

Original scientific paper

Ključne reči: računarska dinamika fluida (CFD); numerička simulacija; interdisciplinarni pristup; sistemi za KGH

Key words: computational fluid dynamics (CFD); numerical simulation; interdisciplinary approach; HVAC&R systems

Milica IVANOVIĆ*

* *mivanovic@mas.bg.ac.rs*

Danijela SREČKOVIĆ

Mina MIROVIĆ

Vladimir ČERNICIN

ULOGA I PRIMENA RAČUNARSKE MEHANIKE FLUIDA U PROJEKTOVANJU, OPTIMIZACIJI I PROCENI PERFORMASI KGH SISTEMA

THE ROLE AND APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN THE DESIGN, OPTIMIZATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF HVAC&R SYSTEMS

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

ORCID 0000-0001-6239-703X

Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd,

ORCID 0009-0006-2858-9269

Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd,

ORCID 0009-0002-2097-6863

Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd

ORCID 0000-0003-2452-9585

Razvoj sistema za klimatizaciju, grejanje i hlađenje (KGH) u značajnoj meri bio je uslovljen potrebom za unapređenjem energetske efikasnosti i obezbeđivanjem optimalnih uslova unutrašnje sredine. Poslednjih decenija je u tom domenu sve prisutnija primena računarske dinamike fluida (Computational Fluid Dynamics — CFD). Ova metoda zasnovana je na interdisciplinarnom pristupu koji obuhvata: mogućnost vizualizacije i optimizacije strujnog polja vazduha u zatvorenim prostorima, analizu raspodele temperature unutar prostorije kao i temperaturu površi, procenu uticaja spoljašnjih klimatskih uslova na objekat i interakciju unutrašnjeg prostora sa građevinskim omotačem, modelovanje difuzije kontaminenata putem vazduha, ocenu uticaja na toplotni komfor, kao i akustičkih karakteristika. Ovakav pristup omogućava detaljnu analizu, čime je omogućeno prevazilaženje ograničenja klasičnih empirijskih i analitičkih metoda. Ipak, primena CFD pristupa treba da bude zasnovana na objektivno utemeljenim očekivanjima u pogledu njegovih performansi, troškova i neophodnog obima angažovanih resursa. U tom kontekstu, rad se bavi i određenim pitanjima vezanim za probleme i prepreke koji mogu da nastanu prilikom korišćenja ovog pristupa. Takođe, razmatrani su pokušaji standardizacije, koji su za sada interni, i smernice koje oblikuju metodologiju i verifikaciju CFD analiza u oblasti KGH. Rad ističe značaj primene računarske mehanike fluida i simulacija, ne samo kao istraživačkog, već i kao pouzdanog inženjerskog alata u procesima projektovanja, optimizacije i procene performansi KGH sistema.

The development HVAC&R systems has been significantly influenced by the demand for enhanced energy efficiency and ensuring of optimal indoor environmental conditions. In recent decades, the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in this domain has become increasingly prevalent. This method is based on an interdisciplinary approach that includes: visualization and optimization of indoor airflow fields, analysis of temperature distribution within enclosed spaces, as well as the surface temperature, assessment of the influence of external climatic conditions on the

building, and the interaction of the indoor environment with the building envelope, modeling of airborne contaminant diffusion, evaluation of thermal comfort, as well as acoustic performance. Such an approach enables detailed analyses, thereby overcoming the limitations of conventional empirical and analytical methods. Nevertheless, the decision to employ CFD approach should be grounded in objectively substantiated expectations regarding their performance, associated costs, and the extent of required resources. In this context, the paper addresses specific issues related to the challenges and limitations that may arise during the application of this approach. Furthermore, it examines ongoing, though currently internal, efforts toward standardization, as well as guidelines that define the methodology and verification of CFD analyses in the field of HVAC&R. The paper emphasizes the importance of applying computational fluid dynamics and simulation techniques not only as research instruments but also as reliable engineering tools in the processes of design, optimization, and performance evaluation of HVAC&R systems.

1. Uvod

Izazovi sa kojima se susreću moderni KGH sistemi sve su brojniji, počevši od prepreka pri njihovoj integraciji u starije objekte, inicijalnih troškova, sve striktnijih zahteva vezanih za energetske efikasnost, kvaliteta vazduha u sve zagađenijoj gradskoj sredini, itd. Ostvaren je značajan napredak u modernizaciji ovih sistema poredeći ih sa “starim” sistemima, koji su se oslanjali na karakteristike kao što su ručna podešavanja pri kontroli temperature, pasivna ili osnovna mehanička ventilacija bez rekuperacije toplote, ručna dijagnostika, minimalna automatizacija, bučni ventilatori i kompresori, itd. Glavni motivi koji su doveli do konstantnog pronalaženja novih rešenja i unapređenja su rastuća cena energije, ekološki problemi, kvalitet vazduha i toplotni komfor.

Kao jedan od aktuelnih pristupa poboljšanju performansi KGH sistema prepoznato je korišćenje računarske mehanike fluida prilikom projektovanja, optimizacije i procene performansi KGH sistema. Ovakav pristup se oslanja na mnogobrojne aspekte koji obuhvataju: mogućnost vizualizacije i optimizacije strujanja vazduha u prostoru, raspodele temperature u prostoriji, procenu uticaja spoljašnjeg okruženja objekata i interakcije unutrašnjeg prostora sa omotačem zgrade, difuzije kontaminata kroz vazduh, toplotnog komfora i akustične analize. Takođe, važno je napomenuti i mogućnost istraživanja različitih scenarija, bez potrebe izrade fizičkog modela i/ili prototipa, analizu osetljivosti i parametarsku analizu, čiji je proizvod iznalaženje faktora koji su od najvećeg značaja za pravilan rad i funkcionisanje KGH sistema. CFD pristup je prvi put zapažen u ovoj industriji još sedamdesetih godina [1]. Era “pametnih” sistema započeta je još od 1980-ih godina i traje do danas. Ona obuhvata primenu *Internet of things* (IoT), AI algoritama za prediktivno održavanje uslova i optimizaciju prema vremenskoj prognozi i navikama korisnika, različite senzore za merenje kvaliteta vazduha, vlage, prisutva ljudi i buke, itd. Računarska mehanika fluida je našla svoj put za integraciju u “pametne” sisteme kroz korišćenje tehnologije digitalnog blizanca—*Digital Twin Technology* (korišćenje podataka o zgradi u realnom vremenu za dinamičko ažuriranje CFD modela) i mašinskog učenja (kroz ubrzavanje predviđanja scenarija treniranjem veštačke inteligencije na skupovima podataka generisanim preko CFD softvera).

U ovom radu se analizira značaj CFD pristupa kao konkretnog alata za uviđanje i rešavanje određenog spektra izazova vezanih za KGH sisteme, u kojima je potvrđeno preciznije projektovanje, optimizacija i procena performansi. Takođe, rad pokušava da odgovori na pitanja određenih problema i prepreka prilikom korišćenja ovog pristupa.

2. Prednosti i mane korišćenja CFD u KGH sistemima

Industrija KGH jeste doživela značajan napredak zahvaljujući primeni računarske dinamike fluida, iako njen uticaj možda nije odmah očigledan stručnjacima van specijalizovanih inženjerskih uloga, koji se prvenstveno odnose na poslove ustanovljenih metoda projektovanja i izvođenja postrojenja. Stoga, biće navedene neke od glavnih prednosti upotrebe računarske mehanike fluida:

- CFD simulacije pomažu u boljem sagledavanju i razumevanju ponašanja protoka i fizičkih fenomena unutar sistema, što uz objedinjavanje sa iskustvenim znanjem omogućava donošenje kvalitetnih i pouzdanih odluka;
- simulacije štede vreme i novac u smislu mogućnosti vizualizacije tj. testiranja i optimizacije u softveru, bez potrebe za skupim fizičkim prototipovima i opsežnim eksperimentima u inicijalnoj fazi, a u određenim i sve većim brojem slučajevima, i kasnije;
- za sisteme sa složenim protocima fluida, simulacije mogu pružiti vrlo detaljne informacije, koje mogu biti veće tačnosti nego sam eksperiment i merenje;
- CFD simulacije mogu da se koriste za procenu bezbednosti i rizika i predviđanje potencijalnih opasnosti, što omogućava ranije preduzimanje mera za njihovu minimizaciju;
- šire se mogućnosti za samo projektovanje jer se otvara prostor za istraživanje različitih opcija i optimizaciju, a prema zadatim ciljevima poput efikasnosti ili smanjenja emisija,

Neki od glavnih nedostataka upotrebe CFD:

- simulacije mogu da budu računarski intenzivne i da zahtevaju arhitekturu računara visokih performansi,
- izbor mreže, graničnih uslova ili modela turbulencije su segmenti simulacije gde greške mogu nastati, propagirati i na kraju uticati značajno na tačnost,
- potreba za validacijom — rezultati moraju biti provereni eksperimentalnim podacima, što može biti dugotrajan i skup proces,
- potrebni su specijalizovani i uglavnom komercijalni softveri, zahtevano je dobro poznavanje mehanike fluida i numeričkih metoda,
- apoksimacija stvarnih fizičkih pojava matematičkim modelima samo po sebi nosi izvesnu grešku, tako da postoji ograničenje samog modela i modelovanja,
- kod velikih i složenih sistema simulacije mogu potrajati, što otežava rad za vremenski ograničene projekte.

3. Strujna slika i raspodela temperature i koncentracija

CFD analize podrazumevaju korišćenje numeričkih metoda, diskretizaciju proračunskog domena, verifikaciju i validaciju rešenja ili kvantifikaciju nesigurnosti.

Kada se govori o distribuciji vazduha u zatvorenom prostoru, konvencionalni pristupi podrazumevaju primenu empirijskih relacija i eksperimentalno dobijenih dijagrama elemenata za distribuciju vazduha, najčešće u laboratorijama. U realnim uslovima, to često zna da rezultuje značajnim odstupanjima između predviđenih i eksperimentalno dobijenih podataka o temperaturskom polju, raspodeli koncentracija i dinamici strujanja vazduha i na kraju samoj efikasnosti ventilacije. Sve veći i veći broj numeričkih analiza se pripisuje značajnom napretku računarskih jedinica, razvoju i usavršavanju metoda i softvera, kao i modela kojima se opisuju fizički fenomeni (u prvom redu turbulencija). U Tabeli 1 [2] se nalazi spisak radova objavljenih poslednjih godina, čija je tematika ventilacija raznih javnih objekata zajedno sa primenjenim turbulentim modelima.

Tabela 1. Skorašnji radovi objavljeni na temu ventilacije različitih kategorija objekata [2]

Vrsta unutrašnjeg prostora	God.	Tip ventilacije	Broj izmena vazduha, 1/h	Prosečna gustina gustina mreže, ćelija/m ³	Turbulentni model
Bolnica/ zona pacijenata	2020	mehanička, sa natpritiskom prema hodniku), sa ili bez lokalnih usisnih rešetki	3,6,9,13	/	RNG k-ε
	2020	slojna ventilacija, ventilacija mešanjem, vertikalna ventilacija nadole, potisna ventilacija	12	8283	RNG k-ε
	2019	ventilacija zaštićenog boravišnog prostora	1,57 2,36 3,15 3,94 4,73	108696	SST k-ω
Bolnica/ operacione sale	2018	- ventilacija sa vertikalnim laminarim tokom vazduha - temperaturno kontrolisano strujanje vazduha, - ventilacija mešanjem	26 46 100	28925	Realizable k-ε
	2014	ventilacija mešanjem	47	19048	RNG k-ε
Bolnica/ izolacija	2020	ventilacija mešanjem u gornjim slojevima, lokalna ventilacija nadole sa pozadinskom mešovitom ventilacijom, zonska ventilacija nadole	12	46939	SST k-ω LES
Bolnica/ odeljenje intenzivne nege	2023	ventilacija sa vertikalnim laminarim tokom vazduha, ventilacija sa horizontalnim laminarim tokom vazduha, temperaturno kontrolisano strujanje vazduha	/	7206	Standard k-ε
Prevozna sredstva/ kabinski prostor letelice	2012	/	/	85263	RNG k-ε
Prevozna sredstva/ automobil	/	/	/	77778	SST k-ω RNG k-ε
Obrazovne ustanove/ učionice	2021	/	/	6458 7211	RNG k-ε k-ε
Obrazovne ustanove/ sale za predavanja	2023 2015	/	/	8205 369	SST k-ω RNG k-ε
Kancelarija	2021			9059	k-ε
Restoran	2021	/	/	/	RNG k-ε
Rezidencijalni prostor	2023 2023 2023	ventilacija mešanjem potisna veentilacija dovod svežeg vazduha preko prozora	15 0,51 /	35000 27679 63272	RNG k-ε SST k-ω Standard k-ε
Muzej	2022	/	/	18450	Realizable k-ε

U kontekstu analize uticaja životne sredine na objekte, CFD može da ponudi tzv. objedinjen pristup prenosu količine toplote, uzimajući u obzir prirodnu konvekciju unutar zgrade sa provodljivošću kroz omotač zgrade i spoljašnjim aerodinamičkim efektima. Još jedna velika prednost CFD je za velike i kompleksne prostore kao što su sportske arene ili aerodromi, gde je sprovođenje eksperimentalnih merenja često nepraktično ili preskupo. CFD može da omogući detaljnu vizuelizaciju i kvantitativnu procenu strujanja, raspodele temperature i transporta zagađujućih materija pod različitim radnim uslovima. U poređenju sa eksperimentalnim pristupima, CFD pruža znatno veću fleksibilnost i prostornu rezoluciju, što ovu metodu čini veoma pogodnim, a često i neophodnim alatom danas, za optimizaciju ventilacije i poboljšanje ukupne energetske efikasnosti u velikim zatvorenim prostorima.

CFD analize se danas u velikoj meri koriste u toku projektovanja zahtevnih i kontrolisanih okruženja kao što su centri podataka, zdravstvene ustanove i čiste sobe, gde su ključni stabilnost polja temperature i upravljanje aerodinamikom čestica. Integracija CFD simulacija sa BMS—*Building Management Systems* omogućava razvoj prediktivnih i adaptivnih strategija kontrole protoka i termičkog opterećenja u realnom vremenu. Još jedna grana primene CFD u domenu KGH je povezivanje numeričkih modela sa obnovljivim izvorima energije u optimizaciji procesa konverzije i distribucije energije. Tako se može simulirati interakcija između solarnih kolektora, geotermalnih razmenjivača toplote, akumulatora toplote i samog klimatizacionog, grejnog i rasladnog sistema da bi se povećala efikasnost prenosa toplote i smanjili energetska gubici.

4. Izvori grešaka i standardizacija

Različite vrste grešaka su neizbežne prilikom numeričkog rešavanja problema strujanja fluida i prenosa toplote. Za većinu analiziranih inženjerskih fenomena tačan i potpun matematički opis nije jednostavan ili moguć zbog njihove složene prirode i brojnih specifičnosti. Zato se se neizbežno zahteva uvođenje aproksimacija. Različite metode koje se primenjuju prilikom postupaka numeričkih analiza imaju svoje prednosti i ograničenja, u zavisnosti od dostupnosti podataka, resursa i pretpostavki.

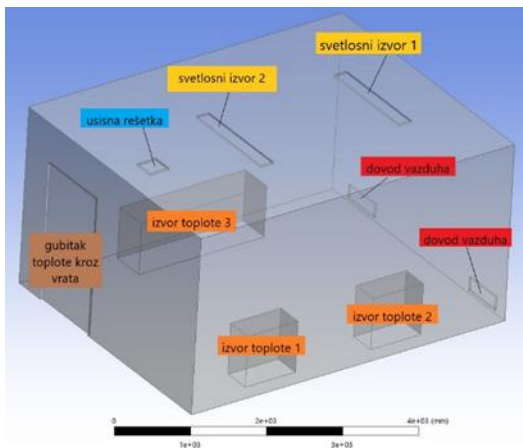
Rešenja dobijena numeričkim putem uključuju tri vrste sistematskih grešaka: prilikom modelovanja, diskretizacije i iterativnog postupka. Greške modelovanja predstavljaju neslaganje između sistema iz stvarnog sveta i matematičkog opisa modela sistema. Diskretizacionim postupcima nastaju greške između tačnih rešenja jednačina održanja i rešenja sistema algebarskih jednačina dobijenih deljenjem proračunskog domena u konačni broj elemenata, ćelija ili tačaka. Greške koje nosi iterativni postupak se nazivaju često i greške konvergencije, koja je u vezi sa greškama zaokruživanja (pošto se termin konvergencije može odnositi na dobijanje numeričkog rešenja koje je nezavisno od diskretizacije tj. mreže) [3]. Pored toga, značajan izvor grešaka je neadekvatno postavljanje graničnih i inicijalnih uslova. Danas postoji opsežna lista kako besplatnih, tako i komercijalnih CFD kodova, koja se redovno ažurira na [4].

Kada se govori o standardizaciji i primerima najboljih praksi, značajno je napomenuti dve organizacije: AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*) — bavi se razvojem standarda i davanjem preporuka i smernica za verifikaciju i validaciju numeričkih simulacija [5] i ERCOFTAC (*European Research Community on Flow, Turbulence And Combustion*) — evropska istraživačka mreža koja povezuje univerzitete, institute i industriju u oblastima strujanja fluida, turbulencije i sagorevanja. Ova organizacija je razvila referentne testove i baze podataka za CFD, koji služe za validaciju i poređenje različitih numeričkih metoda, kao i vodiče najboljih praksi. Jasno je da generisanje

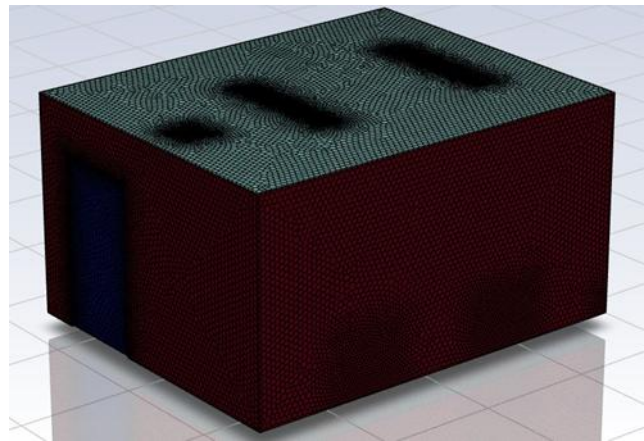
izveštaja o rezultatima sa jasnom i doslednom terminologijom i formatima utiče na povećanje poverenja i pomaže u efikasnijoj komunikaciji. Ipak, iako konsenzus postoji, ne postoji jedinstveni međunarodni standard koji bi bio prihvaćen svuda vezan za generisanje izveštaja, tako da nije postignuta konačna harmonizacija u toj oblasti.

5. Primer

Analiziran je primer simulacije jedne prostorije sa izvorima toplote koji predstavljaju elektronsku opremu i dva svetlosna izvora (Slika 1). Ventilacija se ostvaruje dovođenjem vazduha preko dve rešetke za dovod vazduha, a odvodi se usisnom rešetkom. Soba je veličine 5 x 4 x 2,7 m. Generisana je nestruktuirana mreža sa poliedarskim ćelijama uz zidove i izvore, a heksahedralnim u unutrašnjosti domena (Slika 2). Postoji gubitak toplote kroz vrata (u ovom slučaju računato kroz čitavu površinu vrata). Zračenje izvora toplote modelirano je preko DO (*Discrete ordinates*) modela. Kretanje vazduha izazvano samo razlikom gustina vazduha u prostoriji je modelirano preko Businesskove pretpostavke.



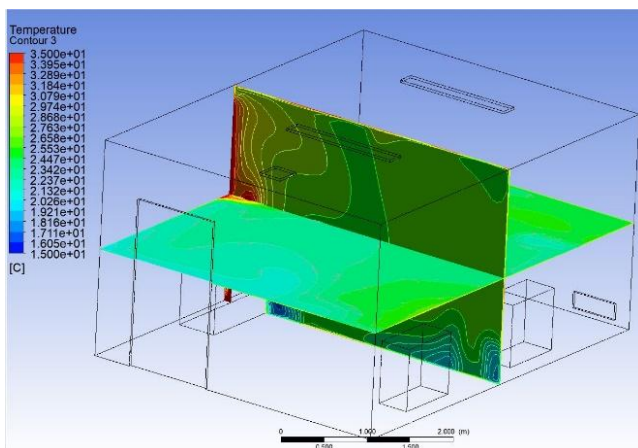
Slika 1. Geometrija modela



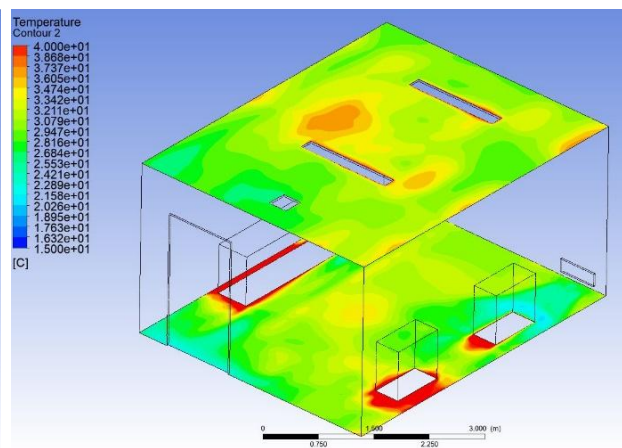
Slika 2. Generisana mreža

Mreža je nestruktuirana i sastoji se od 639 445 ćelija. Granični uslovi toplotnih izvora su konstantne toplotne snage 750 W/m^2 za izvore toplote i za svetlosne izvore 150 W/m^2 , gubitak toplote kroz vrata je 100 W/m^2 . Unutrašnja emisivost za elemente koje čine izvore toplote je 0,85.

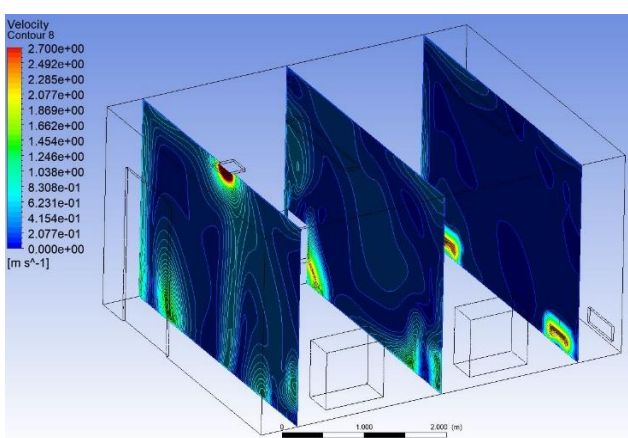
Zidovi, pod i plafon posmatraju se kao adijabatske površine. Za proračun je upotrebljen izmenjen dvojednačinski model turbulentnih napona „Realizable k- ϵ “ zajedno sa skalabilnom zidnom funkcijom, pošto daje fizički realnija rešenja u situacijama gde standardni model može da daje nerealan visoku turbulentnu viskoznost [6]. Zato je pogodan za simulacije ventilacije prostorija sa jednostavnom geometrijom, gde nije od preterano velike važnosti ponašanje toka u blizini zida. Nudi i relativno brzu konvergenciju. Na mestima gde se ubacuje vazduh definisana je brzinom od 2,5 m/s, intenzitet turbulencije od 5% i odnos turbulentne i laminarne viskoznosti od 10. Na izlazu iz proračunskog domena, tj. na usisnoj rešetki zadat je granični uslov konstatnog pritiska. Ovo pretpostavlja da se sve promenljive ne menjaju duž pravca izlaza, sem izvoda brzina u pravcu normale na ravan usisne rešetke, dok je pritisak na izlazu jednak atmosferskom pritisku. Fluid je vazduh. Diskretizacija i rešavanje jednačina je rađeno u softveru Ansys Fluent®. Na slikama 3 i 4 prikazana su polja temperature za srednje ravni prostorije, dok su na slikama 5 i 6 prikazano polje brzine i vektori brzine u ravni na sredini prostorije. Temperatura prostorije dobijena kao prosečna vrednost promenljive u fluidnom domenu iznosi $25,49^\circ\text{C}$.



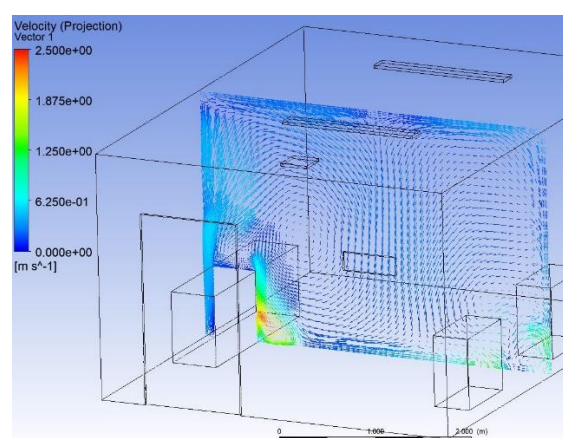
Slika 3. Raspodela temperatura u Z ravni i Y ravni na sredini domena



Slika 4. Raspodela temperatura na podu i plafonu



Slika 5. Brzinsko polje u 3 ravni



Slika 6. Vektori brzine projektovani na središnju ravan prostorije

6. Zaključak

U radu su analizirane određene prednosti i mane pristupa rešavanja problema upotrebom računarske dinamike fluida, osvrst na trenutno stanje u istraživanjima za primer ventilacije raznih javnih objekata, izvori grešaka u proračunima ovog tipa i smernice standardizacije izveštaja, kao i jedan primer korišćenja CFD pristupa za vizualizaciju temperaturskog i brzinskog polja na primeru zatvorene prostorije. Rezultati numeričkih simulacija omogućavaju projektantima da pravovremeno uoče potencijalne probleme, optimizuju poziciju ventilacionih elemenata i geometriju kanala, poboljšaju kvalitet unutrašnje sredine, a posledično i da i smanje potrošnju energije i troškove. Zbog toga se računarska dinamika fluida sve više afirmiše za donošenje inženjerskih odluka zasnovanih na preciznim podacima, posebno za primere objekata navedenih u ovom radu. Sa daljim razvojem softverskih i računarskih tehnologija očekuje se da će CFD u budućnosti postati standardni deo inženjerske delatnosti u oblasti termotehničkih sistema.

7. Literatura

- [1] **Peter V. Nielsen**, Fifty years of CFD for room air distribution, *Building and Environment*, Volume 91, 2015, Pages 78-90, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.035>

-
- [2] **Shahrzad M., Amir V., Omid A., Sasan S.**, Enhancing Indoor Environmental Simulations: A Comprehensive Review of CFD Methods, *64th International Conference of Scandinavian Simulation Society*, Västerås, Sweden, September 26-27, 2023
 - [3] **Ferziger, Joel H., and Milovan Perić**, Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd rev. ed., Springer, 2002
 - [4] *** <https://www.cfd-online.com/Wiki/Codes>
 - [5] *** AIAA. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1998.
 - [6] **Wilcox, D. C.**, Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, La Canada, California, USA, 1993.