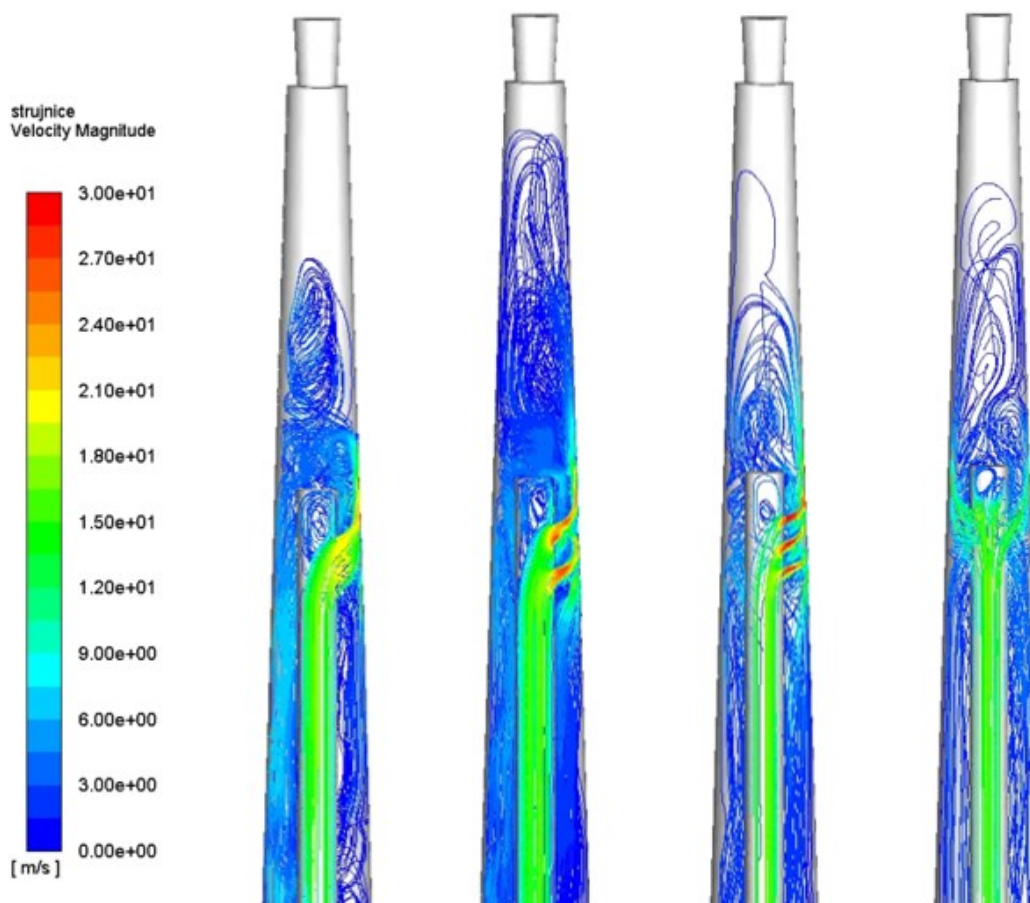
Na slici 7.14 prikazane su strujnice fluida pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1} . Uočava se da drugi i treći model, s dva i s tri otvora za izlaz fluida, ostvaruju najviše vrtloženja prema apikalnom dijelu korijenskog kanala. Prvi model igle, s jednim otvorom, također ostvaruje više vrtloženja nego u prethodnom slučaju ali u manjoj mjeri od ostalih modela. Četvrti model igle ostvaruje najmanje vrtloženja.



Slika 7.14 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1}

7.2.3. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1}

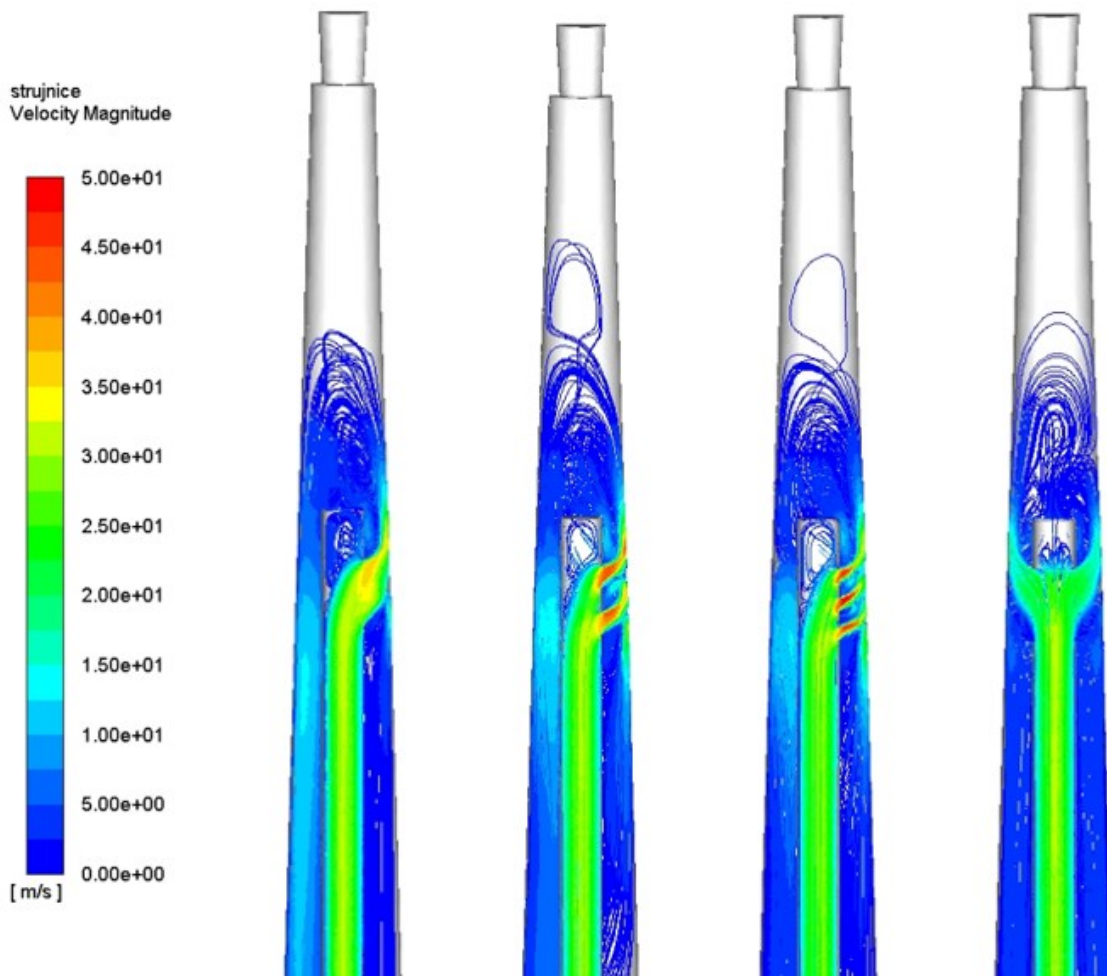
Na slici 7.15 prikazane su strujnice fluida pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1} . Kao u prethodnim slučajevima, najviše vrtloženja se uočava kod drugog modela irigacijske igle, gdje vrtloženje dolazi najbliže apikalnom dijelu zubnog kanala.



Slika 7.15 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1}

7.2.4. Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1}

Na slici 7.16 prikazane su strujnice fluida pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1} . Najviše vrtloženja prema apikalnom dijelu zubnog kanala ostvaruju drugi i trećim modeli igla. S druge strane, prvi i četvrti modeli igla ostvaruju ne zahvaćaju željeno područje fluidom.



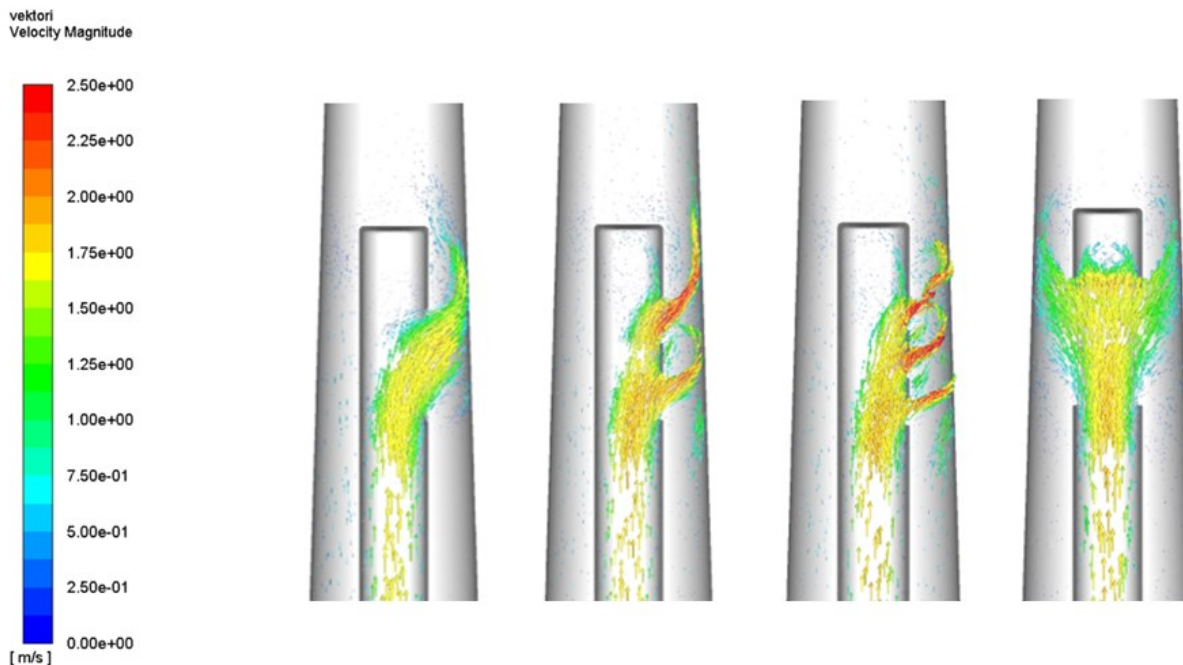
Slika 7.16 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1}

7.3. Vektori brzina

Vektori brzina prikazuju lokalnu brzinu i smjer gibanja čestica fluida. Prikazom smjera strujanja čestica fluida jasno je vidljivo u kojem smjeru se fluid kreće kroz čitavu domenu. Time je olakšano razumijevanje kretanja fluida u različitim točkama domene. Prikaz smjera strujanja čestica fluida je koristan za vizualizaciju i razumijevanje složenih strujanja kao što je pojava vrtloženja i recirkulacijskih zona.

7.3.1. Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1}

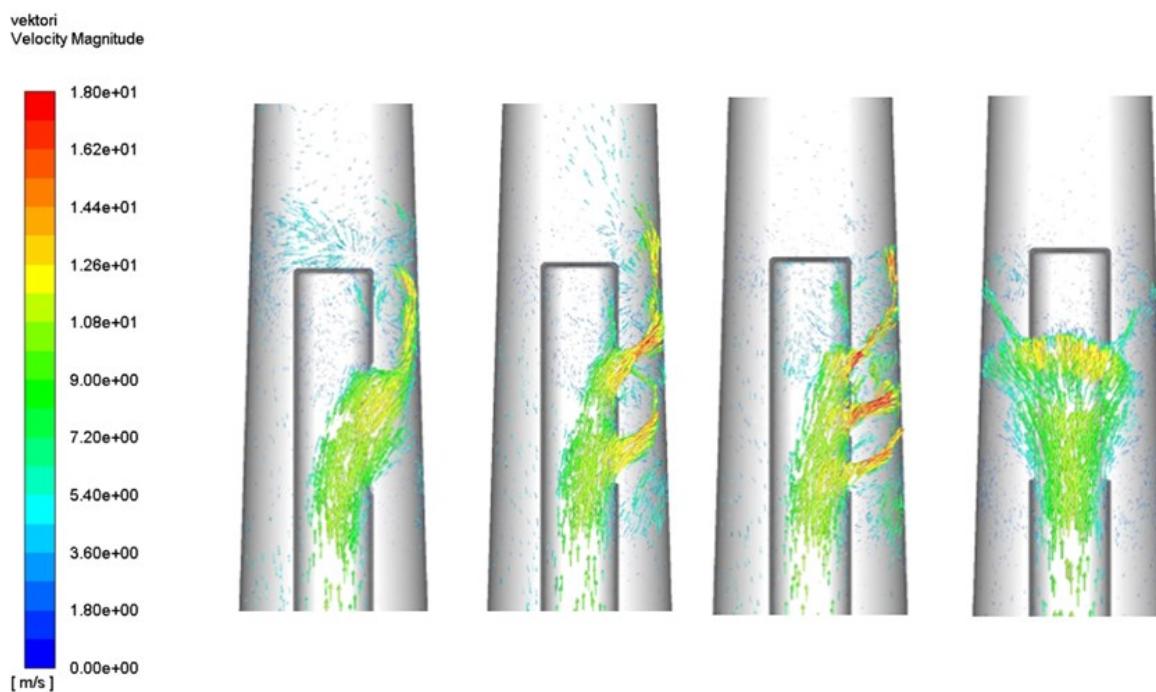
Slika 7.17 prikazuje vektore brzina pri ulaznoj brzini fluida od 1 m s^{-1} . Uočava se da je brzina fluida najveća pri samom izlazu iz irigacijske igle. Također, uočava se da je kod trećeg modela, igle s tri otvora, brzina na izlazu veća u odnosu na ostale modele irigacijskih igla. U tom slučaju brzina pri izlazu iz igle maksimalno iznosi oko $2,5 \text{ m s}^{-1}$, što je 2,5 puta veća od brzine fluida na ulaznom presjeku igle čime se može uspostaviti odnos ulaznog presjeka igle i izlaznog presjeka otvora igle. Kod primjerice trećeg modela igle izlazni presjek igle je otprilike toliko puta manji od ulaznog presjeka domene radi čega dolazi do ubrzanja fluida. Uočava se da drugi model također ostvaruje značajno veće iznose brzina u odnosu na preostala dva modela. U slučaju četvrtog modela, brzina fluida na izlazu je gotovo jednaka kao na ulaznom presjeku irigacijske igle. čime se može uspostaviti odnos ulaznog presjeka igle i izlaznog presjeka otvora igle. Kod četvrtog modela igle izlazni presjek igle je otprilike jednak ulaznom presjeku domene radi čega dolazi ne dolazi do velikog ubrzanja fluida. U svim slučajevima, dolazi do stvaranja recirkulacijskih zona fluida.



Slika 7.17 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1}

7.3.2. Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1}

Slika 7.18 prikazuje vektore brzina pri ulaznoj brzini fluida od 6 m s^{-1} . Uočava se da je brzina fluida najveća pri izlazu iz trećeg modela irigacijske igle. U tom slučaju brzina pri izlazu iz igle maksimalno iznosi otprilike 17 m s^{-1} , što je gotovo 3 puta veća od brzine fluida na ulaznom presjeku igle. U slučaju drugog modela igle se također ostvaruju nešto veće brzine u odnosu na preostala dva modela. Kod preostalih modela, iznos brzine je manji. Također, uočava se stvaranje recirkulacijskih zona kod svih modela igla.

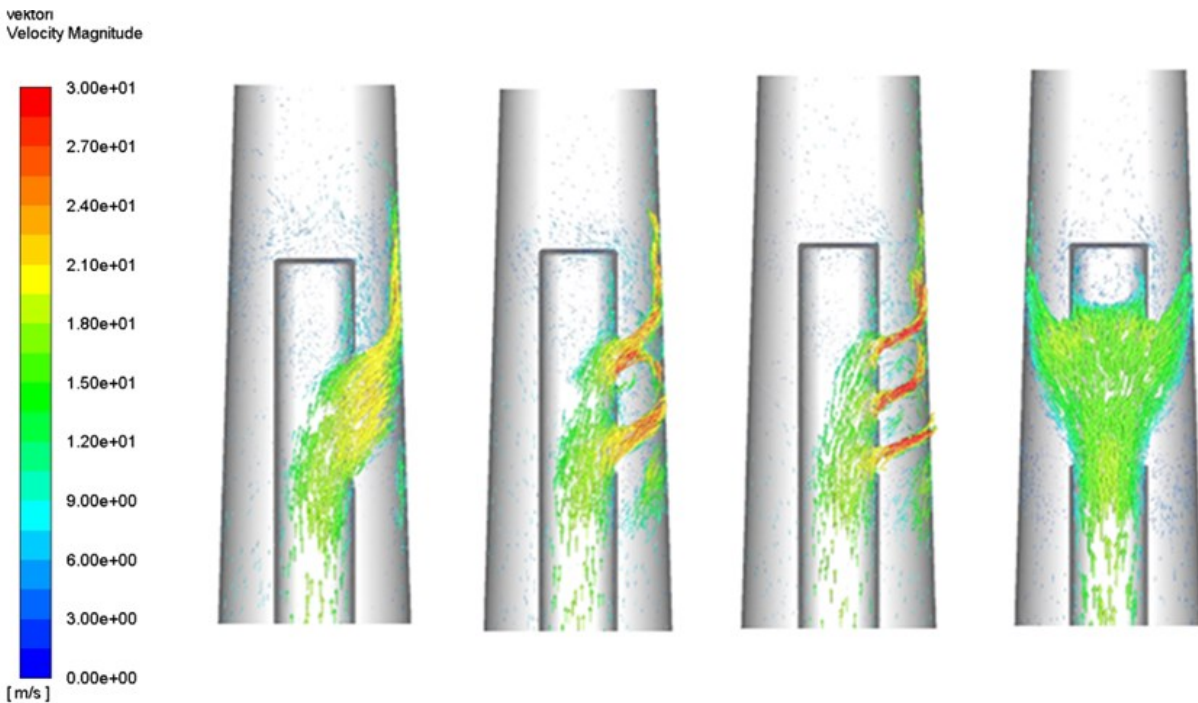


Slika 7.18 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1}

7.3.3. Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1}

Slika 7.19 prikazuje vektore brzina pri ulaznoj brzini fluida od 12 m s^{-1} . Uočava se da je brzina fluida ponovno najveća pri izlazu iz trećeg modela irigacijske igle. U tom slučaju brzina pri izlazu iz igle iznosi maksimalno oko 30 m s^{-1} , što je 2,5 puta veće od brzine fluida na ulaznom presjeku igle. U

drugom modelu se također ostvaruju veće vrijednosti brzina od preostalih modela. Kod prvog modela, igle s jednim otvorom, maksimalna brzina iznosi oko 20 m s^{-1} , dok je kod četvrtog modela izlazna brzina gotovo jednaka ulaznoj. Dolazi do pojave recirkulacijskih zona, a najočitija je u slučaju drugog modela igle.

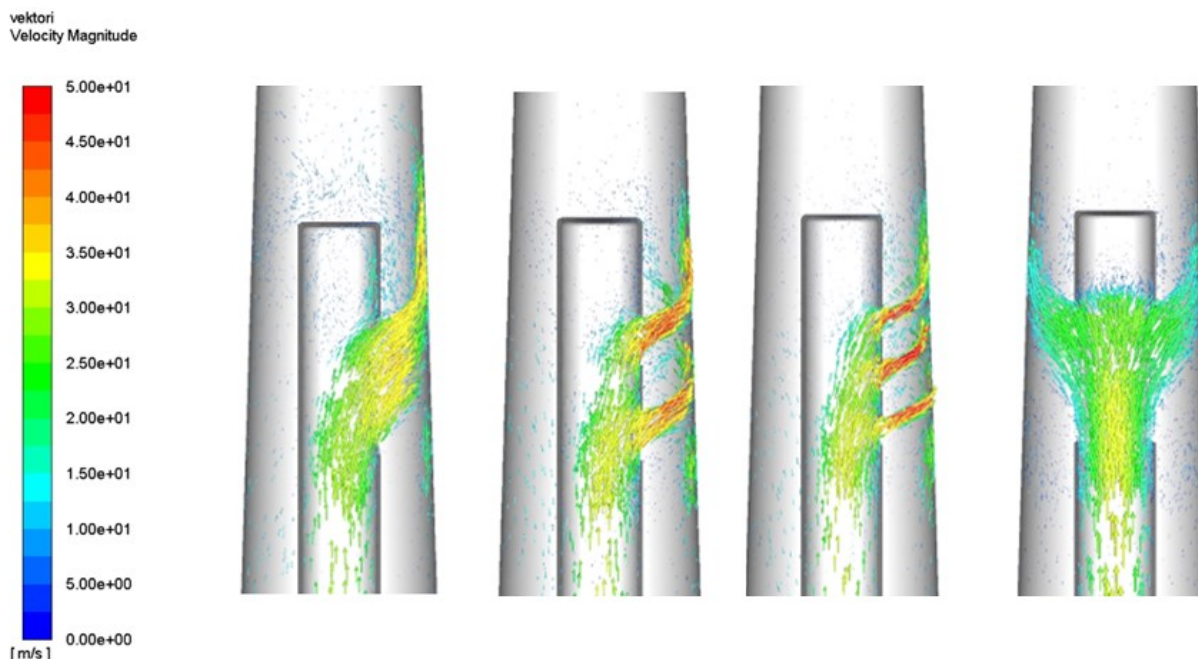


Slika 7.19 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1}

7.3.4. Vektori brzina pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1}

Slika 7.19 prikazuje vektore brzina pri ulaznoj brzini fluida od 20 m s^{-1} . Uočava se da je brzina fluida najveća pri izlazu iz modela irigacijske igle s tri otvora. Također, uočava se da je u tom slučaju brzina pri izlazu iz igle otprilike 50 m s^{-1} , što je 2,5 puta veća od brzine fluida na ulaznom presjeku igle. Drugi model igle, s dva otvora za izlaz fluida, također ostvaruje velike brzine fluida pri izlazu iz igle, a iznos je i do 2 puta veći od ulazne brzine. Prvi model igle, s jednim otvorom, ostvaruje brzinu fluida maksimalnog iznosa oko 35 m s^{-1} . Model igle s dva nasuprotna otvora ostvaruje izlaznu

brzinu fluida približno jednaku kao što je na ulaznom presjeku igle. Kao i u prethodnim slučajevima, uočava se stvaranje recirkulacijskih zona strujanja fluida.



Slika 7.20 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1}

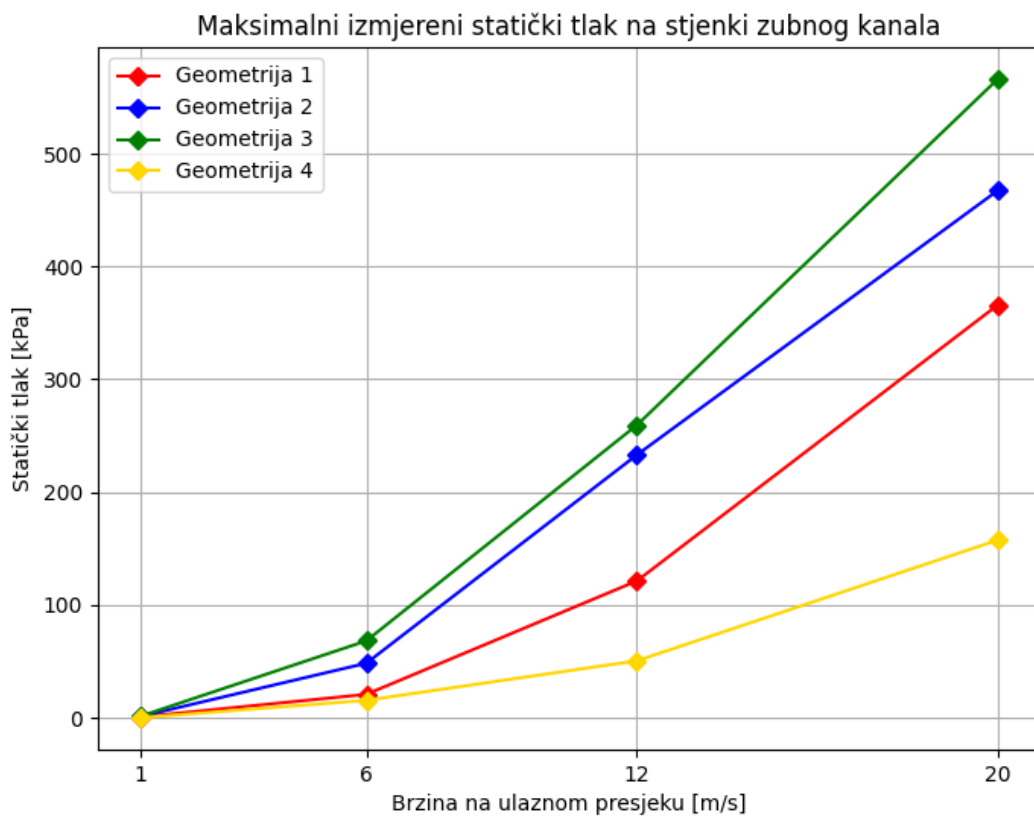
7.4. Maksimalni izmjereni tlak na stijenci zubnog kanala

Na slici 7.21 prikazane su vrijednosti maksimalnog iznosa statičkog tlaka na stijenci zubnog kanala za sva četiri simulirana modela. S obzirom da vrijednosti tlaka prilikom čišćenja korijena zubnog kanala ne bi smjele imati preveliku vrijednost, navedene informacije mogu biti bitne za određivanje optimalnog postupka. Može se primijetiti da vrijednost tlaka raste s povećanjem brzine irigacije fluida što je i očekivano. Također se može vidjeti da i sama geometrija irigacijske igle utječe na vrijednosti tlaka. Može se primjerice vidjeti da za geometriju 4 i brzinu strujanja od 20 m s^{-1} vrijednost statičkog tlaka na stijenci zubnog kanala je nešto malo viša od tlaka za brzinu strujanja od 12 m s^{-1} za geometriju igle 3. Detaljnijim uvidom u strujnice može se odrediti optimalni uvjeti ispiranja, tj. ispitati jesu li povoljniji uvjeti pri povećanju brzine strujanja ili pri promjeni geometrije igle za manje brzine.

Iz navedenog se može vidjeti da varijacijom različitih parametara se može utjecati na efikasnost promatranog procesa.

Trenutno ne postoji direktno istraživanje koje ispituje najveći dozvoljeni statički tlak u zubnom kanalu. Međutim postoje preporuke iz navedene literature o toj vrijednosti. Usvojena je granična vrijednost $10^5 Pa$ kao maksimalni dopušteni iznos statičkog tlaka koji djeluje na stjenku zubnog kanala.

Jedan od glavnih pokazatelja dobrog miješanja i ispiranja očituje se prikazom strujnica fluida. Na slici 7.14 moguće je uočiti kako kod druge i treće izvedbe geometrije strujnice fluida prodiru puno dublje u korijen zubnog kanala nego strujnice kod prve i četvrte izvedbe. Bitno je uzeti u obzir brzinu strujanja fluida na ulaznom presjeku jer pri većim ulaznim brzinama, primjerice $6 m s^{-1}$, za drugu i treću izvedbu geometrija pri izlazu fluida iz irigacijske igle dolazi do velikih iznosa tlaka čime se može uzrokovati oštećenje zubnog kanala. Pri navedenoj brzini, prvi i četvrti model geometrije uzrokuju strujanje koje ne djeluje štetno na okolna tkiva. Dodatnom evaluacijom strujnica fluida zaključeno je kako je prva izvedba geometrije povoljnija za ispiranje zubnog kanala (slika 7.12). Pri brzini strujanja fluida na ulaznom presjeku od $12 m s^{-1}$, četvrta izvedba geometrije jedina dolazi u obzir za buduća poboljšanja i optimizacije, dok druge izvedbe uzrokuju prevelik iznos tlaka na izlazu iz irigacijske igle. Pri brzini strujanja od $20 m s^{-1}$ na ulaznom presjeku, sve četiri izvedbe geometrije uzrokuju prekoračenje dozvoljenog tlaka na izlaznom presjeku, čime se dolazi do zaključka da je strujanje na ulaznom presjeku od $20 m s^{-1}$ prevelika brzina koja u svim izvedbama može uzrokovati oštećenje zubnog kanala.



Slika 7.21 Grafički prikaz maksimalnih vrijednosti statičkog tlaka na stijenki zubnog kanala

8. BUDUĆA PROŠIRENJA

U ovom radu ispitana su četiri modela irigacijske igle za čišćenje zubnog kanala korištenjem stacionarnih numeričkih simulacija. Ispitane su različite ulazne brzine strujanja, te se na temelju tih rezultata mogu odrediti početni uvjeti strujanja koji se mogu koristiti za daljnje provođenje optimizacije geometrije irigacijskih igala.

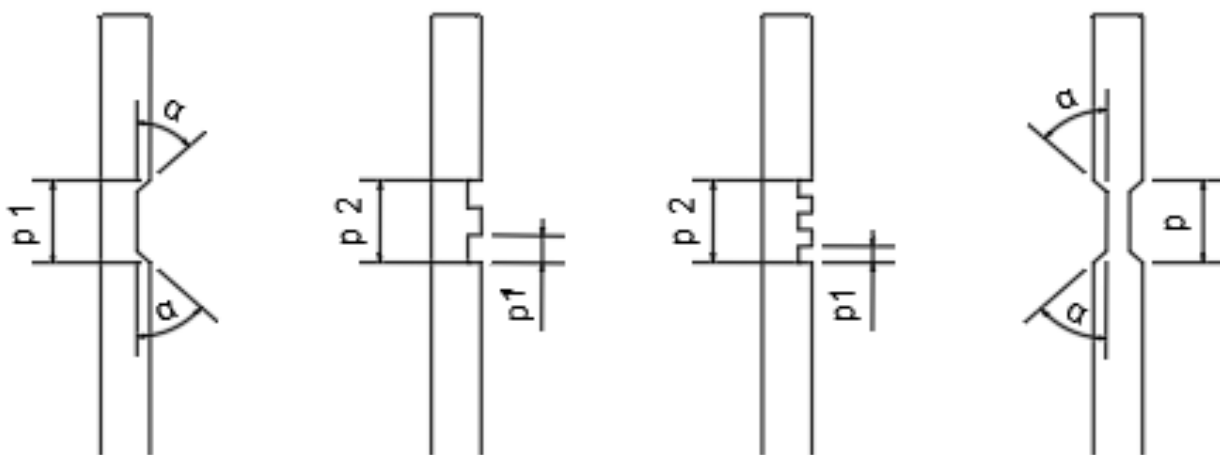
Optimalnom geometrijom smatra se igla koja za danu ulaznu brzinu vrši najbolje ispiranje zubnog kanala bez prekoračenja dozvoljene granice tlaka na stijenci kanala zubnog korijena. Prekoračenje dozvoljenog tlaka može uzrokovati oštećenje zubnog kanala. Ocjenu ispiranja je nešto teže odrediti, međutim u ovom radu je promatrano nekoliko faktora kojima se može ocijeniti učinkovitost ispiranja.

Odabrane geometrije irigacijskih igla moguće je parametrizirati te izvršiti numeričku optimizaciju geometrije kako bi se maksimiziralo ispiranje uz dozvoljene iznose tlakova pri izlazu iz izlaznog presjeka irigacijske igle. Pojednim stacionarnim simulacijama, dobiven je uvid u kojem smjeru i s kojim ograničenjima bi bilo potrebno postaviti simulaciju kako bi se dobila željena rješenja. Iz navedenih zapažanja moguće je zaključiti kako su pojedine izvedbe geometrija povoljnije za različite brzine na ulaznom presjeku.

Izvedbe geometrija u ovom radu određene su proizvoljno, s ciljem da se istraže učinkovitosti ispiranja što različitijih geometrija. Takav uvid uvelike pridonosi formiranju osnove numeričke optimizacije jer omogućuje postavljanje optimizacije sa željenim ciljevima. Na primjer, moguće je vršiti optimizaciju geometrije s ciljem što boljeg ispiranja pri minimalnoj brzini, ali je isto tako moguće postaviti optimizaciju geometrije s ciljem maksimiziranja ulazne brzine uz ostajanje u dozvoljenim granicama tlakova koji djeluju na korijen zuba.

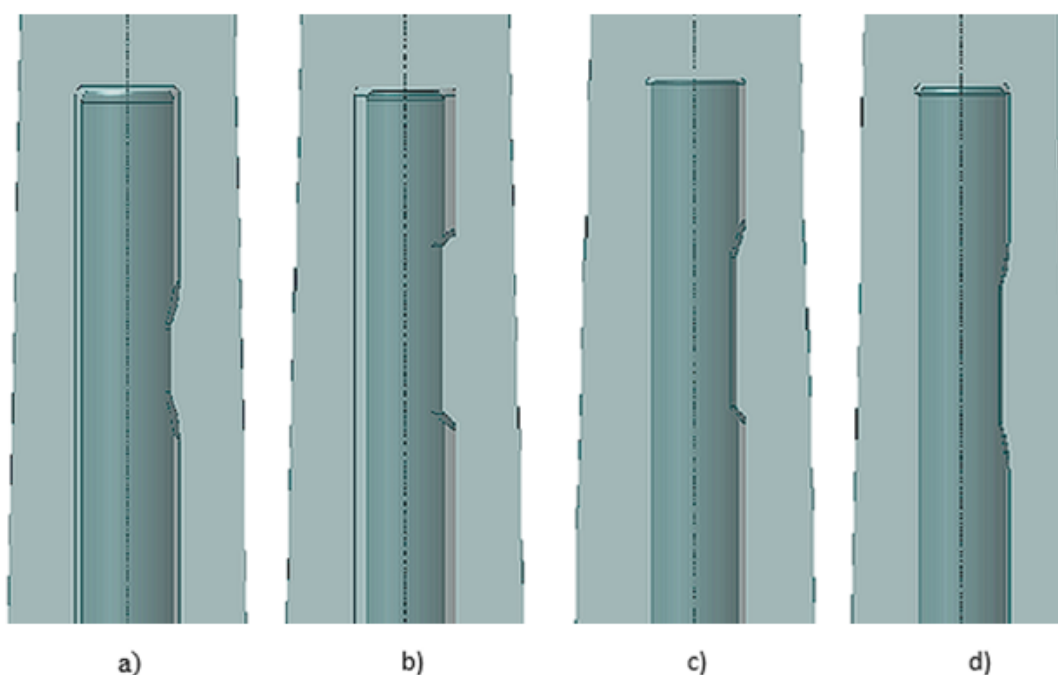
Može se primijetiti da se u literaturi najčešće uzimaju proizvoljno odabrane geometrije te bi se primjenom optimizacijskih postupaka moglo omogućiti poboljšanje geometrije. Na slici 8.1 prikazane su moguće parametrizacije navedenih igala čiji parametri mogu predstavljati optimizacijske varijable. U izvedbi 1 parametri geometrije mogu biti kutevi igle (α) koji mogu biti simetrični, ali se mogu i promatrati na način da su kutevi različiti. Također se može i promatrati visina otvora (p_1). Dodatno, moguće je i promatrati i veličinu (dubinu) otvora, ali je važno napomenuti da sa svakim dodatnim parametrom se povećava prostor pretraživanja. Zbog toga je moguće provesti i preliminarna ispitivanja utjecaja pojedinih varijabli kako bi se u samom optimizacijskom postupku smanjilo

kompleksnost problema. U izvedbi 2 može se varirati ukupna visina otvora (p_2). Također, moguće je promatrati i utjecaj promjene visine samo jednog otvora (p_1) u odnosu na drugi ili promjenom visine oba otvora ili razmaka među njima. U izvedbi 3, slično kao u izvedbi broj 2, moguće je mijenjati ukupnu visinu otvora (p_2) kao i veličinu pojedinog otvora u odnosu na druge (p_1). U izvedbi 4 kao parametar geometrije može se odabrati visina otvora (p) te se dodatno mogu mijenjati veličine kuta (α) na način budu kutevi simetrični ili različiti. Također, može se promatrati slučaj u kojem otvori nisu na istoj udaljenosti od vrha igle.



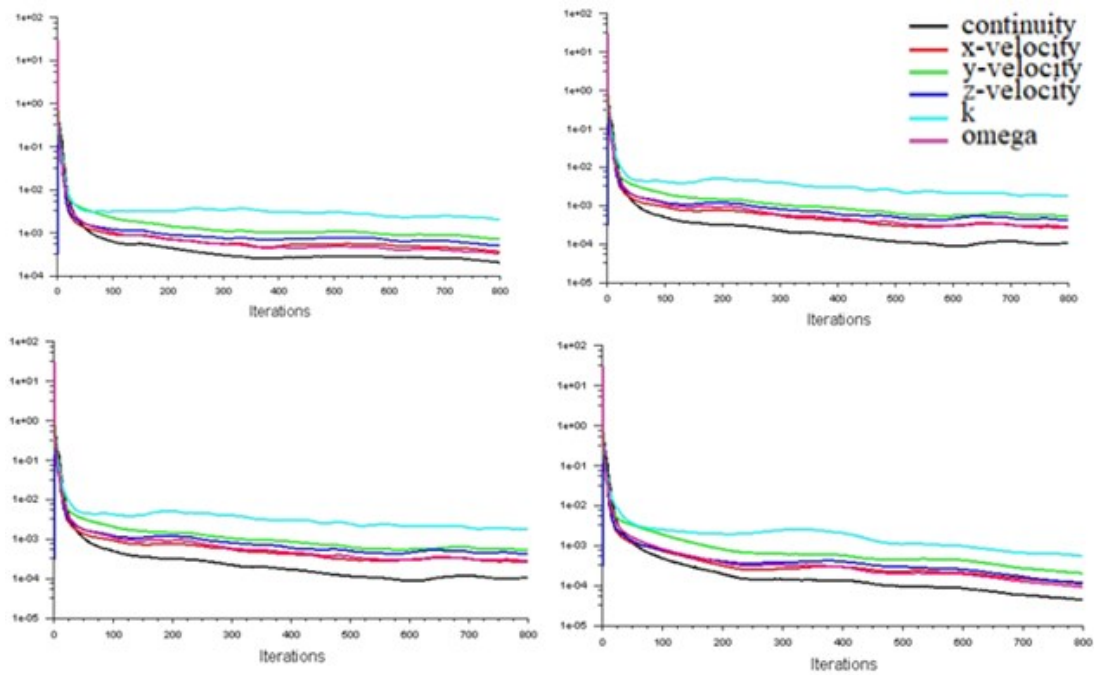
Slika 8.1 Primjer parametrizacije prethodno modeliranih geometrija

Prema navedenim parametrizacijama, na slici 8.2 prikazani su primjeri izmjena prve izvedbe geometrije irigacijske igle. Slika 8.2 a) prikazuje iglu s izmijenjenom visinom otvora, tj. smanjenom u odnosu na prethodno analiziran model. Slika 8.2 b) prikazuje izmjenu kuteva otvora igle na način da se kut smanjio u odnosu na prethodno analiziran model. Slika 8.2 c) prikazuje izmijenjene kuteve otvora igle, ali ovaj put na način da je jedan kut veći od drugog. Slika 8.2 d) prikazuje izmijenjene kuteve otvora igle, ali u ovom slučaju kutevi su simetrični i uvećani u odnosu na prethodno proučavani model. Istim principom moguće je modelirati i preostale izvedbe geometrija irigacijskih igala.



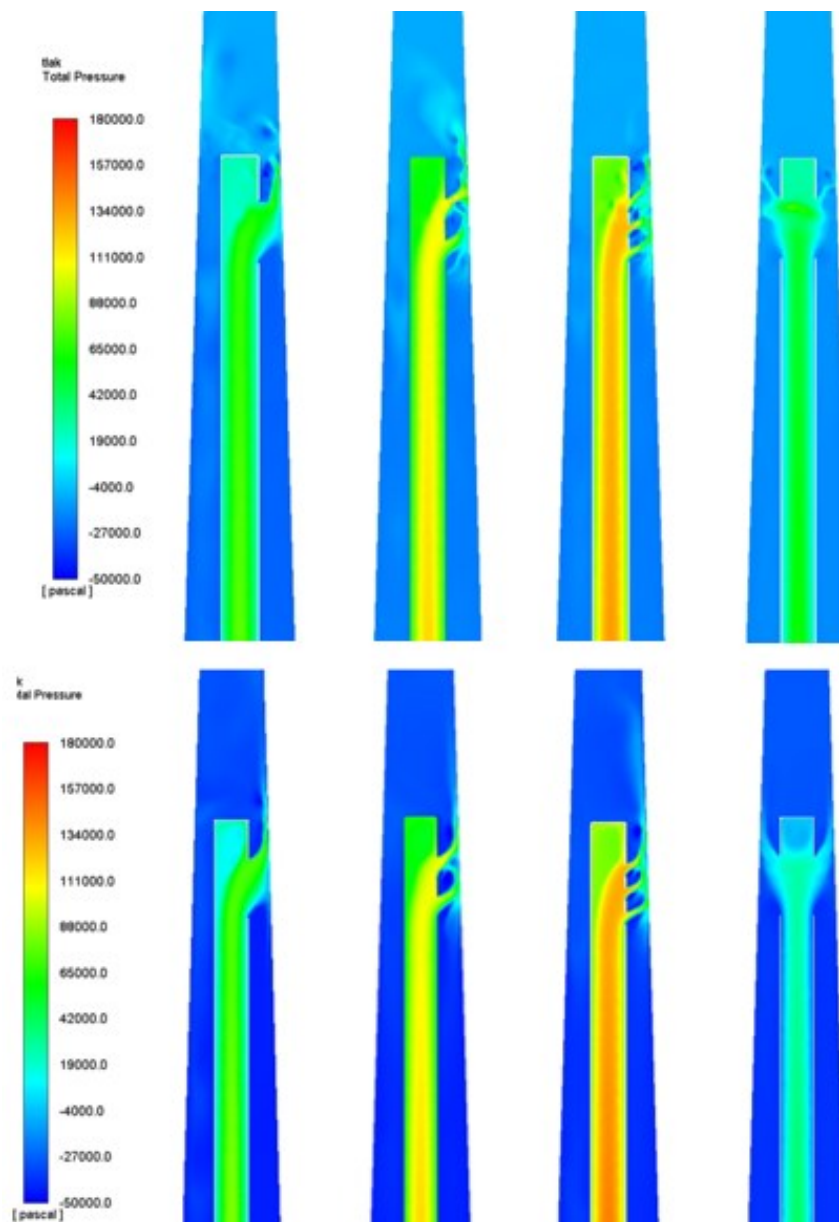
Slika 8.2 Izmjene dimenzija otvora prve geometrije irigacijske igle

Još jedan od primjera budućih poboljšanja je promjena modela turbulencije za simulaciju s ulaznom brzinom fluida 6 m s^{-1} . Iz prikazanih kontura tlaka i brzina može se primijetiti da nije prikladno korištenje direktnog numeričkog rješavanja (DNS). Navedeni model je korišten prema smjericama drugih radova [6] no ipak je zaključeno kako to nije najprikladniji model te bi se trebalo provesti simulaciju turbulentnim modelom, primjerice $k - \omega SST$ modelom. U nastavku, na slici 8.3 prikazani su reziduali pri rješavanju $k - \omega SST$ modelom.



Slika 8.3 Prikaz reziduala pri rješavanju $k - \omega$ SST modelom za brzinu strujanja fluida 6 m s^{-1}

Na slici 8.4 prikazana je usporedba kontura tlaka pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1} . Slika 8.4 a) prikazuje konture tlaka rješavanjem laminarnim modelom dok slika 8.4 b) prikazuje konture tlaka rješavanjem $k - \omega$ SST modelom. Iz slika se može zaključiti kako je $k - \omega$ SST prikladniji model za ovaj slučaj.



Slika 8.4 Usporedba kontura tlaka za različite modele rješavanja za ulaznu brzinu fluida 6 m s^{-1}

Važno je napomenuti da je korišten samo jedan pojednostavljeni model zubnog korijena, dok bi prije konačnih zaključaka o predstavlja li neka geometrija irigacijske igle optimalno rješenje bilo potrebno ispitati geometriju igle i za različite geometrije zubnog korijena. Treba uzeti u obzir i činjenicu da su za numeričku analizu provedene stacionarne simulacije, međutim u realnosti to neće biti slučaj. Stacionarno stanje se postiže do određenog stupnja, no uvijek su prisutne fluktuacije brzina, promjene smjera čestica fluida i slično. Iz tog razloga za točniji uvid u promatrani proces ispiranja zubnog korijena bilo bi korisno provesti nestacionarne simulacije.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je utjecaj promjene dizajna geometrije i ulazne brzine fluida na ulaznom presjeku irigacijske igle na efikasnost čišćenja i dezinfekcije korijenskih kanala zuba. Razmatrana su četiri različita dizajna irigacijskih igala kako bi se ispitaio utjecaj na strujanje. Napravljene su CFD analize za svaku izvedbu irigacijske igle sa četiri različite brzine na ulaznom presjeku domene. Analize su rađene u cilju što bolje pripreme za čišćenje zubnih kanala što predstavlja jedan od tretmana pri liječenju bolesti i infekcija zuba. Izazovi izvođenja postupka irigacije zubnog kanala leže u kompleksnosti anatomije korijenskih kanala zuba koji čine uski i zakrivljeni prostori te stoga numeričke simulacije pružaju detaljniji uvid u promatrani postupak.

Primjena računalne dinamike fluida (CFD) pokazala se kao koristan alat za simuliranje irigacije zubnog kanala u cilju poboljšanja i pripreme irigacijske igle za optimizaciju. Ovaj pristup predstavlja spoj dinamike fluida s izazovima dentalne medicine u cilju poboljšanja učinkovitosti liječenja zuba. Također, omogućuje uvid u tok fluida unutar složene geometrije korijenskih kanala zuba. Simuliranjem protoka fluida iz irigacijske igle pomoću CFD analize moguće je ispitati velik broj slučajeva u vrlo kratkom vremenu. Razni dizajni igla se mogu usporediti i evaluirati koristeći minimalne resurse.

Protok fluida za irigaciju značajan je u cilju određivanju učinkovitosti protoka fluida unutar korijenskog kanala. Razvoj turbulentnog režima strujanja fluida je poželjan jer se u tom slučaju postiže bolja irigacija zubnog kanala. No, za irigaciju zubnog kanala najbitnije je poštovati ograničenje maksimalnog tlaka fluida kako bi se minimizirao rizik od oštećenja okolnih tkiva. Ispitani modeli pružaju dobru podlogu za buduća proširenja i optimizacije irigacije zubnih kanala.

Šira primjena CFD analize u stomatologiji mogla bi potaknuti razvoj dentalnih alata. Neinvazivna priroda CFD analize predstavlja veliki potencijal u industriji u kojoj je sigurnost pacijenta od najveće važnosti. Primjer sljedećeg koraka na temelju ovog rada je optimiziranje modela irigacijske igle, stvaranje fizičkog modela i provjere učinkovitosti i sigurnosti dizajna. Također, potencijalna suradnja s proizvođačem dentalne opreme kako bi se mogla provesti daljnja ispitivanja.

Prednost CFD analize je to što je primjenjiva u gotovo svim industrijama, a nastavkom razvoja i sve češće primjene će zasigurno postati nezamjenjiv alat.

LITERATURA

- [1] Smile Poliklinika, s Interneta, <https://smile.hr/endodoncija-lijecenje-zuba-kad-nastupi-upala-zuba/>
- [2] Vukojević, Krešimir: „Dezinfekcija korijenskih kanala“, Zagreb 2017.
- [3] Pocket Dentistry: „*Syringe Irrigation: Blending Endodontics and Fluid Dynamics*“, s Interneta, <https://pocketdentistry.com/syringe-irrigation-blending-endodontics-and-fluid-dynamics/>, 7. rujna, 2015.
- [4] Lenić, Kristijan.; Trp, Anica.: iz kolegija „Numeričko modeliranje u termodinamici“, Rijeka 2022.
- [5] Kranjčević, Lado: „Mehanika fluida“, Rijeka 2020.
- [6] C. Boutsoukis, T. Lambrianidis i E. Kastrinakis: “*Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a Computational Fluid Dynamics study*”, 2009.
- [7] C.Boutsoukis et al: *Evaluation of Irrigant Flow in the Root Canal Using Different Needle Types by an Unsteady Computational Fluid Dynamics Model*“ svibanj, 2010.

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1 Dijelovi zuba [1]..... | 3 |
| Slika 2.2 Različiti modeli irigacijskih igla [3]..... | 5 |
| Slika 3.1 Kontrolni volumen [4]..... | 7 |
| Slika 3.2 Ispitivanje stujanja fluida za različite protoke fluida [6]..... | 10 |
| Slika 3.3 Prikaz kontura brzina (lijevo), vektora brzina (sredina) i strujnica (desno) za različite izvedbe irigacijske igle i različite dubine igle [7] | 11 |
| Slika 3.4 Simulacije strujanja za različite izvedbe igla [7]..... | 11 |
| Slika 4.1 Geometrijske karakteristike modela zubnog kanala [6] | 14 |
| Slika 4.2 Dimenzije modeliranog korijena zubnog kanala | 14 |
| Slika 4.3 Korijenski kanal modeliran pomoću alata <i>Ansys DesignModeler</i> | 15 |
| Slika 4.4 Usporedba igle s modeliranom geometrijom [6]..... | 15 |
| Slika 4.5 Detalji dimenzija otvora irigacijskih igala..... | 16 |
| Slika 4.6 Korijenski kanali i irigacijske igle modelirane u programu <i>Design Modeler</i> | 17 |
| Slika 5.1 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s jednim otvorom..... | 18 |
| Slika 5.2 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s dva otvora..... | 19 |
| Slika 5.3 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s tri otvora..... | 19 |
| Slika 5.4 Detalj omrežene geometrije irigacijske igle s nasuprotnim otvorima | 20 |
| Slika 6.1 Rubni uvjeti domene..... | 21 |
| Slika 6.2 Dijagram toka SIMPLE algoritma [4] | 23 |
| Slika 7.1 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 1 m s^{-1} | 26 |
| Slika 7.2 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 6 m s^{-1} | 27 |
| Slika 7.3 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 12 m s^{-1} | 27 |
| Slika 7.4 Prikaz reziduala simulacija pri ulaznoj brzini fluida 20 m s^{-1} | 28 |

| | |
|---|----|
| Slika 7.5 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1} | 29 |
| Slika 7.6 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1} | 30 |
| Slika 7.7 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1} | 31 |
| Slika 7.8 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1} | 32 |
| Slika 7.9 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1} | 33 |
| Slika 7.10 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1} | 34 |
| Slika 7.11 Usporedba kontura tlaka svih modela pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1} | 35 |
| Slika 7.12 Usporedba kontura brzina svih modela pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1} | 36 |
| Slika 7.13 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1} | 37 |
| Slika 7.14 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1} | 38 |
| Slika 7.15 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1} | 39 |
| Slika 7.16 Prikaz strujnica pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1} | 40 |
| Slika 7.17 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 1 m s^{-1} | 41 |
| Slika 7.18 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 6 m s^{-1} | 42 |
| Slika 7.19 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 12 m s^{-1} | 43 |
| Slika 7.20 Prikaz vektora brzina pri ulaznoj brzini 20 m s^{-1} | 44 |
| Slika 7.21 Grafički prikaz maksimalnih vrijednosti statičkog tlaka na stijenci zubnog kanala | 46 |
| Slika 8.1 Primjer parametrizacije prethodno modeliranih geometrija | 48 |
| Slika 8.2 Izmjene dimenzija otvora prve geometrije irigacijske igle..... | 49 |
| Slika 8.3 Prikaz reziduala pri rješavanju $k - \omega SST$ modelom za brzinu strujanja fluida 6 m s^{-1} .. | 50 |
| Slika 8.4 Usporedba kontura tlaka za različite modele rješavanja za ulaznu brzinu fluida 6 m s^{-1} | 51 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 5.1 Parametri numeričkih mreža | 20 |
| Tablica 6.1 Stanje na ulaznom presjeku protoka irigacijskih igla | 24 |

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu proučavan je utjecaj promjene dizajna geometrije i ulazne brzine fluida irigacijske igle na efikasnost čišćenja i dezinfekcije korijenskih kanala zuba. Ispitana su četiri različita dizajna irigacijskih igla u cilju pripreme za optimizaciju čišćenja zubnih kanala. Objašnjena je problematika izvođenja tretmana liječenja te je ukratko opisana fizikalna pozadina prije pripreme simulacija. Koristeći alat za proračun i simulaciju, konkretno softver *Ansys*, modelirane su odabrane geometrije te su umrežavanjem i definiranjem numeričkih postavki pripremljene za simulaciju. Prikazani su dobiveni rezultati proračuna te su vizualizirani prikazom kontura tlaka i brzina, strujnica i vektora brzina. Konačno, predstavljeni su potencijalni buduća proširenja ovog istraživanja.

Ključne riječi: kanali zuba, irigacijska igla, CFD, Ansys Fluent

ABSTRACT

In this thesis, the impact of changes in geometry design and the inflow velocity of the irrigation needle on the efficiency of cleaning and disinfecting root canals was studied. Four different designs of irrigation needles were examined with the aim of preparing for the optimization of dental canal cleaning. The issues related to performing the treatment were explained, and the physical background was briefly described before preparing the simulations. Using a calculation and simulation tool, specifically Ansys software, the selected geometries were modeled, and through meshing and defining numerical settings, they were prepared for simulation. The obtained calculation results were presented and visualized by displaying contours of pressure and velocities, streamlines, and velocity vectors. In the conclusion of this thesis, potential next steps of this research were presented. Finally, potential future extensions of this research have been presented.

Key words: tooth canals, irrigation needle, CFD, Ansys Fluent