

Numerička analiza izmjene topline konvekcijom

Gerometta, Michele

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:190:273844>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

NUMERIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE KONVEKCIJOM

Rijeka, rujan 2024.

Michele Gerometta

0069073150

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

NUMERIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE KONVEKCIJOM

Mentor: Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Rijeka, rujan 2024.

Michele Gerometta

0069073150

Rijeka, 13. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**
Predmet: **Numeričko modeliranje u termodinamici**
Grana: **2.15.07 termodinamika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Michele Gerometta (0069073150)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva
Modul: Procesno i energetska strojarstvo

Zadatak: **NUMERIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE KONVEKCIJOM / NUMERICAL ANALYSIS OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER**

Opis zadatka:

Potrebno je opisati osnovne oblike izmjene topline. Za proces prijelaza topline konvekcijom potrebno je definirati matematički model strujanja i prijelaza topline. Za različite pogonske uvjete potrebno je provesti numeričke proračune i prikazati osnovna polja fizikalnih veličina te provesti osnovnu analizu procesa prijelaza topline konvekcijom. Rad mora obuhvatiti: uvod s opisom osnovnih oblika izmjene topline, opis fizikalnog problema, opis matematičkog modela, opis numeričkog rješavanja, prikaz i analizu dobivenih rezultata, zaključak, popis oznaka, popis korištene literature te sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



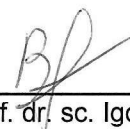
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Ja, dolje potpisani Michele Gerometta, ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mojega vlastitog samostalnog rada te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Rijeka, rujan 2024.



Michele Gerometta

Sadržaj

1. UVOD	1
2. IZMJENA TOPLINE	2
2.1. Provođenje.....	2
2.2. Konvekcija	4
2.3. Prolaz topline.....	6
2.4. Zračenje.....	7
2.5. Istovremena izmjena topline konvekcijom i zračenjem	13
3. ČIMBENICI UGODNOSTI BORAVKA U ZATVORENIM PROSTORIMA	15
4. ANALIZA RAZLIČITIH OBLIKA GRIJANJA U STAMBENOM PROSTORU	18
5. MATEMATIČKI MODEL	20
5.1. Domena	21
5.2. Jednadžbe očuvanja.....	22
5.3. Početni i rubni uvjeti	23
6. NUMERIČKO RJEŠAVANJE	26
6.1. Izrada i umrežavanje domene	29
7. REZULTATI.....	30
7.1. Raspodjela temperatura i vektora brzina za različite slučajeve grijanja.....	33
7.2. Vremenske promjene temperature zraka u karakterističnim točkama prostorije	44
7.3. Prikaz ujednačenosti temperatura u prostoru	48
7.4. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom	50
8. ZAKLJUČAK	51
9. POPIS LITERATURE	52
10. POPIS SLIKA	53
11. POPIS TABLICA.....	55
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	56
ABSTRACT AND KEY WORDS.....	57

1. UVOD

Tema ovog rada je numerička analiza izmjene topline konvekcijom u kojemu će se pomoću softvera analizirati slobodna konvekcija u jednoj prostoriji za tri različita slučaja grijanja. Prva dva slučaja odnose se na podno grijanje za temperature poda od 20 °C i 30 °C, dok je treći slučaj vezan za ogrjevno tijelo koje može biti radiator ili električna grijalica temperature 60 °C postavljeno uz vanjski zid.

U prvom se djelu rada opisuju osnovne izmjene topline, odnosno provođenje, konvekcija i zračenje te se opisuju čimbenici ugodnosti boravka u zatvorenim prostorima, kao što su toplinska ugodnost, kvaliteta zraka, osvjetljenje i buka.

U drugom djelu rada definiran je matematički model te rubni i početni uvjeti koji su potrebni u daljnjem proračunu. Također, opisana je numerička metoda koja je korištena pri numeričkom rješavanju problema. Na kraju su prikazani rezultati pomoću slika, grafova i tablica.

Računalna dinamika fluida ili skraćeno CFD (eng. computational fluid dynamics) je metoda kojom se rješavaju matematički modeli pomoću računala. Ta metoda uvelike olakšava i ubrzava posao inženjerima. U odnosu na eksperimentalne metode CFD je jeftiniji i brži za izvesti, međutim rezultati numeričkog proračuna moraju biti pravilno interpretirani, a matematički model i numerički postupak validirani.

Problem kod numeričkog rješavanja je taj da rezultati mogu biti nerealni ili netočni. Nerealne rezultate je lako prepoznati pošto su oni fizikalno nemogući, dok su netočni rezultati teži za prepoznati zbog toga što su oni realni, ali netočni. Zbog toga se rezultati provjeravaju. Idealan način provjere je eksperimentalno ispitivanje, no često nismo u mogućnosti to provesti, te se tada rezultati uspoređuju sa rezultatima u literaturi.

Softver korišten za provođenje numeričke analize je Ansys Fluent.

2. IZMJENA TOPLINE

Izmjena topline je pojava prijenosa topline u kojoj toplina prelazi iz područja više temperature na područje niže temperature, odnosno pojava u kojoj toplinski tok ide u smjeru temperaturnog pada [1].

Postoje tri osnovne vrste izmjene topline: provođenje, konvekcija te zračenje, gdje su provođenje i konvekcija vezana za tvar, dok zračenje nije vezano za tvar [2].

2.1. Provođenje

Provođenje topline je transport topline kroz krutu stijenku; ono se vrši međusobnim sudaranjem molekula [3]. Povećanjem temperature kinetička energija molekula se povećava. Brže molekule kad uđu u kontakt sa sporijim molekulama usporavaju, dok sporije molekule ubrzavaju, odnosno brzine im se nastoje izjednačiti, na taj način se i temperature izjednačavaju [1].

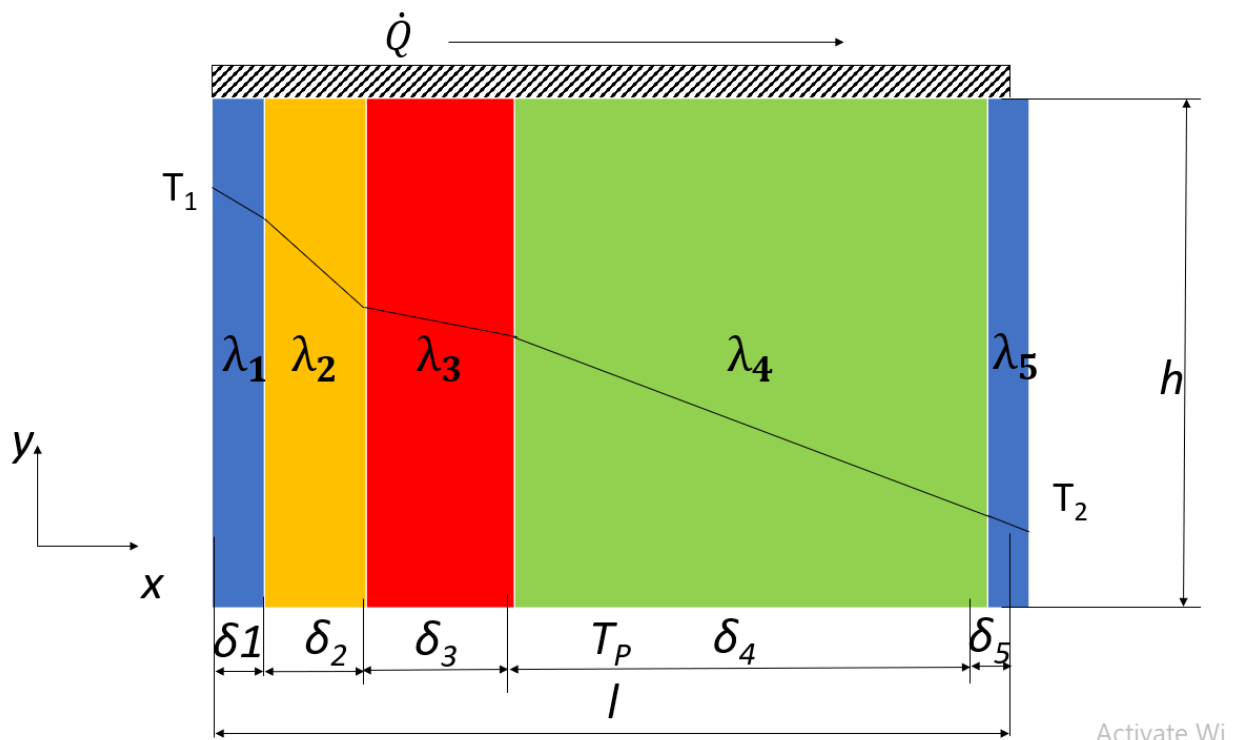
Stacionarno stanje provođenja topline je stanje u kojemu su temperature površina neke ravne stijenke u vremenu ustaljene [2]. U takvom slučaju vrijedi Fourierov zakon provođenja topline (2.1.1) koji glasi:

$$\dot{Q} = \lambda * \frac{t_1 - t_2}{\delta} * F \quad (2.1.1),$$

gdje je:

- \dot{Q} toplinski tok [W]
- t_1, t_2 temperature na površinama stijenke [°C, K]
- δ debljina stijenke [m]
- F površina stijenke (površina izmjene topline) [m²]
- λ koeficijent toplinske vodljivosti (koeficijent provođenja topline) [W/mK] [3].

Na sljedećoj slici prikazana je raspodjela temperature kod provođenja topline kroz ravnu stijenku sastavljenu od više različitih slojeva.



Slika 2.1 Raspodjela temperature kod provođenja topline kroz ravnu stijenku sastavljenu od više različitih slojeva

Koeficijent provođenja topline, koji se utvrđuje eksperimentalno, ovisi o vrsti tvari, strukturi, gustoći, vlažnosti, temperaturi te o smjeru toplinskog toka [1]. Utjecaj temperatura je najčešće neznatan te ga se u pravilu zanemaruje [2].

Za neki općeniti slučaj provođenja topline u izotropnom tijelu, odnosno tijelu od homogenog materijala, vrijedi Fourierova diferencijalna jednačba (2.1.2) koja glasi:

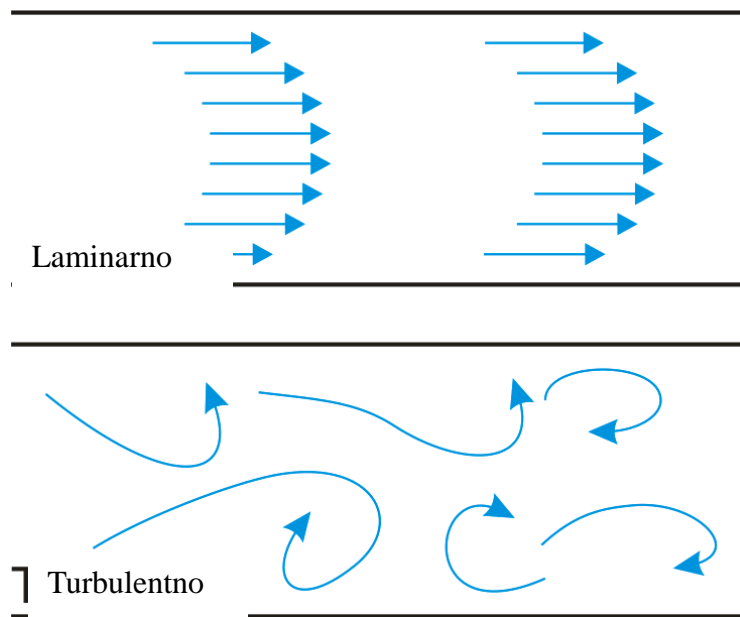
$$-\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + c \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \dot{q}_i \quad (2.1.2),$$

gdje je:

- λ koeficijent toplinske vodljivosti (koeficijent provođenja topline) [W/mK]
- c specifična toplina [J/kgK]
- ρ gustoća [kg/m³]
- \dot{q}_i toplinski izvor [W/m³]
- t temperatura [K]
- τ vrijeme [s]
- x, y, z prostorne koordinate [m] [3].

2.2. Konvekcija

Prijelaz topline konvekcijom definira se kao izmjena topline između fluida i krute stijenke.[3] Pri turbulentnom strujanju toplije čestice putuju sa stijenke prema jezgri fluida, a hladnije čestice putuju od jezgre fluida prema stijenki, čime dolazi do poprečnog gibanja čestica. Pri laminarnom strujanju nema izmjene čestica među slojevima fluida, već se izmjena topline vrši čistim provođenjem [2]. Na slici su shematski prikazane različite vrste strujanja.



Slika 2.2 Shematski prikaz gibanja čestica kod laminarnog i turbulentnog strujanja [4]

Pri strujanju fluida uz rub stijenke nastaje granični sloj koji uz sam rub stijenke uvijek ima tanki laminarni rubni sloj. Taj se sloj nalazi blizu površine stijenke te se izmjena topline vrši samo provođenjem. Na samoj stijenki brzina strujanja jednaka je nuli; brzina strujanja se povećava što se više udaljavamo od stijenke. Na određenoj udaljenosti od ulaznog ruba može nastati turbulentni sloj, pri toj preobrazbi turbulentni sloj se sve više povećava na račun laminarnog sloja. Preobrazba iz laminarnog u turbulentno strujanje dešava se kad se postigne kritična vrijednost Reynoldsovog broja, a Reynoldsov broj računa se po sljedećoj jednadžbi (2.2.1):

$$Re = \frac{w_0 l_0}{\nu} \quad (2.2.1),$$

gdje je:

- Re Reynoldsov broj
- w_0 karakteristična brzina struje [m/s]
- l_0 karakteristična geometrijska veličina [m]
- ν kinematički viskozitet [m²/s] [3].

Kritični Reynoldsov broj ovisi o tome je li strujanje na ulazu neometano, o hrapavosti površine te o zaobljenosti ulaznog ruba. Kod tehničkih proračuna kritična vrijednost Reynoldsovog broja iznosi oko 3000. Kad je vrijednost stvarnog Reynoldsovog broja manja od kritične, strujanje je laminarno, dok kad je vrijednost veća od kritične strujanje je turbulentno. Reynoldsov broj je bezdimenzijska značajka [3].

Postoje dvije vrste konvekcije, odnosno slobodna te prisilna konvekcija. Pri slobodnoj konvekciji izmjena topline uzrokuje strujanje, a pri prisilnoj konvekciji strujanje se podražava vanjskim uvjetima. Moguća je kombinacija prisilne i slobodne konvekcije [3].

Izmijenjena toplina konvekcijom može se izračunati pomoću Newtonove jednadžbe prijelaza topline konvekcijom (2.2.2), koja glasi:

$$Q = F \alpha (t_s - t_0) \tau \quad (2.2.2),$$

gdje je:

Q	izmijenjena toplina između krute stijenke i fluida [J]
F	površina izmjene topline [m ²]
α	koeficijent prijelaza topline konvekcijom [W/m ² K]
t_s	temperatura površine stijenke [K] ili [°C]
t_0	temperatura fluida [K] ili [°C]
τ	vrijeme [s] [3].

Pomoću Newtonove jednadžbe može se izračunati i izmijenjeni toplinski tok (2.2.3):

$$\dot{Q} = F \alpha (t_s - t_0) \quad (2.2.3),$$

gdje je:

\dot{Q}	izmijenjeni toplinski tok [W] [3].
-----------	------------------------------------

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom je empirijska veličina koja se često koristi u praksi [3].

Fizikalna svojstva koja utječu na izmjenu topline su gustoća, specifična topline, dinamički viskozitet, kinematički viskozitet i koeficijent toplinske vodljivosti [5].

Gustoća u slučaju nestlačivog fluida ne ovisi o temperaturi i tlaku, a definira se kao omjer mase i volumena. Kod nehomogenog fluida gustoća je funkcija položaja u prostoru. Mjerna jedinica je kg/m^3 [5].

Specifična toplina definira se kao količina topline koju je potrebno dovesti jediničnoj količini tvari kako bi se temperatura tvari povećala za 1 K i prikazuje nam ovisnost unutarnje energije o temperaturi [2]. Mjerna jedinica je J/kgK [3].

Dinamički viskozitet ili dinamička žilavost mjeri se u Pa s te ovisna je o temperaturi. Kod kapljevine dinamički viskozitet pada s porastom temperature, dok kod idealnih plinova raste porastom temperature te je neovisna o gustoći [2].

Kinematički viskozitet (2.2.3) definira se kao:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2.3),$$

gdje je:

- ν kinematički viskozitet [m^2/s]
- η dinamički viskozitet [Pa s]
- ρ gustoća [kg/m^3] [3].

2.3. Prolaz topline

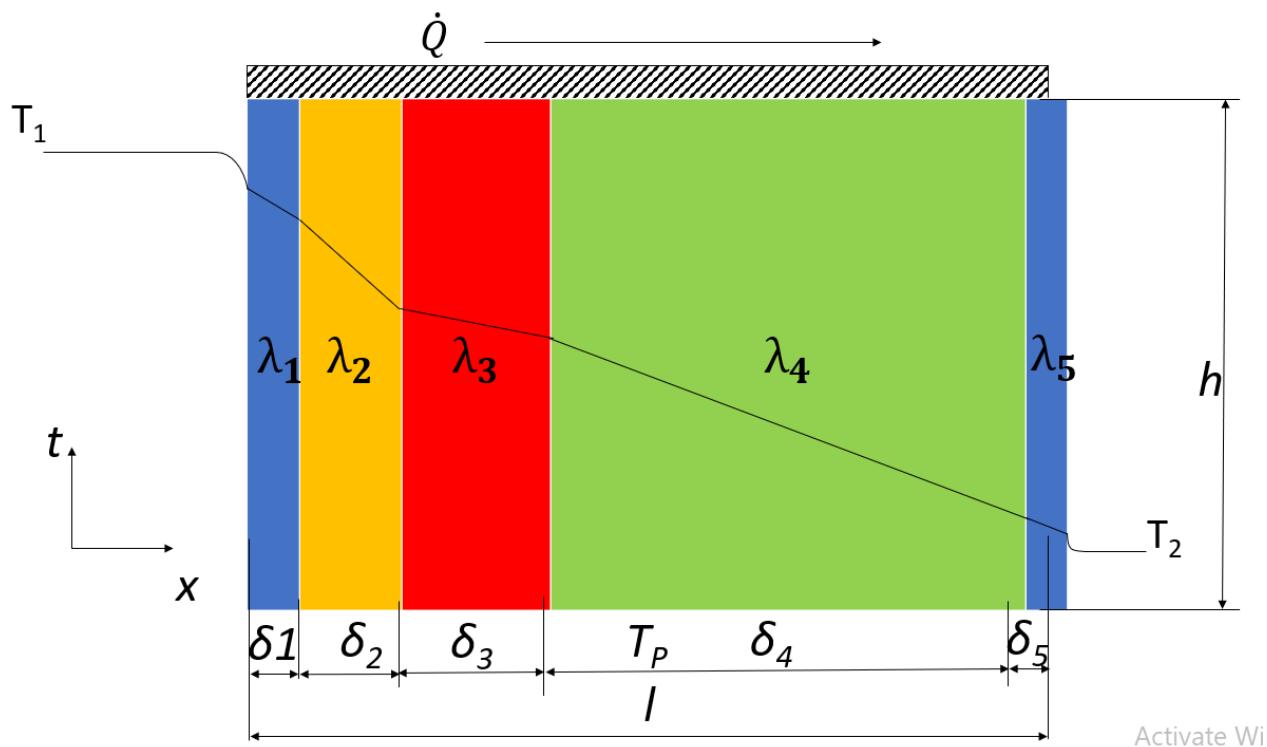
Prolaz topline je složeni oblik izmjene topline i predstavlja kombinaciju provođenja i konvekcije. Obuhvaća prijelaz topline konvekcijom sa fluida na krutu stijenku, zatim provođenje kroz krutu stijenku te prijelaz topline konvekcijom sa krute stijenske na drugi fluid. Izmijenjeni toplinski tok (2.3.1) može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$\dot{Q} = F k (t_1 - t_2) \quad (2.3.1),$$

gdje je:

- \dot{Q} izmijenjeni toplinski tok prolazom topline [W]
- F površina [m^2]
- k koeficijent prolaza topline [$\text{W/m}^2\text{K}$]
- $(t_1 - t_2)$ razlika temperatura dvaju fluida [K] [3].

Na sljedećoj slici prikazana je raspodjela temperature kod prolaza topline.



Slika 2.3 Raspodjela temperature kod prolaza topline

2.4. Zračenje

Zračenjem se energija izmjenjuje pomoću elektromagnetskih valova. Tijekom zračenja tijelo može zračiti različitim valnim duljinama, u kojima je određena valna duljina glavni prijenosnik energije. Nije nužno uvijek ista valna duljina glavni prijenosnik energije, već to ovisi o temperaturi [2].

Valne duljine dijelimo na sljedeća područja:

- visinsko zračenje ($\lambda < 5 \cdot 10^{-9} \mu\text{m}$)
- gama zračenje ($5 \cdot 10^{-7} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-5} \mu\text{m}$)
- rendgensko zračenje ($10^{-6} \mu\text{m} < \lambda < 2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$)
- ultraljubičasto zračenje ($2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
- svjetlosno zračenje ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$)
- toplinsko ili infracrveno zračenje ($0,8 \mu\text{m} < \lambda < 400 \mu\text{m}$)
- radio valovi ($\lambda > 100 \mu\text{m}$).

Osnovna karakteristika zračenje naziva se boja zračenja. Veza između valne duljine i frekvencije može se opisati sljedećom jednačinom:

$$\lambda * f = c \quad (2.4.1),$$

gdje je:

- λ valna duljina [m]
- f frekvencija [s^{-1}]
- c brzina elektromagnetskog vala [m/s] [3].

Prolaskom kroz različite medije frekvencija se ne mijenja, dok su valna duljina i brzina promjenjive [3].

Energija zračenja koja dolazi na tijelo djelomično se reflektira, djelomično se apsorbira te se djelomično propusti kroz tijelo. To se može prikazati sljedećom jednačinom (2.4.2):

$$r + a + d = 1 \quad (2.4.2),$$

gdje je:

- r koeficijent refleksije
- a koeficijent apsorpcije
- d koeficijent propuštanja (dijatermije) [3].

Koeficijent apsorpcije a ovisi o prirodi stijenke, njejoj temperaturi te o valnoj duljini. Tijela koja apsorbiraju zračenje skoro u potpunosti, odnosno tijela koja su nepropusna, nazivaju se adijatermna te je njihov koeficijent propuštanja jednak nuli [2].

Za neko nepropusno tijelo koje se nalazi u šupljini jednolike temperature vrijedi da je omjer emitirane i dozračene energije tijela koje je u toplinskoj ravnoteži sa šupljinom jednak apsorpcijskom koeficijentu a toga tijela, odnosno (2.4.3):

$$\frac{\dot{E}}{\dot{E}'} = a \leq 1 \quad (2.4.3),$$

gdje je:

- \dot{E} vlastita emitirana energija tijela [W/m^2]
- \dot{E}' dozračena energija tijelu [W/m^2]
- a koeficijent apsorpcije [3].

Tijelo koje u potpunosti apsorbira svu dozračenu energiju naziva se crno tijelo, to je tijelo kojemu je emitirana energija jednaka dozračenju [2]. Sva ostala prirodna tijela su siva tijela, odnosno tijela kojima je $a < 1$ [3].

Omjer energija zračenja sivog tijela u odnosu na crno tijelo nazivamo emisijski omjer ili emisijski koeficijent zračenja (2.4.4) te iznosi:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} \quad (2.4.4),$$

gdje je:

- ε emisijski omjer zračenja
- E energija zračenja sivog tijela [W/m^2]
- E_c energija zračenja crnog tijela [W/m^2].[3]

Pošto je $a = \frac{E}{E_c}$, sljedeći da je $\varepsilon = a$ (2.4.5), ova se jednačina naziva Kirchhoffov stavak [3].

Osnovni zakoni zračenja topline

Među osnovne zakone zračenja topline ubrajamo:

- Stefan-Boltzmannov zakon (2.4.6), koji kaže da je odzračena energija crnog tijela proporcionalna četvrtoj potenciji termodinamičke temperature toga tijela, odnosno:

$$\dot{E}_c = \sigma T^4 \quad (2.4.6),$$

gdje je:

- \dot{E}_c odzračena energija crnog tijela [W/m^2]
- σ univerzalna konstanta zračenja, $5,667 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2 \text{K}^4]$
- T temperatura [K]

- Lambertov kosinusov zakon (2.4.7), koji glasi:

$$\dot{E}_\varphi = \dot{E}_n \cos\varphi \quad (2.4.7),$$

gdje je:

- \dot{E}_φ energija odzračena u smjeru pod kutom φ prema normali [W/m^2]

\dot{E}_n energija odzračena okomito na ravninu otvora [W/m^2]

φ kut odklona od normale

- izraz za zračenje u polutku prostora (2.4.8) glasi:

$$\dot{E} = \pi \dot{E}_n \quad (2.4.8),$$

gdje je:

\dot{E} sveukupno zračenje neke plohe u jednu polutku prostora [W/m^2]

\dot{E}_n zračenje plohe u smjeru normale [W/m^2]

- prema Maxu Plancku razdioba energije zračenja na razne valne duljine (2.4.9) može se prikazati izrazom:

$$J_{c\lambda T} = \frac{h c^2}{\lambda^5} * \frac{2}{e^{k\lambda T} - 1} \quad (2.4.9),$$

gdje je:

$J_{c\lambda T}$ intenzitet zračenja jednobojnog snopa zraka valne duljine λ koje zajedno sa zrakama ostalih valnih duljina odašilje crna stijenka temperature T [W/m^3]

c brzina svjetlosti [m/s]

h Planckov elementarni kvant [Js]

k Boltzmannova konstanta [J/K]

- Wienov zakon pomaka maksimuma intenziteta zračenja (2.4.10) kojim se određuje valna duljina kod koje se odašilje najveći intenzitet zračenja ovisno o temperaturi glasi:

$$(\lambda)_{J_{max}} = \frac{0,0029}{T} \quad (2.4.10),$$

gdje je:

T temperatura [K]

$(\lambda)_{J_{max}}$ valna duljina kod koje se odašilje najveći intenzitet zračenja [3].

Izmjena topline zračenjem

Emisija nekog tijela neovisna je o njenoj okolini, ovisna je samo o vlastitoj temperaturi te o stanju njene površine. Sveukupno odana energija je razlika između emitirane energije i energije koja se pri dozračivanju apsorbirala te se u proračun moraju uzeti u obzir sva tijela koja zrače. Proračun sveukupne odane energije je vrlo složen te se najčešće razmatraju samo jednostavniji slučajevi [2].

Izmijenjena gustoća toplinskog toka zračenjem između dvije usporedne stijenke između kojih se nalazi neki propusni medij, na primjer zrak ili vakuum, računa se pomoću sljedećeg izraza (2.4.11):

$$\dot{q}_{12} = C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2.4.11),$$

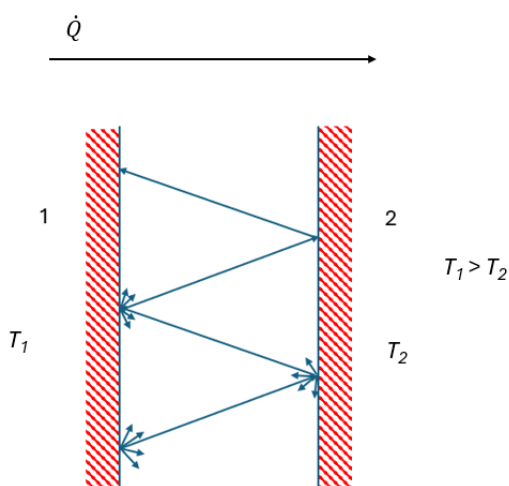
gdje je:

\dot{q}_{12} gustoća toplinskog toka izmijenjenog zračenjem između usporednih stijenki [W/m²]

C_{12} konstanta zračenja za usporedne stijenke [W/m²(100K)⁴]

T_1, T_2 temperatura stijenki [K] [3].

Na sljedećoj slici prikazan je primjer izmjene topline zračenjem između dvije usporedne stijenke.



Slika 2.4 Izmijenjeni toplinski tok zračenjem između dvije usporedne stijenke

Za slučaj kada se neki zastor nalazi između usporednih stijenki gustoća toplinskog toka se smanjuje i dobiva se pomoću sljedećeg izraza (2.4.12):

$$\dot{q}' = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \left(\frac{2}{\varepsilon'} - 1\right)} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (2.4.12),$$

gdje je:

\dot{q}' gustoća toplinskog toka izmijenjenog zračenjem između usporednih stijenki sa zastorom [W/m^2]

C_c konstanta zračenja crnog tijela [$\text{W}/\text{m}^2(100\text{K})^4$]

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ emisijski omjer zračenja stijenki

ε' emisijski omjer zastora

T_1, T_2 temperature stijenki [K] [3].

Toplinski tok izmijenjen zračenjem između obuhvaćenog i obuhvatnog tijela računa se pomoću izraza (2.4.13):

$$\dot{Q}_{12} = F_1 C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (2.4.13),$$

gdje je:

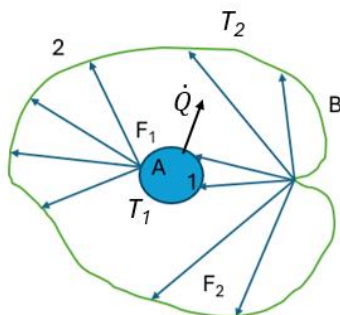
\dot{Q}_{12} toplinski tok izmijenjen zračenjem između obuhvaćenog i obuhvatnog tijela [W]

F_1 površina obuhvaćenog tijela [m^2]

C_{12} konstanta zračenja za slučaj obuhvaćenog tijela [$\text{W}/\text{m}^2(100\text{K})^4$]

T_1, T_2 temperatura stijenki [K] [3].

Na sljedećoj slici prikazana je izmjena energije zračenjem obuhvatnog i obuhvaćenog tijela.



Slika 2.5 Izmijenjena energija zračenjem obuhvaćenog tijela

Kako bi se proračun izmjene energije zračenjem mogao prilagoditi proračunu prijelaza topline konvekcijom uvodi se koeficijent prijelaza topline zračenjem. Koristi se kod ne prevelikih razlika temperatura.[2] Njegov je izraz sljedeći (2.4.14):

$$\alpha_z = C_{12} \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_{zr}} \quad (2.4.14)$$

gdje je:

α_z koeficijent prijelaza topline zračenjem [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

C_{12} konstanta zračenja [$\text{W}/\text{m}^2(100\text{K})^4$]

T_1, T_2 temperature površina stijenki [K]

T_{zr} temperatura okolnog zraka (fluida) s kojim se izmjenjuje toplina konvekcijom [K].

2.5. Istovremena izmjena topline konvekcijom i zračenjem

Pri izmjeni topline česta je pojava istovremena izmjene topline konvekcijom i zračenjem. U tom slučaju dolazi do izmjene topline konvekcijom između fluida i stijenke te izmjene topline zračenjem između dvije stijenke. Izraz kojim se računa ukupna izmjena topline je sljedeći (2.5.1):

$$\dot{Q}_{uk} = \alpha_{uk} F (T_1 - T_{zr}) \quad (2.5.1),$$

gdje je:

\dot{Q}_{uk} ukupno izmijenjeni toplinski tok [W]

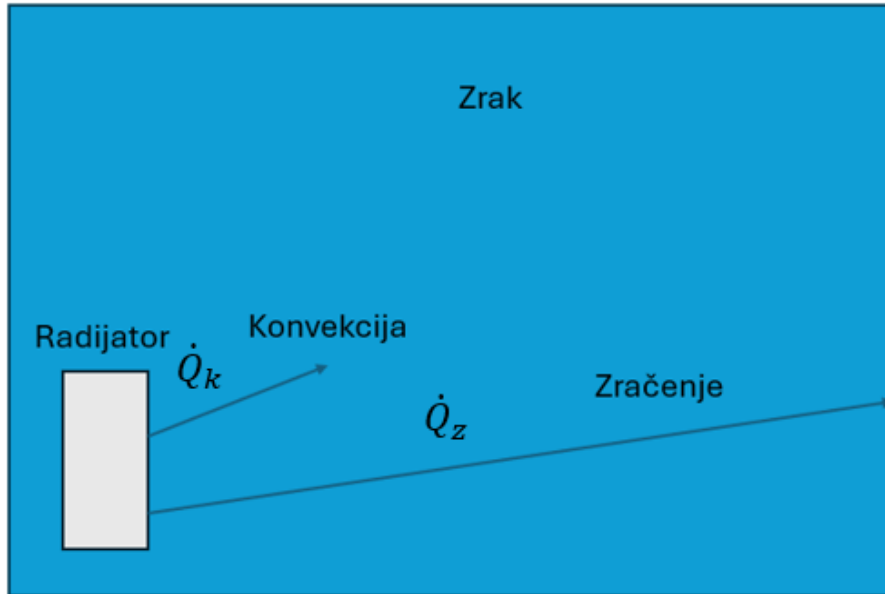
α_{uk} ukupni koeficijent prijelaza topline konvekcijom i zračenjem [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], koji je zbroj α_z i α_k

F površina izmjene topline [m^2]

T_1 temperatura toplije stijenke [K]

T_{zr} temperatura fluida (npr. zraka) [K] [3].

Na sljedećoj slici prikazan je radijator koji predaje toplinu konvekcijom zraku, dok se na stijenke zida toplina predaje zračenjem.



Slika 2.6 Primjer istovremene izmjene topline konvekcijom i zračenjem

3. ČIMBENICI UGODNOSTI BORAVKA U ZATVORENIM PROSTORIMA

Čovjek provodi većinu vremena u zatvorenim prostorima zbog čega je potrebno stvoriti uvjete u kojima će se osjećati ugodno. Osiguravanje ugodnosti boravka je glavni zadatak sustava grijanja, klimatizacije i ventilacije. Osim za ugodnost, potrebno je dobro projektirati sustave grijanja, klimatizacije i ventilacije zbog utjecaja na zdravlje ljudi. Sustav grijanja ima zadatak dovoditi dovoljnu količinu topline radi održavanja sobne temperature te radi nadoknađivanja toplinskih gubitaka prema vanjskom prostoru [6].

Četiri osnovne funkcije sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije su:

- osiguranje potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora,
- priprema zraka,
- razdioba pripremljena zraka te
- regulacija i održavanje stanja zraka u zatvorenom prostoru unutar zadanih granica.

Četiri glavna čimbenika ugodnosti boravka u prostoru su:

- toplinska ugodnost,
- kvaliteta zraka,
- osvjetljenje i
- buka [6].

Ugodan prostor definira se kao prostor u kojem se ne zamjećuju nikakve tjelesne i psihološke smetnje. Na ugodnost ne utječu samo četiri spomenuta glavna čimbenika, već i fizičko stanje osobe, odnosno njeno zdravstveno stanje, raspoloženje i slično [6].

Ugodnost nije neka fizikalna veličina, već subjektivan doživljaj pojedinca koji može varirati od osobe do osobe. Zbog tog razloga nemoguće je zadovoljiti svaku osobu koja boravi u toj prostoriji pa se prema međunarodnim normama ugodnost zadovoljava kada se minimalno 80% osoba osjeća ugodno, odnosno kad postotak nezadovoljnih osoba ne prelazi 20%. Naravno, uvijek se teži smanjenju broja nezadovoljnih osoba [6].

Od četiri čimbenika ugodnosti boravka nama je najzanimljivija toplinska ugodnost na koju utječu sljedeći parametri:

- temperatura zraka,
- temperature ploha u prostoru,
- vlažnost zraka,
- brzina strujanja zraka,
- razina odjevenosti te
- razina fizičke aktivnosti [6].

Prva četiri parametara nazivaju se okolišnim parametrima, dok se razina odjevenosti i razina fizičke aktivnosti nazivaju parametrima osobe [6].

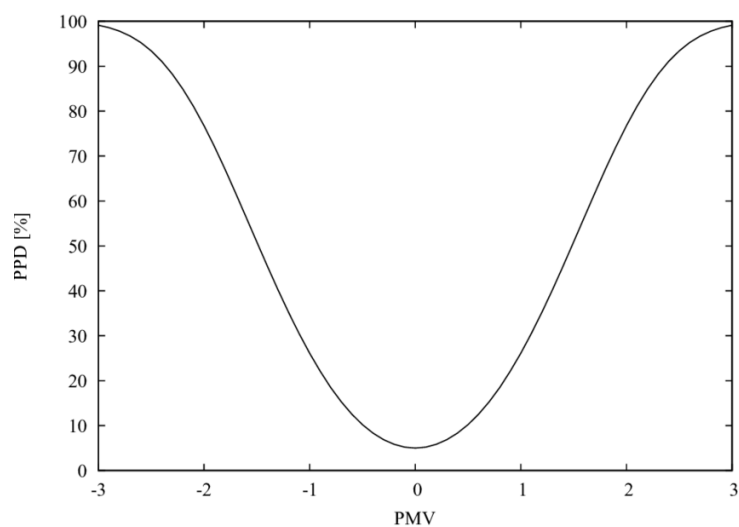
Prema Fangeru postoje tri osnovna uvjeta optimalne toplinske ugodnosti. Prvi uvjet je taj da su osoba i prostor u kojoj boravi u toplinskoj ravnoteži. Toplinska ravnoteža je nužan uvjet, no uz taj uvjet potrebno je zadovoljiti i druga dva, odnosno: ne pretjerano izlučivanje znoja te ne preniska prosječna temperatura kože. Ako neki od ova tri uvjeta nije zadovoljen dolazi do osjećaja nelagode.

Tijelo predaje toplinu okolišu preko kože i dišnog sustava. Preko kože tijelo izmjenjuje osjetnu i latentnu toplinu. Osjetnu toplinu izmjenjuje provođenjem, konvekcijom i zračenjem, a latentnu toplinu izmjenjuje ishlapljivanjem izlučena znoja. Dišni sustav također izmjenjuje osjetnu i latentnu toplinu; osjetnu toplinu izmjenjuje konvekcijom tijekom disanja, a latentnu izmjenjuje ishlapljivanjem vlage [6].

Odjeća čini proces izmjene topline dodatno kompliciranim. Kada se u obzir uzme odjeća potrebno je proces razmatranja izmjene topline podijeliti na dva koraka. U prvom koraku analizira se izmjena topline između kože i vanjske površine odjeće, gdje nalazimo izmjenu topline zračenjem između kože i unutarnje površine odjeće, konvekciju između kože i sloja zraka između kože i odjeće, zračenje između pojedinih slojeva odjeće te provođenje kroz odjeću. U drugom koraku analizira se izmjena topline između vanjske površine odjeće i okoliša. Toplinski otpor odjeće izražava se pomoću mjerne jedinice clo [6].

Za vrednovanje toplinske ugodnosti koristi se PMV/PPD model. Indeks PMV (engl. Predicted Mean Vote) definira se kao predvidljiva prosječna ocjena ugodnosti boravka u prostoriji veće

skupine ljudi koji u njoj borave. Indeks PPD (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied) definira se kao predvidljivi postotak nezadovoljnih korisnika prostora [6]. PPD indeks može se izraziti kao funkcija PMV indeksa te je njihova korelacija prikazana na slici.



Slika 3.1 Prikaz korelacije između PPD i PMV indeksa [7]

Glavni izvori lokalne toplinske neugode su:

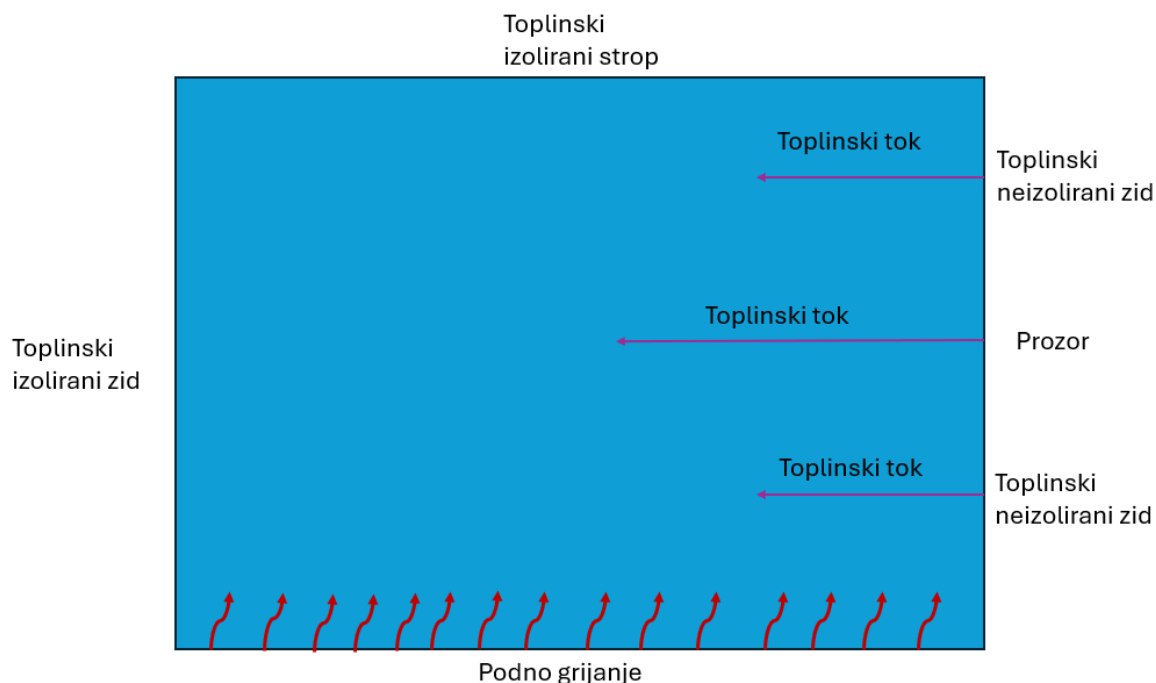
- nesimetričnost temperatura obuhvatnih ploha prostorije
- nepovoljna raspodjela temperature zraka
- nepovoljna temperatura poda
- propuh [6].

4. ANALIZA RAZLIČITIH OBLIKA GRIJANJA U STAMBENOM PROSTORU

U svrhu analize raspodjele temperature zraka koja utječe na toplinsku ugodnost u nastavku su analizirana tri različita slučaja grijanja prostorije. Širina prostorije je 3,5 m, dok je visina 2,7 m.

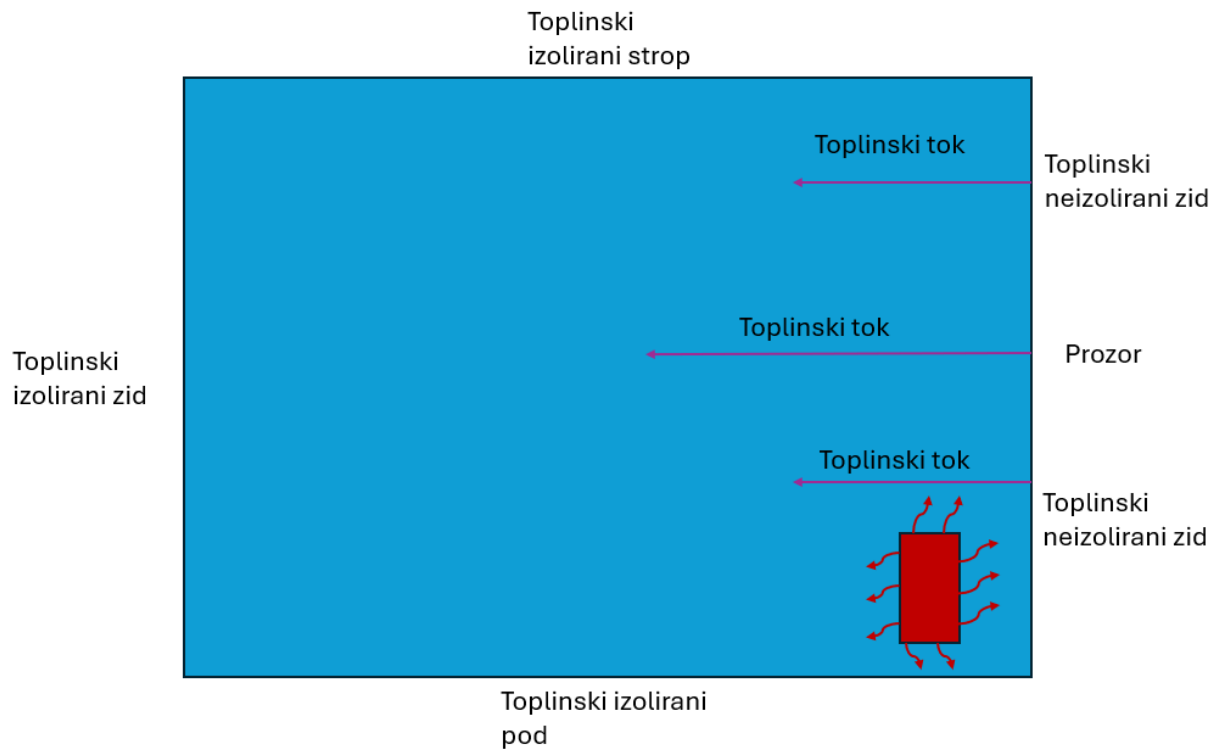
U prvom slučaju za grijanje prostorije korišteno je podno grijanje temperature 20 °C u kojemu su strop te jedan zid toplinski izolirani, dok kroz drugi zid postoji nekakva izmjena topline. Na zidu koji nije izoliran nalazi se i prozor što znači da kroz njega prolaze dva različita toplinska toka. Toplinski tok koji prolazi kroz prozor je veći od toplinskog toka koji prolazi kroz zid, odnosno izmjena topline kroz prozor će biti veća u odnosu na izmjenu topline kroz neizolirani zid.

Za drugi slučaj vrijede isti fizikalni uvjeti kao i za prvi slučaj s izuzetkom temperature podnog grijanja koja je sa 20 °C povišena na 30 °C. Fizikalni proces izmjene topline analiziran je kao dvodimenzijski nestacionarni problem. Na sljedećoj slici prikazana je izmjena topline u prethodno opisanoj prostoriji za prva dva slučaja.



Slika 4.1 Fizikalni proces izmjene topline u prostoriji s podnim grijanjem za slučaj 1 i slučaj 2

U trećem slučaju za grijanje prostorije korišten je radiator koji se nalazi uz vanjski zid ispod prozora te je njegova temperatura jednaka 60 °C. Ostali fizikalni uvjeti isti su kao i kod prethodna dva slučaja izuzev poda koji je u ovom slučaju toplinski izoliran. Na sljedećoj slici prikazana je izmjena topline u prethodno opisanoj prostoriji za treći slučaj.



Slika 4.2 Fizikalni proces izmjene topline u prostoriji s radiatorom za slučaj 3

U svrhu određivanja raspodjele temperature koja utječe na ugodnost u prostoriji provedena je numerička analiza izmjene topline za sva tri slučaja grijanja. Definiran je matematički model, rubni uvjeti i početni uvjeti koji su opisani u nastavku

5. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model čine jednačbe očuvanja i rubni uvjeti te dodatno početni uvjeti kod nestacionarnih problema. Jednačbe očuvanja i rubni uvjeti opisuju promjene varijabli unutar domene te rješavanje istih predstavlja ekstrapolaciju podataka definiranih na rubovima u unutrašnjost domene.

Rubne uvjete dijelimo na geometrijske i prirodne. Kod geometrijskih rubnih uvjeta zadaju se tražene fizikalne veličine na rubu domene, dok se kod prirodnih rubnih uvjeta zadaje tok tražene fizikalne veličine na rubu domene.

Matematički model moguće je riješiti analitički i numerički.

Analitička rješenja moguća su samo u određenim slučajevima, odnosno kod jednostavnih geometrija. Ona daju točna rješenja te je rješenje funkcija, odnosno dobijemo rješenje varijabli u svim točkama domene.

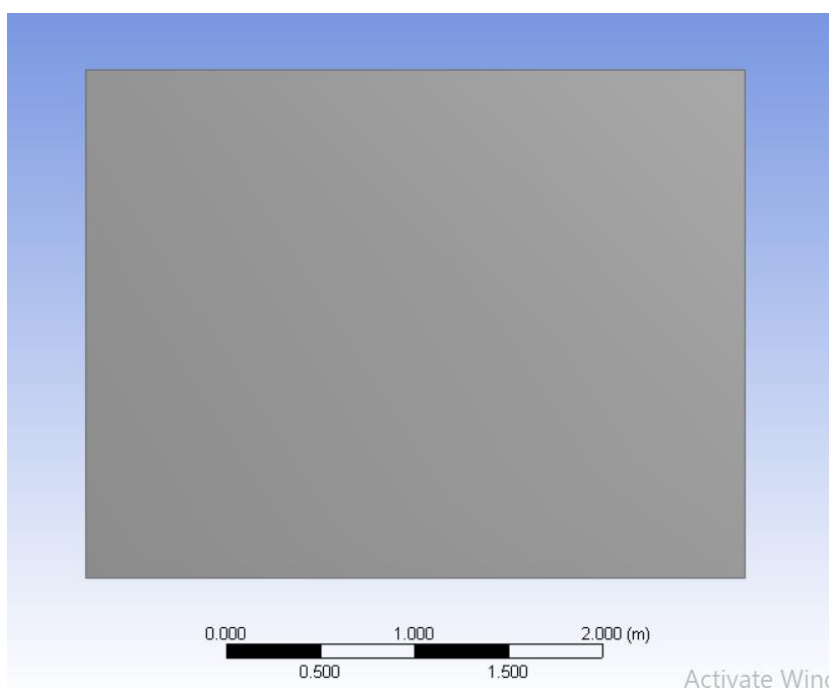
Numerička rješenja koriste se za složene geometrije. Ona daju približno točna rješenja te je rješenje varijabli samo u zadanim čvorovima domene, odnosno rješenje je skup diskretnih vrijednosti. Rješenja dobivamo primjenom numeričkih metoda pomoću kojih matematički model pretvaramo u sustav algebarskih jednačbi koje rješavamo primjenom direktnih ili iteracijskih metoda. Primjenom numeričkih metoda domena, odnosno najmanji reprezentativni dio fizikalnih pojava, se zamjenjuje numeričkom mrežom te se rješenja računaju u čvorovima mreže. Točnost rješenja ovisna je o gustoći mreže.

Budući da kod numeričkog rješavanja rezultati mogu biti nerealni ili netočni, oni se provjeravaju. Nerealne rezultate je lako prepoznati jer su fizikalno nemogući, dok je netočne rezultate teže prepoznati jer iako nisu točni, realni su. Ukoliko nismo u mogućnosti provesti eksperimentalno ispitivanje, što bi bio optimalan način provjere, rezultate ćemo usporediti s onima iz literature.

5.1. Domena

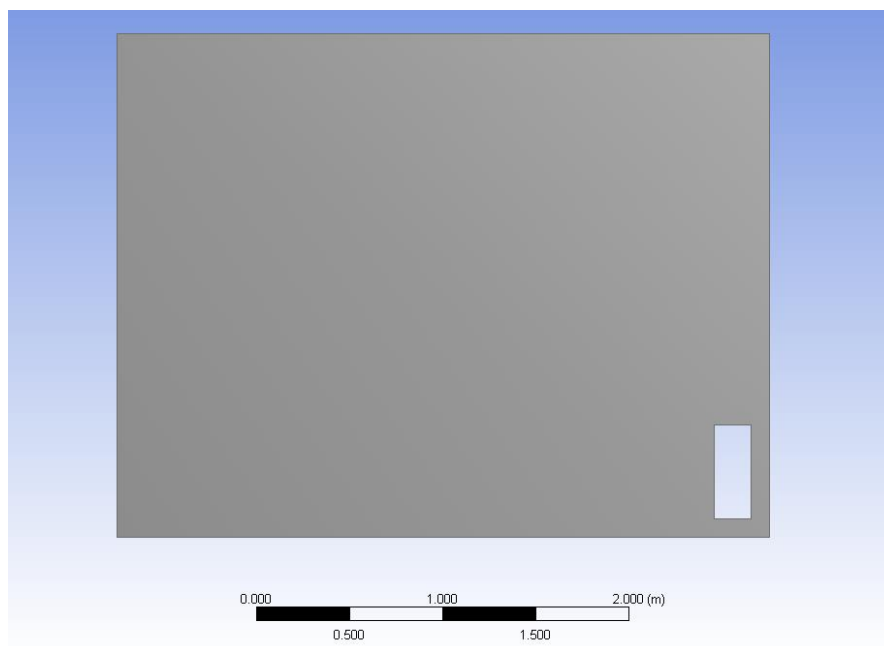
Domena, odnosno područje proračuna, je najmanji reprezentativni dio kojim su obuhvaćene sve analizirane fizikalne pojave. U skladu s opisom slučajeva u prethodnom poglavlju opisane su dvije domene.

Na slici 5.1 prikazana je domena koja obuhvaća slučaj 1 i slučaj 2 podnog grijanja. Visina prostorije je 2,7 m, a širina je 3,5 m. Strop i lijevi zid su toplinski izolirani, odnosno kroz njih ne prolazi nikakav toplinski tok, dok kroz desni zid, na kojemu se nalazi prozor kroz koji prolazi toplinski tok jednak 25 W/m^2 , prolazi toplinski tok jednak 9 W/m^2 . Na podu je zadana konstantna temperatura: 20 °C za prvi slučaj i 30 °C za drugi slučaj.



Slika 5.1 Domena za slučaj 1 i slučaj 2

Na slici 5.2 prikazana je domena slučaja 3. Visina i širina prostorije jednaka je kao i za prijašnju domenu, odnosno visina je 2,7 m, a širina 3,5m. Pod, strop i lijevi zid su toplinski izolirani, odnosno kroz njih ne prolazi nikakav toplinski tok, dok kroz desni zid, na kojemu se nalazi prozor kroz koji prolazi toplinski tok jednak 25 W/m^2 , prolazi toplinski tok jednak 9 W/m^2 . Na površini radijatora, koji se nalazi pored desnog zida, zadana je konstantna temperatura od 60 °C .



Slika 5.2 Domena za slučaj 3

5.2. Jednadžbe očuvanja

Jednadžbe očuvanja koje vrijede za zrak su jednadžba očuvanja energije, jednadžba očuvanja mase i dvije jednadžbe očuvanja količine gibanja (zbog toga što se problem analizira kao dvodimenzionalan).

Jednadžba očuvanja mase za nestišljivi fluid glasi (5.2.1):

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0. \quad (5.2.1)$$

Jednadžbe očuvanja količine gibanja glase (5.2.2), (5.2.3):

- za x-os: $\frac{\partial w_x}{\partial t} + \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \beta(T - T_0)g_x + \nu * \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right)$ (5.2.2)

- za y-os: $\frac{\partial w_y}{\partial t} + \left(w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta(T - T_0)g_y + \nu * \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right)$ (5.2.3).

Kod slobodne konvekcije potrebno je u matematički model uvesti dodatnu jednadžbu koja povezuje gustoću i temperaturu. U ovom slučaju korištena je Bussinesq-ova aproksimacija koja glasi (5.2.4):

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (5.2.4),$$

gdje je:

T	temperatura u promatranoj točki [K]
T_0	referentna temperatura (najčešće najniža temperatura domene) [K]
ρ	gustoća u promatranoj točki [kg/m ³]
ρ_0	gustoća pri referentnoj temperaturi T_0 [kg/m ³]
β	koeficijent temperaturne vodljivosti [1/K].

U jednadžbama očuvanja količine gibanja uključen je dodatni izvorni član koji opisuje uzgonske sile uzrokovane promjenom gustoće.

Jednadžba očuvanja energije za nestacionarni dvodimenzijski problem glasi (5.2.5):

$$\rho * \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(w_x * T)}{\partial x} + \frac{\partial(w_y * T)}{\partial y} \right) = \frac{\lambda}{c} * \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5.2.5).$$

5.3. Početni i rubni uvjeti

Potrebno je razlikovati geometrijske te prirodne rubne uvjete. Geometrijski rubni uvjeti su rubni uvjeti kojima je zadana tražena fizikalna veličina na rubu domene, a prirodni rubni uvjeti su rubni uvjeti kojima je zadan fluks tražene fizikalne veličine na rubu domene.

Za potpuno definiranje matematičkog modela potrebni su nam rubni i početni uvjeti koji nam definiraju raspodjele varijabli unutar zadanog područja proračuna. Kod nestacionarnih problema potrebno je definirati početne uvjete, odnosno početne vrijednosti svih varijabli u svim čvorovima domene.

Rubni uvjeti mogu se podijeliti u nekoliko vrsta:

- ulazni rubni uvjet,
- izlazni rubni uvjet,
- rubni uvjet na krutoj stijenci,
- rubni uvjet simetrije te
- periodički rubni uvjet.

U matematičkom modelu za ovaj slučaj definirani su početni uvjeti te rubni uvjeti na krutoj stijenci.

Matematički zapis početnih i rubnih uvjeta dan je u nastavku.

Podno grijanje s temperaturom poda od 20 °C (slučaj 1)

Pretpostavlja se da zrak u početku miruje te da je temperatura jednolika. Matematički zapis takvih fizikalnih uvjeta za početne uvjete je sljedeći (za $t = 0$ s):

- $w_x = 0$ m/s
- $w_y = 0$ m/s
- $T = 10$ °C.

Rubni uvjeti na krutoj stijenci odnose se na zidove, strop i pod. Kao što je prethodno opisano, lijevi zid i strop su toplinski izolirani te im je zadan prirodni rubni uvjet. Za desni zid i prozor su također zadani prirodni rubni uvjeti, no oni nisu toplinski izolirani, već kroz njih prolaze toplinski tokovi. Na podu je zadan geometrijski rubni uvjet, odnosno konstantna temperatura od 20 °C. Matematički zapis rubnih uvjeta je sljedeći:

- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 0$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $T = 20$ °C
- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 0$ m, $0 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0 < y < 0,7$ i $2,2 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -9$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0,7 < y < 2,2$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -25$ W/m².

Podno grijanje s temperaturom poda od 30 °C (slučaj 2)

Kao i u prethodnom slučaju pretpostavlja se da zrak u početku miruje te da je temperatura jednolika. Matematički zapis takvih fizikalnih uvjeta za početne uvjete je sljedeći (za $t = 0$ s):

- $w_x = 0$ m/s
- $w_y = 0$ m/s
- $T = 10$ °C.

Rubni uvjeti na krutoj stijenci odnose se na zidove, strop i pod. Kao što je prethodno opisano, lijevi zid i strop su toplinski izolirani te im je zadan prirodni rubni uvjet. Za desni zid i prozor su

također zadani prirodni rubni uvjeti, no oni nisu toplinski izolirani, već kroz njih prolaze toplinski tokovi. Na podu je zadan geometrijski rubni uvjet, odnosno konstantna temperatura od 30 °C. Matematički zapis rubnih uvjeta je sljedeći:

- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 0$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $T = 30$ °C
- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 0$ m, $0 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0 < y < 0,7$ i $2,2 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -9$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0,7 < y < 2,2$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -25$ W/m².

Radijatorsko grijanje s temperaturom od 60 °C (slučaj 3)

Kao i za slučajeve podnog grijanja pretpostavlja se da zrak u početku miruje te da je temperatura jednolika. Matematički zapis takvih fizikalnih uvjeta za početne uvjete je sljedeći (za $t = 0$ s):

Početni uvjeti (za $t = 0$ s):

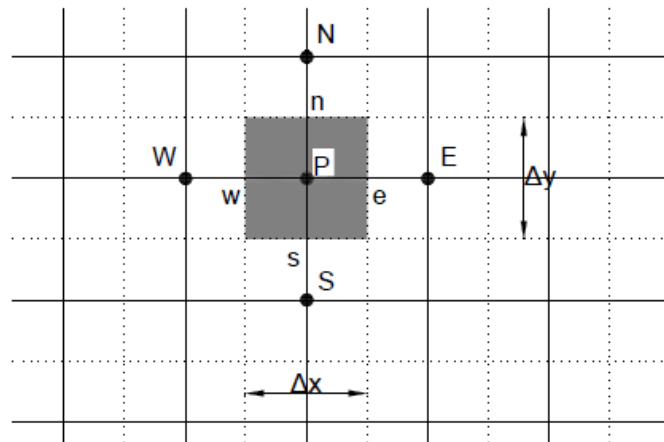
- $w_x = 0$ m/s
- $w_y = 0$ m/s
- $T = 10$ °C.

Rubni uvjeti na krutoj stijenci odnose se na zidove, strop i pod. Lijevi zid, strop i pod su toplinski izolirani te im je zadan prirodni rubni uvjet, dok kroz desni zid i kroz prozor prolaze toplinski tokovi. Na površini radijatora je zadan geometrijski rubni uvjet, odnosno konstantna temperatura od 60 °C. Matematički zapis rubnih uvjeta je sljedeći:

- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 0$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $0 < x < 3,5$ m, $y = 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 0$ m, $0 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = 0$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0 < y < 0,7$ i $2,2 < y < 2,7$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -9$ W/m²
- za $x = 3,5$ m, $0,7 < y < 2,2$ m vrijedi $w_x = 0$, $w_y = 0$, $\dot{q} = -25$ W/m²
- za $x = 3,2$ m, $x = 3,4$ m, $0,1$ m $< y < 0,6$ m, vrijedi $T = 60$ °C
- za $3,2 < x < 3,4$ m, $y = 0,1$ m, $y = 0,6$ m, vrijedi $T = 60$ °C.

6. NUMERIČKO RJEŠAVANJE

Numerička metoda korištena za rješavanje matematičkog modela je metoda kontrolnih volumena koja se temelji na integraciji opće jednačbe očuvanja (5.1) po kontrolnom volumenu. Domena se zamjenjuje određenim brojem kontrolnih volumena te se diferencijalne jednačbe očuvanja pretvaraju u jednačbe diskretizacije koje se povezuju u sustav algebarskih jednačbi te rješavaju pomoću direktnih ili iteracijskih metoda [8]. Na slici prikazani su kontrolni volumeni dvodimenzijске mreže.



Slika 6.1 Kontrolni volumen i čvorovi dvodimenzijске mreže

Opća jednačba očuvanja glasi:

$$\frac{\partial(\rho * \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho * \vec{w} * \phi) = \text{div}(\Gamma * \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad \int_{CV} \int_{\Delta t} \quad (6.1),$$

gdje je:

$\frac{\partial(\rho * \phi)}{\partial t}$	nestacionarni član
$\text{div}(\rho * \vec{w} * \phi)$	konvektivni član
$\text{div}(\Gamma * \text{grad}\phi)$	difuzijski član
S_{ϕ}	izvorni član [9].

Integracijom opće jednačbe očuvanja po kontrolnom volumenu i po vremenskom koraku Δt slijed (6.2)i:

$$\begin{aligned}
& \int_{CV} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho * \phi) * dt \right) * dV \\
& + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A \vec{n} * (\rho * \vec{w} * \phi) * dA \right) * dt \\
& = \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A \vec{n} * (\Gamma * grad\phi) * dA \right) * dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_\phi * dV * dt
\end{aligned}$$

(6.2).

Za dvodimenzijski problem jednačba (6.3) je:

$$\frac{\partial(\rho*\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho*w_x*\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho*w_y*\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma * \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma * \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + S \quad (6.3).$$

Za diskretizaciju po kontrolnom volumenu korištena je upwind diskretizacijska shema za konvektivni član i linearna diskretizacijska shema za difuzijski član. Za diskretizaciju u vremenu korištena je potpuno implicitna shema. Primjenom navedenih diskretizacijskih shema dobivena je jednačba diskretizacije koja ima oblik (6.4):

$$a_P * \phi_P = a_W * \phi_W + a_E * \phi_E + a_S * \phi_S + a_N * \phi_N + a_P^0 * \phi_P^0 + S_u \quad (6.4),$$

gdje je:

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N + a_P^0 + \Delta F - S_p$$

$$a_W = D_w + \max(F_w, 0)$$

$$a_E = D_e + \max(0, -F_e)$$

$$a_S = D_s + \max(F_s, 0)$$

$$a_N = D_n + \max(0, -F_n)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 * \Delta V}{\Delta t}$$

$$\bar{S} * \Delta V = S_u + S_p * \phi_P.$$

Pošto je strujanje u prostoriji konvekcijsko-difuzijski problem korištena je upwind diskretizacijska shema za diskretizaciju konvektivnog člana, koja za razliku od linearne sheme uzima u obzir tok strujanja fluida.

Kod upwind sheme se vrijednost Φ na granici uzima jednakom vrijednosti Φ u uzvodnom čvoru.

Da bi rezultati bili fizikalno realistični upwind shema mora zadovoljiti svojstva održivosti, ograničenosti i prenosivosti.

Da bi zadovoljili svojstvo održivosti tok svojstva Φ koji izlazi kroz jednu granicu kontrolnog volumena mora biti jednak toku koji ulazi u susjedni kontrolni volumen. Kod upwind sheme je to svojstvo zadovoljeno.

Ograničenost mora biti zadovoljena kako bi mogli riješiti sustav algebarskih jednadžbi. Da bi osigurali ograničenost potrebno je da svi koeficijenti imaju isti predznak. Drugi kriterij koji je potrebno zadovoljiti je Scarboroughov kriterij. Upwind shema zadovoljava oba kriterija.

Posljednje svojstvo koje je potrebno osigurati je svojstvo prenosivosti, odnosno mogućnost sheme da prepoznaje tok fluida. Kao što smo prije spomenuli, upwind shema osigurava i to posljednje svojstvo.

Za proračun polja tlakova i brzina izabran je SIMPLE algoritam (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

SIMPLE algoritam koristi pomaknutu mrežu za izračunati komponente brzina, odnosno skalari se računaju u čvorovima izvorne mreže, a brzine na granicama kontrolnih volumena mreže, odnosno u čvorovima pomaknute mreže.

Pomaknuta mreža se koristi jer se može desiti da utjecaj tlaka nije ispravno predstavljen u jednadžbama diskretizacije ako se brzine računaju u istim čvorovima kao i skalari.

Za rješavanje SIMPLE algoritma potrebno je pretpostaviti polje tlakova, nakon čega se rješavaju diskretizirane jednadžbe očuvanja količine gibanja preko kojih se dolazi do pretpostavljenih komponenti brzina. Sljedeći korak je rješavanje jednadžbe korekcije tlaka, koju dobijemo izvodom jednadžbe kontinuiteta, te se dobivenom korekcijom tlaka računaju točna polja tlakova i brzina, nakon čega se rješavaju ostale diskretizirane jednadžbe očuvanja. Algoritam se ponavlja na način da dobivene vrijednosti postaju pretpostavljene sve do postizanja konvergencije, odnosno dok se ne zadovolji kriterij točnosti.

Kako bi se spriječila divergencija pri rješavanju u SIMPLE algoritmu uvode se podrelaksacijski faktori koje imaju vrijednosti između 0 i 1. Podrelaksacijski faktor mora imati dovoljno veliku

vrijednost za ostvarivanje konvergencije, ali ne i preveliku kako ne bi došlo do nestabilnosti iteracijskog postupka [8].

Kriterij konvergencije zadan za jednadžbu očuvanja mase je 10^{-3} . Za jednadžbe očuvanja količine gibanja određen je kriterij konvergencije jednak 10^{-5} , dok je za jednadžbu očuvanja energije odabran kriterij konvergencije jednak 10^{-6} .

6.1. Izrada i umrežavanje domene

Zadatak je numerički riješen korištenjem računalnog programa Fluent koji koristi metodu kontrolnih volumena. Numeričko rješavanje zadatka sastoji se od tri koraka: crtanje geometrije, umrežavanje i izračun varijabli u Fluentu.

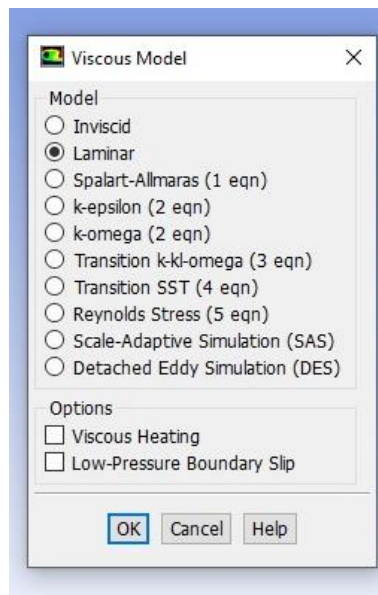
Za umrežavanje domene korištena je opcija face sizing kojom se preciznije zadaju dimenzije kontrolnih volumena na željenu površinu, koja je u ovom slučaju bila kompletna domena. Domena je podijeljena na kontrolne volumene dimenzija 5x5 mm. Mreža ima 368706 kontrolnih volumena te je ona kvadratna.

7. REZULTATI

Provedena je serija numeričkih proračuna za tri prethodno opisana slučaja.

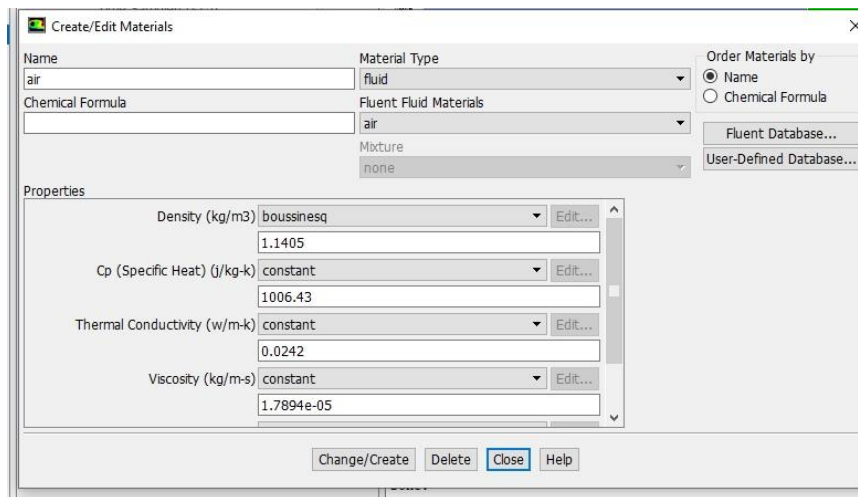
Zbog velikog broja kontrolnih volumena te kako bi se ubrzao proces proračuna korištena je radna stanica na Tehničkom fakultetu u Rijeci koja omogućuje korištenje 8 procesora istovremeno što uvelike smanjuje vrijeme proračuna. Za odrađivanje jedne simulacije bilo je potrebno između 36 i 48 sati. Karakteristična vremena koja su prikazana na slikama za sve simulacije su 5, 10, 15, 20, 25 i 30 minuta.

Za simulaciju slobodne konvekcija odabran je laminarni model.



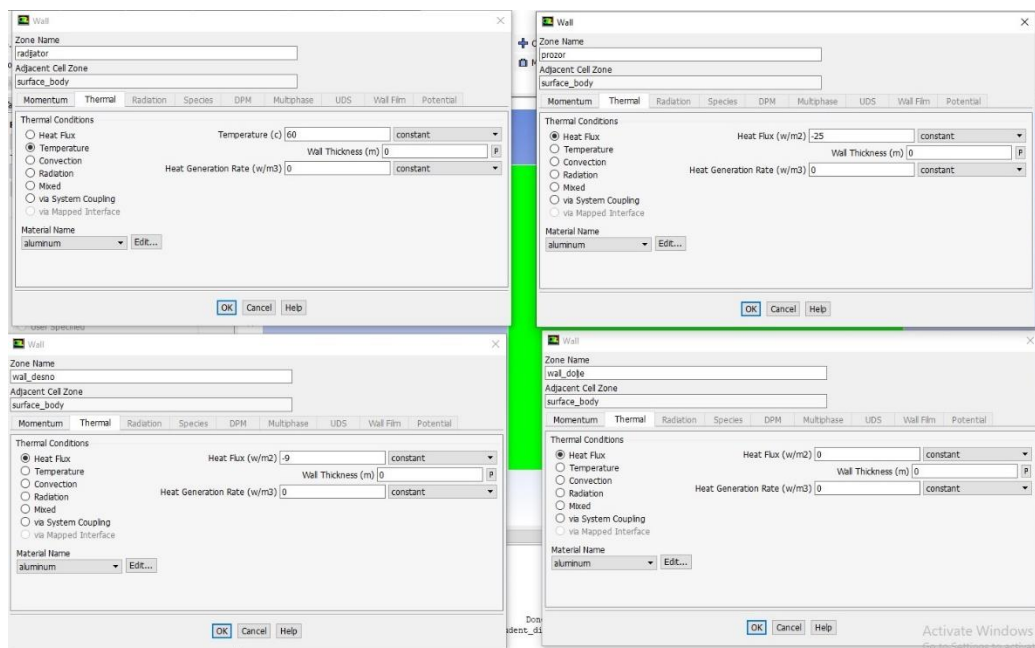
Slika 7.1 Odabir modela strujanja

Za izračunati utjecaj slobodne konvekcije na strujanje zraka potrebno je uvesti Bussinesquevu konstantnu za gustoću zraka koja je jednaka $1,1405 \text{ kg/m}^3$.



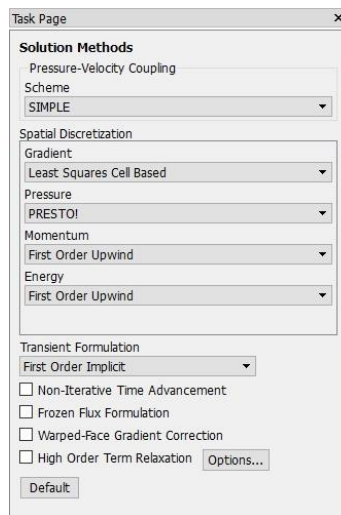
Slika 7.2 Zadavanje svojstva zraka

Nakon zadavanja svojstva zraka uneseni su rubni uvjeti opisani u prijašnjim poglavljima, kao što je prikazano na slici 7.3.



Slika 7.3 Zadavanje rubnih uvjeta

Sljedeći korak je odabir diskretizacijskih shema te odabir algoritma za rješavanje polja tlakova i brzina, što je prikazano na slici 7.4.



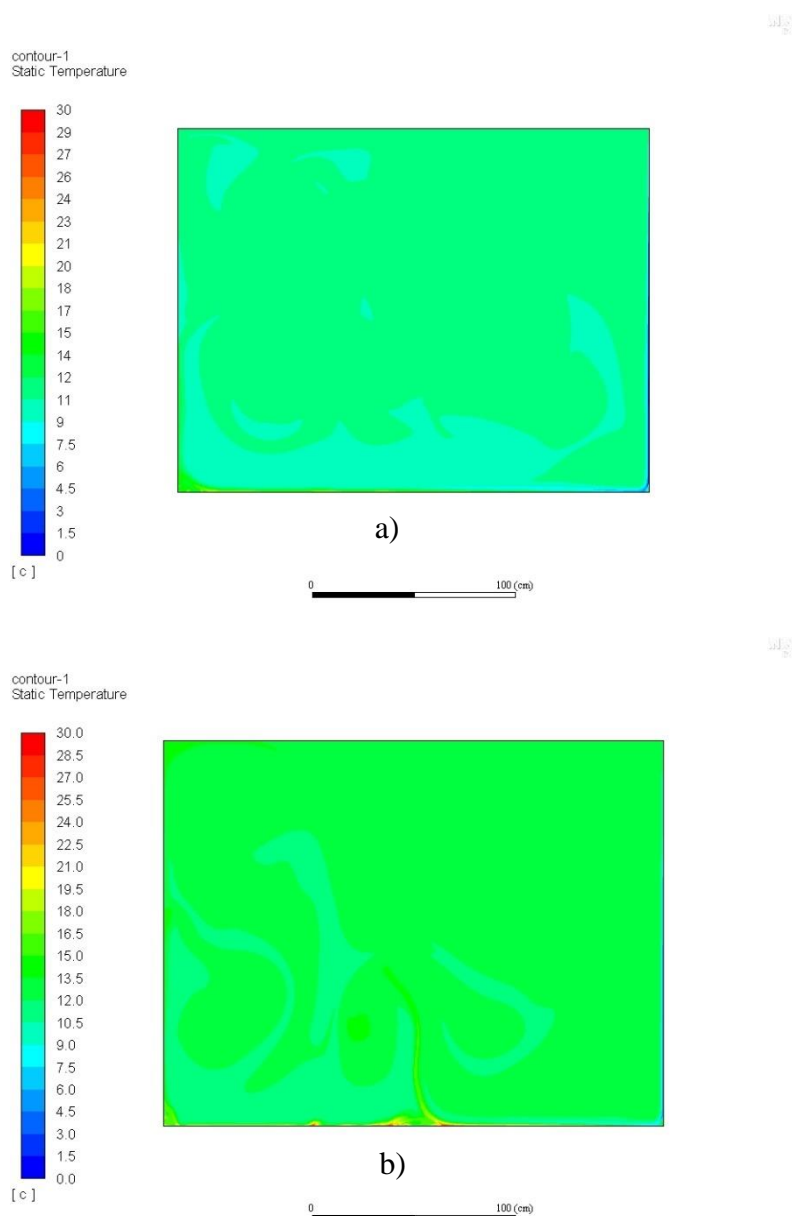
Slika 7.4 Odabir discretizacijskih shema

Na kraju se odabiru kriteriji konvergencije, podrelaksacijski faktori koji utječu na brzinu konvergencije, odnosno na broj iteracija kojih je potrebno da bi se dostigli kriteriji konvergencije, trajanje vremenskih koraka te broj vremenskih koraka. Trajanje vremenskog koraka je 0,1 s.

Na sljedećim slikama prikazani su rezultati i usporedbe tih simulacija.

7.1. Raspodjela temperatura i vektora brzina za različite slučajeve grijanja

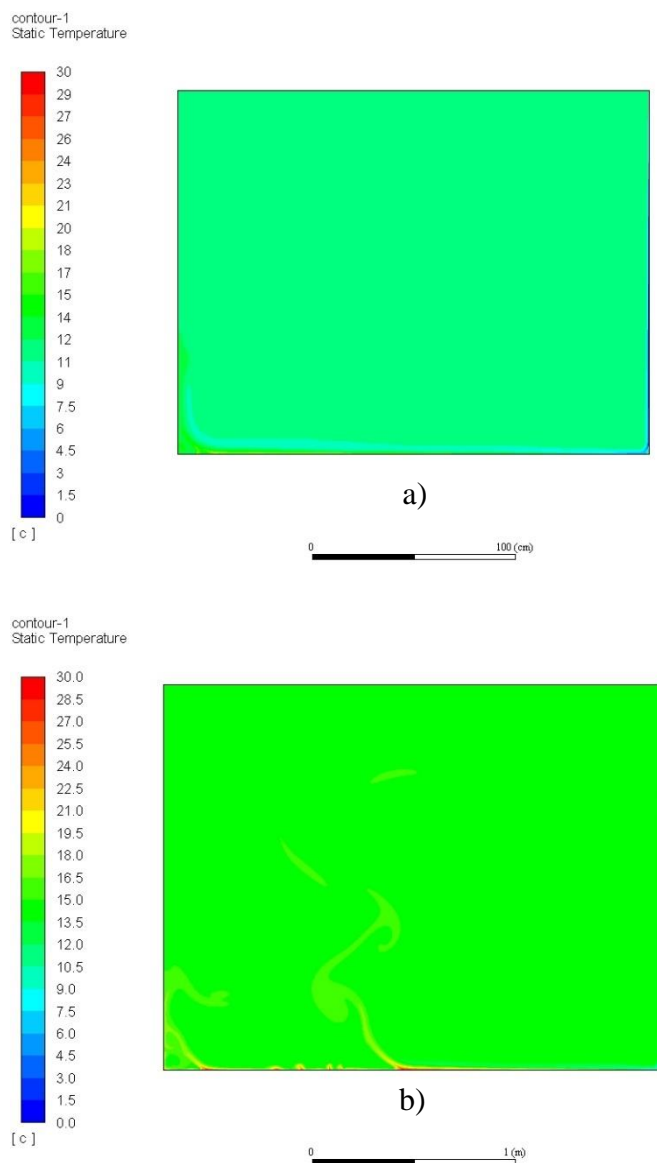
Na sljedećoj slici prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 5 minuta grijanja.



Slika 7.5 Raspodjela temperatura nakon 5 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

Iz slike 7.5 vidljivo je da je prosječna temperatura slučaja 2 viša od temperature slučaja 1, što je i logično s obzirom na temperature poda. Može se primijetiti da su najniže temperature u oba slučaja uz sam rub desnog zida. Temperature na vrhu su više nego temperature na dnu, zbog toga što su toplije čestice lakše od hladnijih te struje prema gore, dok se hladnije čestice spuštaju.

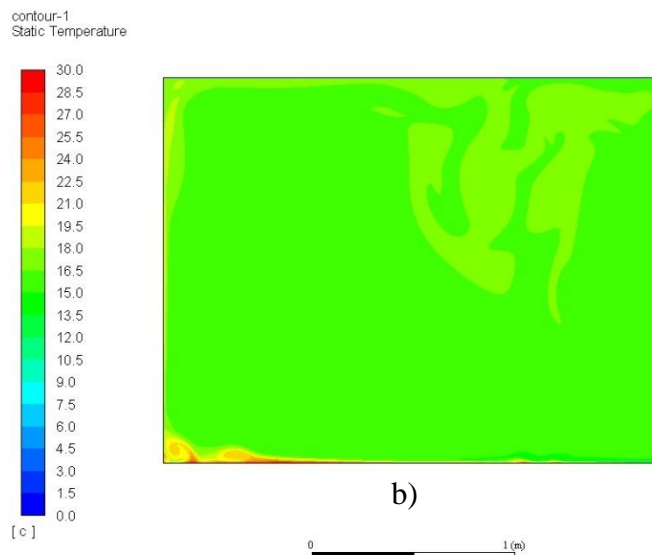
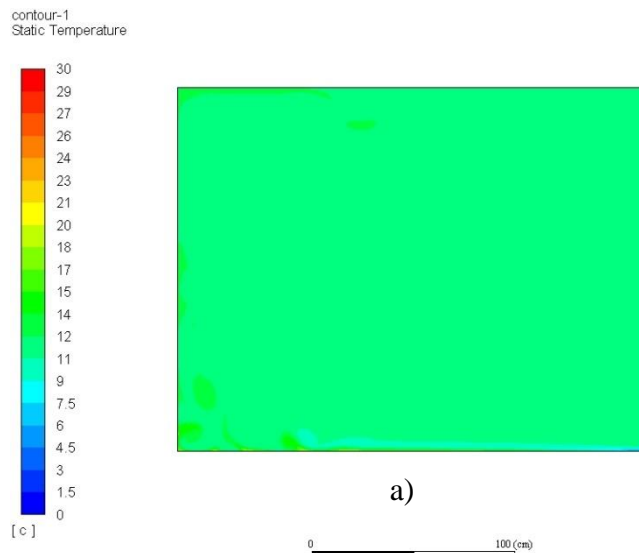
Na slici 7.6 prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 10 minuta grijanja.



Slika 7.6 Raspodjela temperatura nakon 10 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

U odnosu na sliku 7.5 vidljivo je da su temperature nakon 10 minuta grijanja ujednačenije za oba slučaja. Temperature su više za slučaj 2 u odnosu na slučaj 1 što je i logično.

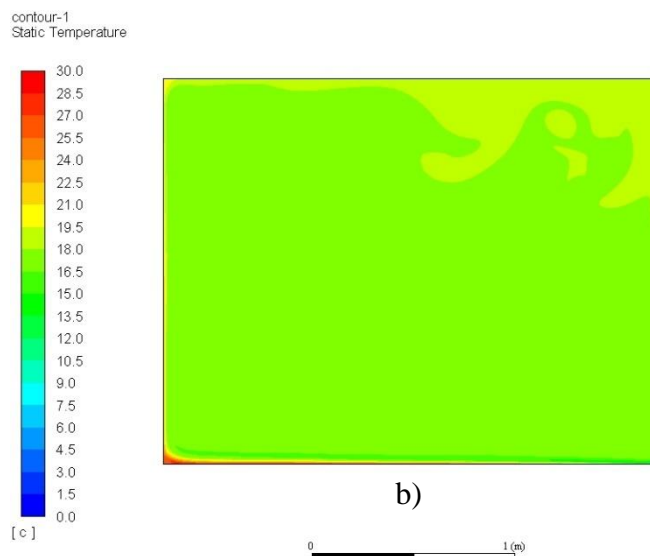
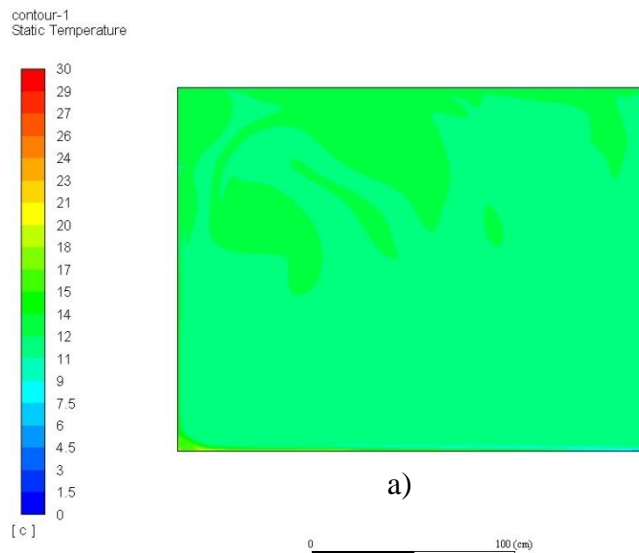
Na slici 7.7 prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 15 minuta grijanja.



Slika 7.7 Raspodjela temperatura nakon 15 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

Kao i u prijašnjim vremenskim intervalima temperatura zraka slučaja 2 je viša od temperature zraka slučaja 1. Vidljivo je da je temperatura zraka ujednačenija za slučaj 1 u odnosu na slučaj 2.

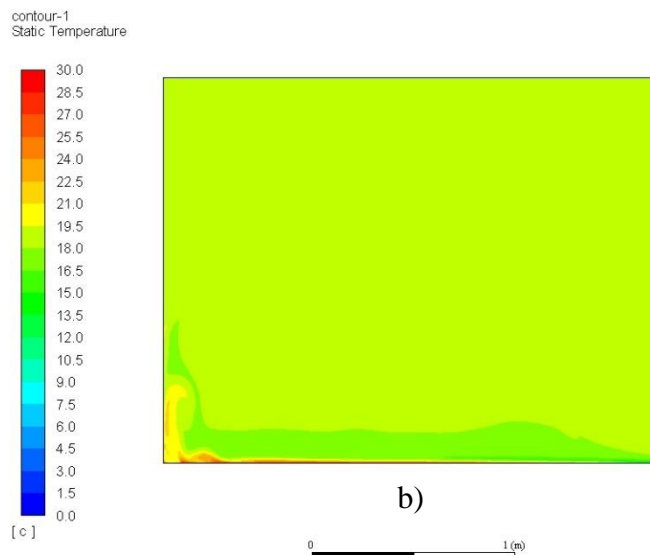
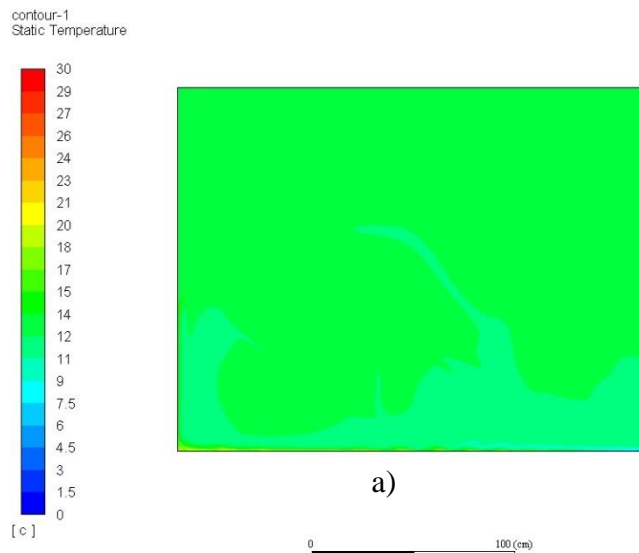
Na slici 7.8 prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 20 minuta grijanja.



Slika 7.8 Raspodjela temperatura nakon 20 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

Na slici 7.8 vidljiva je viša temperatura na vrhu prostorije te niža temperatura na dnu. Temperature zraka u slučaju 1 ne prelaze 17 °C, dok u slučaju 2 temperature zraka dostižu 20 °C. Sa slike je primjetno da su temperature više uz lijevi zid, a niže uz desni zid i prozor.

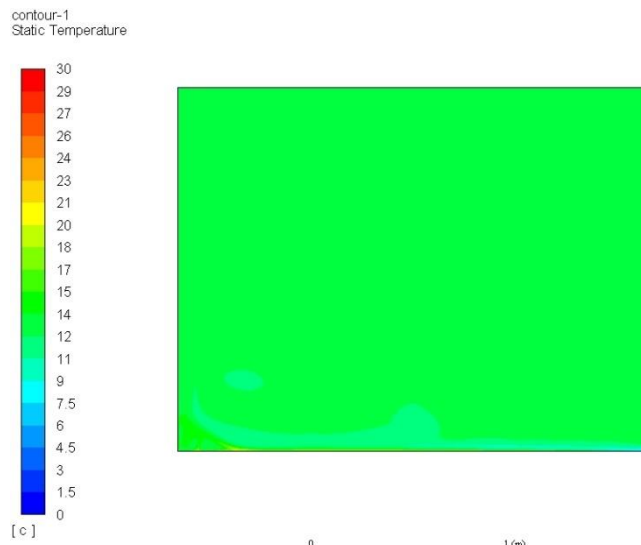
Na slici 7.9 prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 25 minuta grijanja.



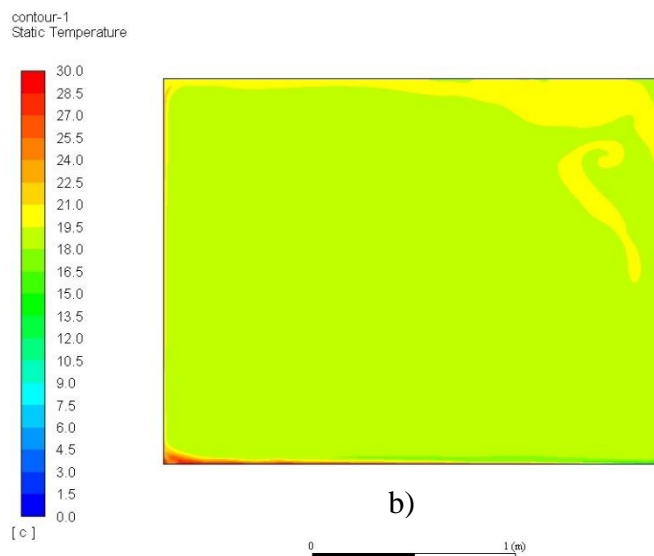
Slika 7.9 Raspodjela temperatura nakon 25 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

Na slici 7.9 vidljiv je porast temperature u odnosu na prijašnje vremenske intervale. U slučaju 2 temperature su ujednačenije i više u odnosu na slučaj 1. U oba slučaja najniže temperature pojavljuju se na rubu desnog zida, dok su najviše temperature na samome podu, što je logično.

Na slici 7.10 prikazane su usporedbe za slučajeve podnog grijanja pri temperaturi od 20 °C poda (slučaj 1) te 30 °C poda (slučaj 2) nakon 30 minuta grijanja.



a)

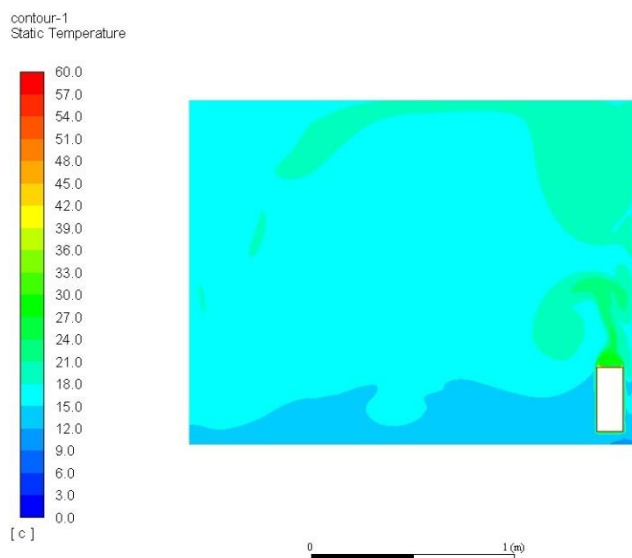


b)

Slika 7.10 Raspodjela temperatura nakon 30 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)

Kao što se moglo pretpostaviti najviše temperature postižu se nakon 30 minuta grijanja prostorije.

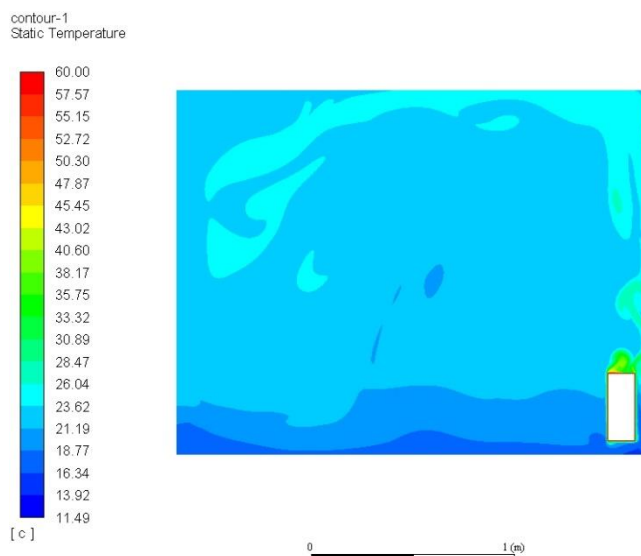
Na slici 7.11 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 5 minuta grijanja.



Slika 7.11 Raspodjela temperatura nakon 5 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

Na slici 7.11 vidljive su velike fluktuacije temperature zraka, pogotovo je vidljiva velika razlika između visine glave i visine nogu što smanjuje ugodnost u prostoriji.

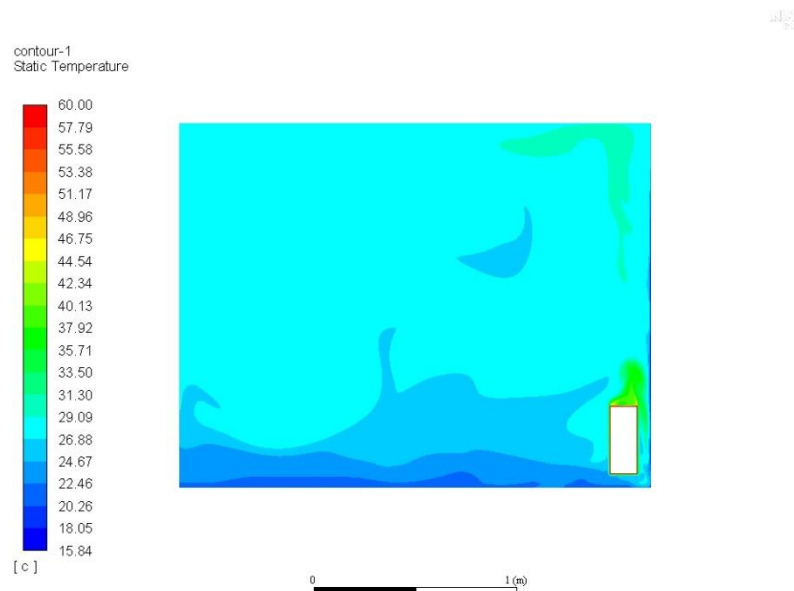
Na slici 7.12 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 10 minuta grijanja.



Slika 7.12 Raspodjela temperatura nakon 10 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

Na slici 7.12 vidljiva je puno ujednačenija temperatura zraka u odnosu na sliku 7.11. Najviše temperature nalaze se iznad radijatora, a najniže na rubu poda.

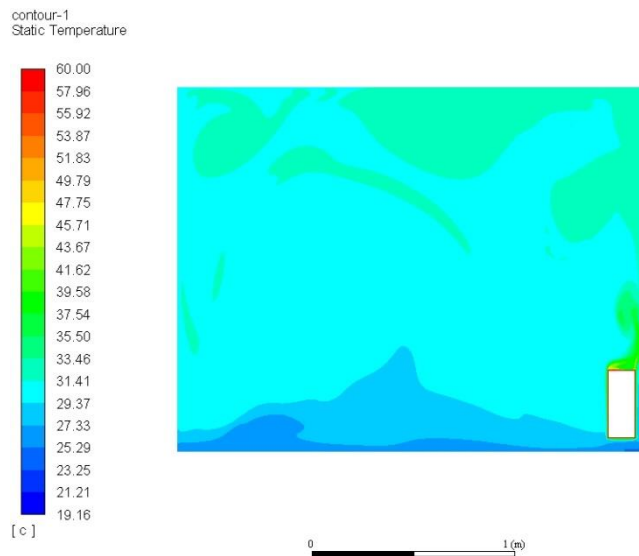
Na slici 7.13 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 15 minuta grijanja.



Slika 7.13 Raspodjela temperatura nakon 15 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

Temperature zraka nisu više ujednačene kao što su bile nakon 10 minuta grijanja. Vidljiva je razlika temperatura između dna prostorije i vrha prostorije.

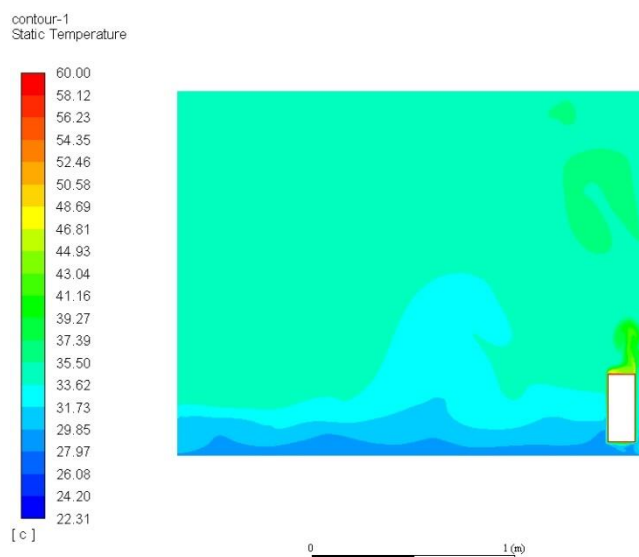
Na slici 7.14 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 20 minuta grijanja.



Slika 7.14 Raspodjela temperatura nakon 20 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

Nakon 20 minuta temperatura zraka u većini prostorije podiže se na 30 °C. Najviše temperature postižu se iznad radijatora.

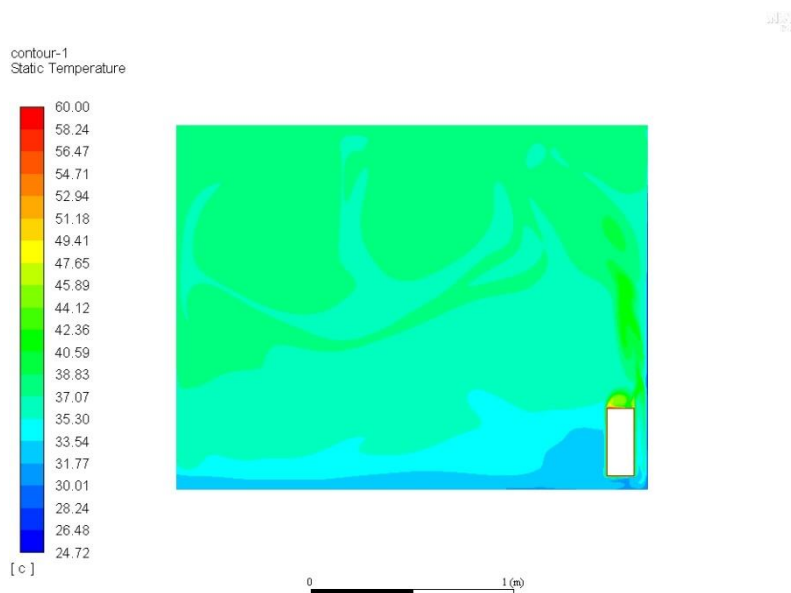
Na slici 7.15 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 25 minuta grijanja.



Slika 7.15 Raspodjela temperatura nakon 25 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

Primjetan je porast temperature zraka u odnosu na prijašnji vremenski interval; osim porasta temperature, vidljivo je i da je temperatura ujednačenija u odnosu na prijašnji vremenski interval.

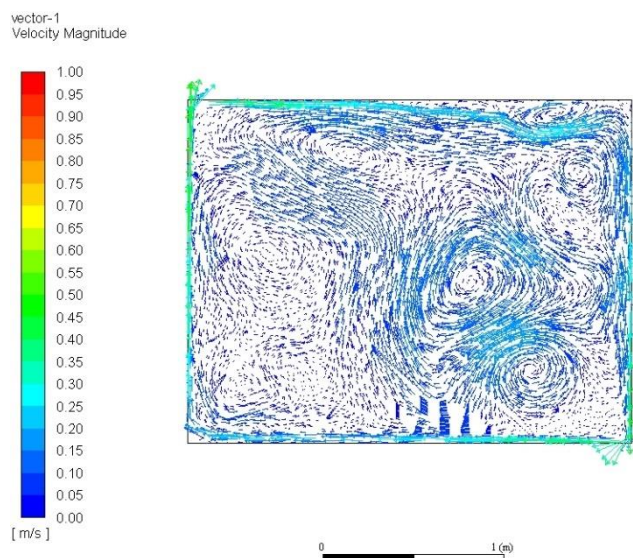
Na slici 7.16 prikazane je raspodjela temperatura za treći slučaj, odnosno za slučaj grijanja pomoću radijatora pri temperaturi od 60 °C nakon 30 minuta grijanja.



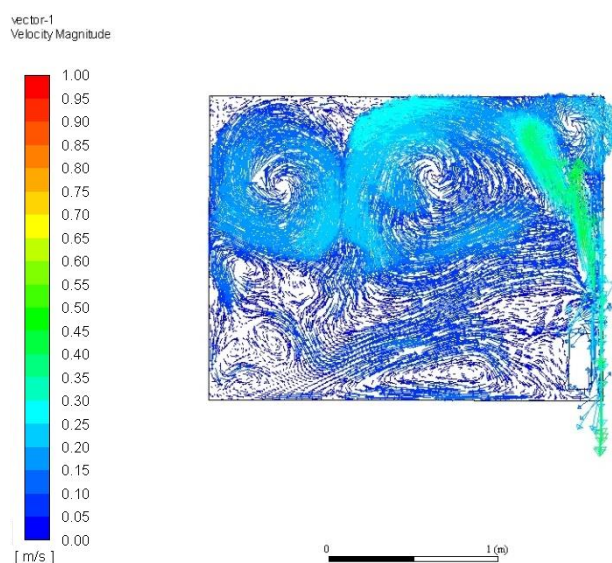
Slika 7.16 Raspodjela temperatura nakon 30 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)

U zadnjem vremenskom intervalu nije primjetan veći porast temperature. Najviše temperature se nalaze iznad samog radijatora, dok su najniže temperature na razini poda.

Na slikama 7.17 i 7.18 nalazi se raspodjela vektora brzina za podno grijanje i radiator koji se nalazi ispod prozora.



Slika 7.17 Raspodjela vektora brzina za slučaj 2 nakon 30 minuta



Slika 7.18 Raspodjela vektora brzina za slučaj 3 nakon 30 minuta

Iz slika 7.17 i 7.18 vidljivo je da brzine strujanja zraka ne prelaze 0,7 m/s, što je očekivano za strujanje koje se stvara isključivo slobodnom konvekcijom. Glavno strujanje zraka ide u smjeru kazaljke na satu zbog toga što desni zid nije toplinski izolirana, dok kroz lijevi zid ne prolazi

nikakv toplinski tok. Kod slučaja 3 vidljivo je da se najviše brzine postižu između ogrjevnog tijela i desnog zida.

7.2. Vremenske promjene temperature zraka u karakterističnim točkama prostorije

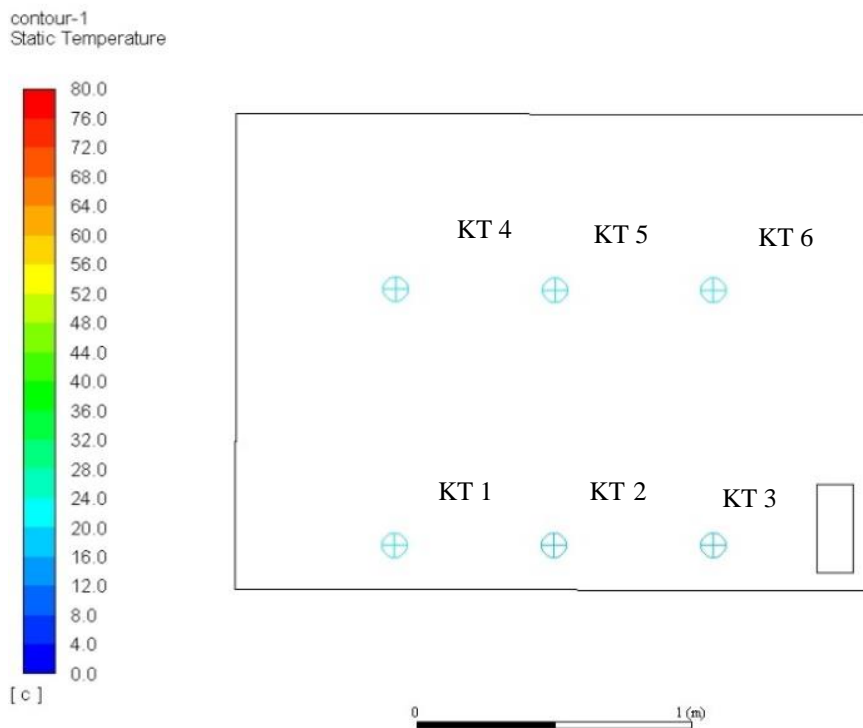
Na sljedećim su slikama prikazane temperature različitih točaka u prostoru za različite vremenske intervale i različite temperature ogrjevnog tijela.

U svrhu praćenja raspodjele temperature u karakterističnim točkama analizirane su vremenske promjene temperature u šest točaka. Točke su postavljene u dva sloja, jedan na visini nogu, drugi na visini glave, na visini od 170 cm

Kontrolne točke imaju sljedeće koordinate:

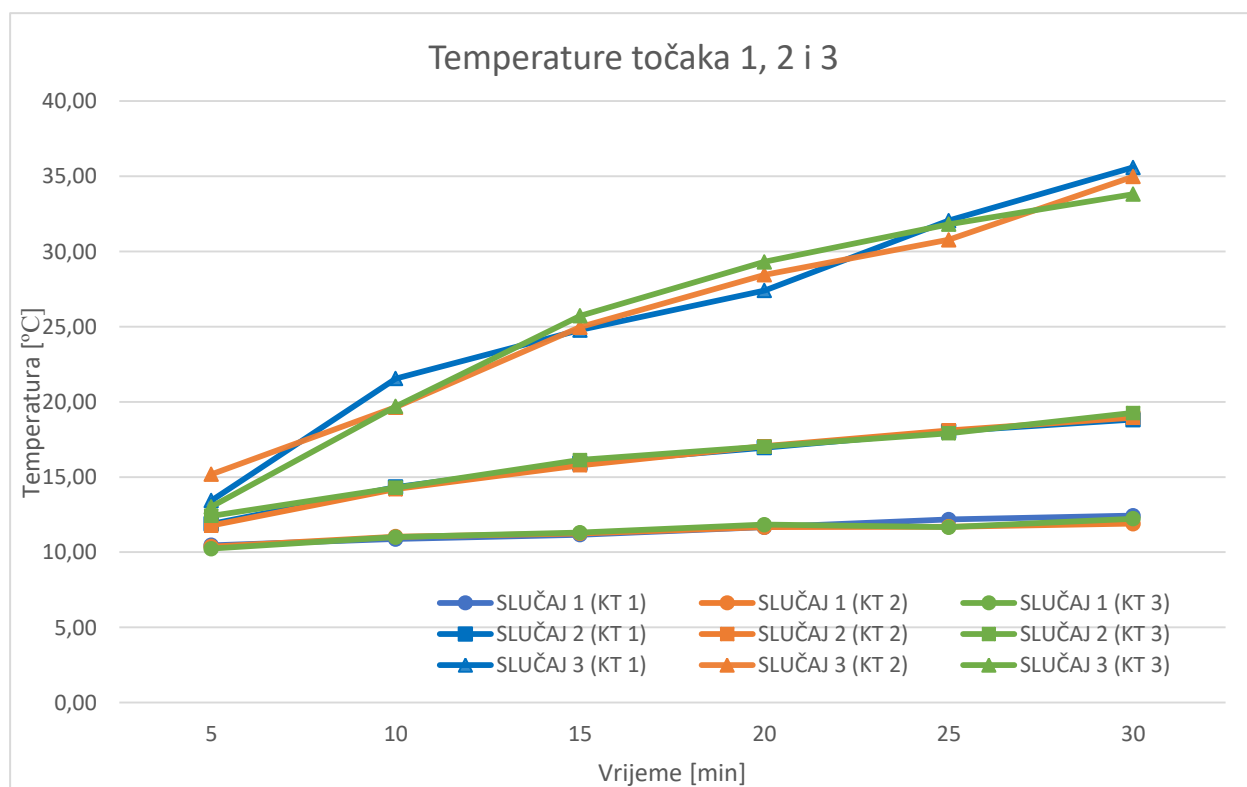
- $x=0,875$ m, $y=0,25$ m (KT 1)
- $x=1,75$ m, $y=0,25$ m (KT 2)
- $x=2,625$ m, $y=0,25$ m (KT 3)
- $x=0,875$ m, $y=1,7$ m (KT 4)
- $x=1,75$ m, $y=1,7$ m (KT 5)
- $x=2,625$ m, $y=1,7$ m (KT 6).

Na slici 7.19 prikazan je položaj kontrolnih točaka.



Slika 7.19 Položaj točaka u prostoru

Na slici 7.20 prikazane su promjene temperatura točaka 1, 2 i 3 na visini nogu za sva tri slučaja.



Slika 7.20 Promjene temperatura točaka 1, 2 i 3

Iz slike 7.20 vidljivo je da nema većih razlika temperatura za točke 1,2 i 3 za iste vremenske intervale te iste slučajeve. Najveća razlika temperatura između prvog i zadnjeg vremenskog intervala dobiva se kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje), dok najmanja kod slučaja 1 (podno grijanje na 20 °C).

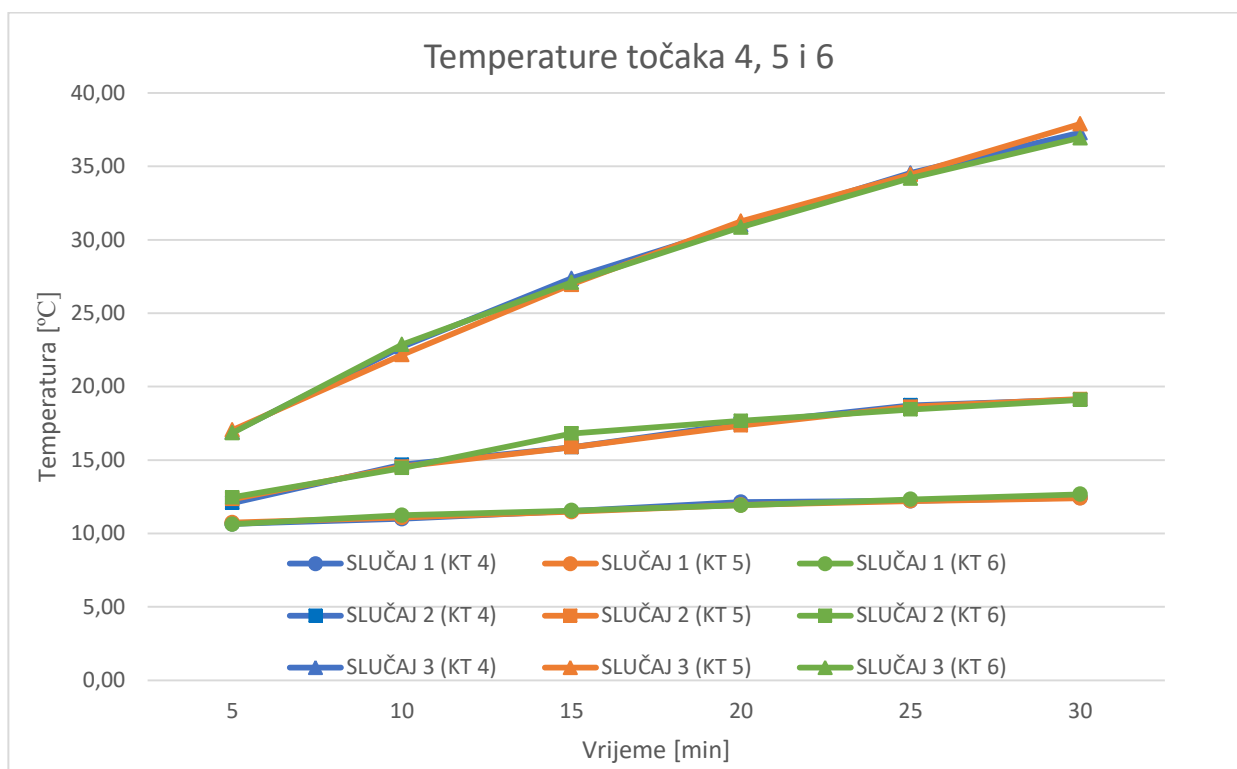
U tablici 7.1 prikazane su temperature u kontrolnim točkama 1, 2 i 3 za sve slučajeve i u vremenskim intervalima za 5, 10, 15, 20, 25 te 30 minuta.

Tablica 7.1 Promjene temperatura točaka 1, 2 i 3

Vrijeme [min]	Slučaj 1: Podno grijanje 20 °C			Slučaj 2: Podno grijanje 30 °C			Slučaj 3: Radijator 60 °C		
	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]
5	10,46	10,38	10,23	11,89	11,77	12,43	13,44	15,19	13,03
10	10,88	11,04	11,01	14,34	14,20	14,29	21,55	19,65	19,70
15	11,16	11,25	11,31	15,92	15,78	16,14	24,78	24,97	25,72
20	11,67	11,66	11,84	16,95	17,05	17,03	27,41	28,44	29,31
25	12,17	11,70	11,67	18,04	18,10	17,91	32,06	30,77	31,80
30	12,43	11,89	12,23	18,82	18,94	19,26	35,59	34,98	33,81

Najviša temperatura postiže se za slučaj 3 u kontrolnoj točki 1 nakon 30 minuta grijanja. Primjetno je da se nakon 5 minuta radijatorskog grijanja (slučaj 3) postižu veće temperature nego nakon 30 minuta podnog grijanja (slučaji 1 i 2). Dodatno se može uočiti da su razlike temperatura veće između slučaja 2 i 3, nego između slučaja 1 i 2.

Na slici 7.21 prikazane su promjene temperatura točaka 4,5 i 6 na visini glave za sva tri slučaja.



Slika 7.21 Promjene temperatura točaka 4, 5 i 6

Kao i kod kontrolnih točaka 1, 2 i 3, kod kontrolnih točaka 4, 5 i 6 nema većih razlika temperatura za iste vremenske intervale te iste slučajeve. Najveća razlika temperatura između prvog i zadnjeg vremenskog intervala dobiva se kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje), dok najmanja kod slučaja 1 (podno grijanje na 20 °C).

U tablici 7.2 prikazane su temperature u kontrolnim točkama 4, 5 i 6 za sve slučajeve i u vremenskim intervalima za 5, 10, 15, 20, 25 te 30 minuta.

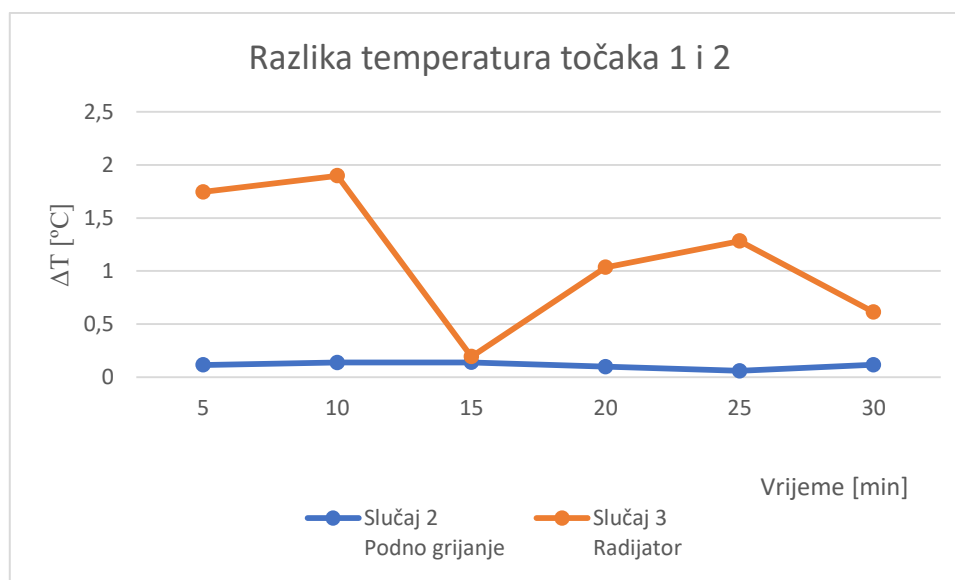
Tablica 7.2 Promjene temperatura točaka 4, 5 i 6

Vrijeme [min]	Slučaj 1: Podno grijanje 20 °C			Slučaj 2: Podno grijanje 30 °C			Slučaj 3: Radijator 60 °C		
	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]	KT 1 [T]	KT 2 [T]	KT 3 [T]
5	10,65	10,73	10,63	12,08	12,34	12,46	16,90	17,05	16,85
10	11,00	11,08	11,24	14,68	14,55	14,45	22,70	22,17	22,87
15	11,52	11,47	11,55	15,87	15,88	16,81	27,38	26,96	27,10
20	12,14	11,94	11,91	17,47	17,36	17,67	31,02	31,26	30,86
25	12,22	12,21	12,32	18,73	18,62	18,44	34,55	34,44	34,19
30	12,44	12,41	12,67	19,11	19,15	19,09	37,29	37,89	36,94

Najviša temperatura postiže se za slučaj 3 (radijatorsko grijanje) u kontrolnoj točki 2 nakon 30 minuta grijanja. Primjetno je da se nakon 5 minuta radijatorskog grijanja (slučaj 3) postižu veće temperature nego nakon 30 minuta podnog grijanja (slučaji 1 i 2). Dodatno se može uočiti da su razlike temperatura veće između slučaja 2 (podno grijanje na 30 °C) i 3 (radijatorsko grijanje), nego između slučaja 1 (podno grijanje na 20 °C) i 2 (podno grijanje na 30 °C).

7.3. Prikaz ujednačenosti temperatura u prostoru

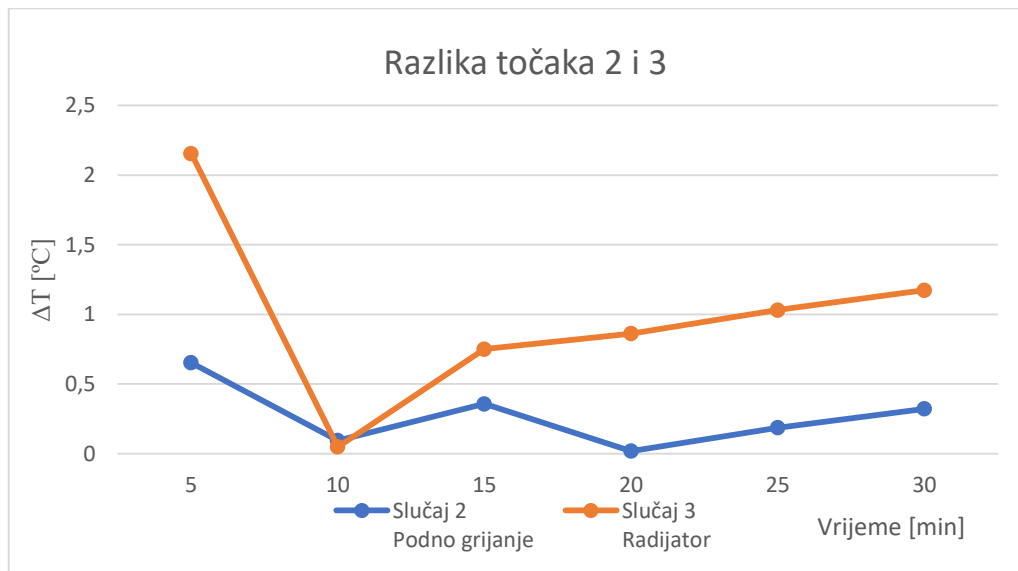
U svrhu analize jednoličnosti raspodjele temperature na slikama su prikazane razlike temperatura za različite točke u prostoru, odnosno prikazana je ujednačenost temperature u prostoru. Na slici 7.22 prikazana je razlika temperatura između kontrolne točke 1 i kontrolne točke 2 za slučaj 2 i slučaj 3.



Slika 7.22 Razlika temperatura između točaka KT 1 i KT 2 za slučaj 2 i 3

Temperature su općenito ujednačenije za slučaj 2 (podno grijanje na 30 °C) u odnosu na slučaj 3 (radijatorsko grijanje); osim za slučaj nakon 15 minuta grijanja prostorije, gdje je razlika temperatura između kontrolne točke 1 i kontrolne točke 2 približno jednaka za oba slučaja. Najveća razlika temperature zraka između točke 1 i točke 2 je nakon 10 minuta grijanja.

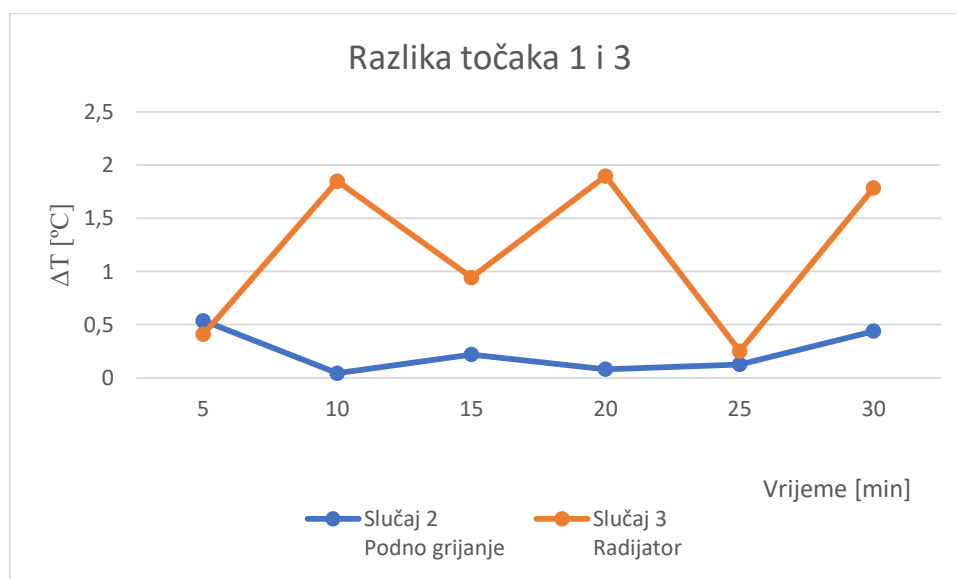
Na slici 7.23 prikazana je razlika temperatura između kontrolne točke 2 i kontrolne točke 3 za slučaj 2 (podno grijanje na 30 °C) i slučaj 3 (radijatorsko grijanje).



Slika 7.23 Razlika temperatura između točaka KT 2 i KT 3 za slučaj 2 i 3

Pri usporedbi slučaja 2 (podno grijanje na 30 °C) i slučaja 3 (radijatorsko grijanje) vidljivo je da su temperature ujednačenije kod slučaja 2 (podno grijanje na 30 °C), osim nakon 10 minuta grijanja, gdje je razlika temperatura približno jednaka. Temperature zraka su najneujednačenije nakon prvih 5 minuta grijanja prostorije kod oba načina grijanja.

Na slici 7.24 prikazana je razlika temperatura između kontrolne točke 1 i kontrolne točke 3 za slučaj 2 (podno grijanje na 30 °C) i slučaj 3 (radijatorsko grijanje).



Slika 7.24 Razlika temperatura između točaka KT 1 i KT 3 za slučaj 2 i 3

Razlike temperatura kod slučaja 2 (podno grijanje na 30 °C) ostaju približno jednake kroz vrijeme, dok kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje) imamo veće fluktuacije. Nakon prvog vremenskog intervala od 5 minuta razlike temperature su približno jednake za slučaj 2 (podno grijanje na 30 °C) i slučaj 3 (radijatorsko grijanje). U kasnijim vremenskim intervalima razlika temperature zraka kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje) raste, dok je kod slučaja 2 (podno grijanje na 30 °C) razlika temperature zraka uvijek ispod 0,6 °C.

Podno grijanje (slučajevi 1 i 2) ostvaruju ujednačeniju raspodjelu temperatura, a time bolje uvjete za postizanje toplinske ugodnosti.

7.4. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

U sljedećoj tablici prikazani su koeficijenti prijelaza topline konvekcijom za slučaj 2 podnog grijanja i slučaj 3 radijatorskog grijanja nakon 30 minuta.

Tablica 7.3. Koeficijenti prijelaza topline nakon 30 minuta

Podno grijanje - 30 °C – Slučaj 2	1,81 W/m ² K
Radijator ispod prozora - 60 °C – Slučaj 3	4,49 W/m ² K

Slučaj 3 ima veći koeficijent prijelaza topline konvekcijom u odnosu na slučaj 2. Pošto je logično da slučaj 3 ima veću razliku temperature u odnosu na slučaj 2, može se zaključiti da je koeficijent prijelaza topline konvekcijom veći zato što je veća gustoća toplinskog toka slučaja 3 u odnosu na slučaj 2.

8. ZAKLJUČAK

U radu bilo je potrebno analizirati izmjenu topline konvekcijom korištenjem softvera Ansys Fluent. Analizirana su tri slučaja. Kod svih slučajeva su gornji i lijevi zid te strop toplinski izolirani, dok na desnom zidu prolazi toplinski tok od 9 W/m^2 , na tom zidu dodatno se nalazi prozor kroz koji prolazi toplinski tok od 25 W/m^2 .

Prvi i drugi slučaj odnose se na podno grijanje, s time da prvi slučaj ima temperaturu poda od $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a drugi slučaj ima temperaturu poda jednaku $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Treći slučaj odnosi se na radijatorsko grijanje s temperaturom radijatora od $60 \text{ }^\circ\text{C}$ i izoliranim podom.

Iz simulacija se može zaključiti da se najviše temperature postižu kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje), dok se najniže temperature postižu za slučaj 1 (podno grijanje na $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Zbog manje razlike između početne temperature prostorije i temperature ogrjevnog tijela, temperature su ujednačenije za slučajeve sa podnim grijanjem u odnosu na slučaj sa radijatorskim grijanjem.

Iz slika 7.17 i 7.18 vidljivo je da je smjer strujanja zraka u smjeru kazaljke na satu, zbog toga što se neizolirani zid nalazi s desne strane te kod slučaja 3 (radijatorsko grijanje) zbog toga što se radijator nalazi ispod prozora.

Zaključno, koeficijent prijelaza topline konvekcijom je veći kod radijatorskog grijanja nego kod podnog grijanja zbog toga što je gustoća toplinskog toka veća.

9. POPIS LITERATURE

- [1] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/termodinamika_prijenos_topline.pdf, s Interneta, 20.05.2024.
- [2] Bošnjaković, F.: „Nauka o toplini“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1947.
- [3] Lenić K., Trp A.: Predavanja iz kolegija „Termodinamika II“ na Tehničkom fakultetu u Rijeci
- [4] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=laminarno+strujanje> , s Interneta, 20.05.2024.
- [5] Andreić, Ž.: „Temelji Mehanike Fluida“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [6] Wolf I.: Predavanja iz kolegija „Tehnika klimatizacije i automatska regulacija“ na Tehničkom fakultetu u Rijeci
- [7] https://www.researchgate.net/figure/PMV-PPD-correlation_fig2_263680649, s Interneta, 20.05.2024.
- [8] Malalasekera W, Versteeg H. K.:“An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method“, Longman Scientific and Technical, New York, 1995.
- [9] Lenić K., Trp A.: Predavanja iz kolegija „Numeričko modeliranje u termodinamici“ na Tehničkom fakultetu u Rijeci

10. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Raspodjela temperature kod provođenja topline kroz ravnu stijenku sastavljenu od više različitih slojeva	3
Slika 2.2 Shematski prikaz gibanja čestica kod laminarnog i turbulentnog strujanja [4]	4
Slika 2.3 Raspodjela temperature kod prolaza topline	7
Slika 2.4 Izmijenjeni toplinski tok zračenjem između dvije usporedne stijenke	11
Slika 2.5 Izmijenjena energija zračenjem obuhvaćenog tijela	12
Slika 2.6 Primjer istovremene izmjene topline konvekcijom i zračenjem	14
Slika 3.1 Prikaz korelacije između PPD i PMV indeksa [7]	17
Slika 4.1 Fizikalni proces izmjene topline u prostoriji s podnim grijanjem za slučaj 1 i slučaj 2	18
Slika 4.2 Fizikalni proces izmjene topline u prostoriji s radijatorom za slučaj 3	19
Slika 5.1 Domena za slučaj 1 i slučaj 2	21
Slika 5.2 Domena za slučaj 3	22
Slika 6.1 Kontrolni volumen i čvorovi dvodimenzijske mreže	26
Slika 7.1 Odabir modela strujanja	30
Slika 7.2 Zadavanje svojstva zraka	31
Slika 7.3 Zadavanje rubnih uvjeta	31
Slika 7.4 Odabir discretizacijskih shema	32
Slika 7.5 Raspodjela temperatura nakon 5 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	33
Slika 7.6 Raspodjela temperatura nakon 10 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	34
Slika 7.7 Raspodjela temperatura nakon 15 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	35
Slika 7.8 Raspodjela temperatura nakon 20 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	36
Slika 7.9 Raspodjela temperatura nakon 25 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	37
Slika 7.10 Raspodjela temperatura nakon 30 minuta za a) slučaj 1 (podno grijanje temperature poda od 20 °C) i b) slučaj 2 (podno grijanje temperature poda od 30 °C)	38
Slika 7.11 Raspodjela temperatura nakon 5 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)	39
Slika 7.12 Raspodjela temperatura nakon 10 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)	39
Slika 7.13 Raspodjela temperatura nakon 15 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)	40
Slika 7.14 Raspodjela temperatura nakon 20 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)	41

Slika 7.15 Raspodjela temperatura nakon 25 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)....	41
Slika 7.16 Raspodjela temperatura nakon 30 minuta za slučaj 3 (radijator temperature 60°C)....	42
Slika 7.17 Raspodjela vektora brzina za slučaj 2 nakon 30 minuta	43
Slika 7.18 Raspodjela vektora brzina za slučaj 3 nakon 30 minuta	43
Slika 7.19 Položaj točaka u prostoru.....	45
Slika 7.20 Promjene temperatura točaka 1, 2 i 3.....	45
Slika 7.21 Promjene temperatura točaka 4, 5 i 6.....	47
Slika 7.22 Razlika temperatura između točaka KT 1 i KT 2 za slučaj 2 i 3.....	48
Slika 7.23 Razlika temperatura između točaka KT 2 i KT 3 za slučaj 2 i 3.....	49
Slika 7.24 Razlika temperatura između točaka KT 1 i KT 3 za slučaj 2 i 3.....	49

11.POPIS TABLICA

Tablica 7.1 Promjene temperatura točaka 1, 2 i 3	46
Tablica 7.2 Promjene temperatura točaka 4, 5 i 6	47
Tablica 7.3. Koeficijenti prijelaza topline nakon 30 minuta	50

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U radu je provedena numerička analiza raspodjela temperatura zraka u grijanom prostoru. Definiran je matematički model te rubni i početni uvjeti. Kao rubni uvjet zadaje se toplinski tok na zidovima i prozoru, dok se temperatura zadaje ogrjevnom tijelu. Za rješavanje matematičkog modela izabrana je metoda kontrolnih volumena te je rad numerički riješen.

Pomoću softvera Ansys Fluent analizirana su tri različita slučaja slobodne konvekcije između ogrjevnog tijela i zraka u jednoj prostoriji. Kod prva dva slučaja ogrjevno tijelo je podno grijanje, dok je za treći slučaj ogrjevno tijelo radijator ili električna grijalica. Rezultati su prikazani kao polja temperatura i polja vektora brzina. Također dane su tablične vrijednosti temperatura u karakterističnim točkama kao i vrijednosti koeficijenata prijelaza topline konvekcijom.

Najviše temperature postižu se za radijatorsko grijanje, a najniže za podno grijanje na 20 °C. Zrak struji u smjeru kazaljke na satu, a raspodjela temperatura je ujednačenija za slučajeve s podnim grijanjem u odnosu na slučaj s radijatorskim grijanjem.

Ključne riječi: izmjena topline, numeričko rješavanje, metoda kontrolnih volumena, slobodna konvekcija

ABSTRACT AND KEY WORDS

The paper presents a numerical analysis of air temperature distribution in a heated space. A mathematical model, as well as boundary and initial conditions, were defined. Heat flux on the walls and window is set as a boundary condition, while the temperature is assigned to the heating element. The control volume method was chosen for solving the mathematical model, and the problem was solved numerically.

Using the Ansys Fluent software, three different cases of free convection between the heating element and the air in a room were analyzed. In the first two cases, the heating element is underfloor heating, while in the third case, the heating element is a radiator or an electric heater. The results are presented as temperature fields and velocity vector fields. Additionally, tabulated values of temperatures at characteristic points and values of convection heat transfer coefficients are provided.

The highest temperatures are achieved with radiator heating, and the lowest with underfloor heating set to 20 °C. Air flows in a clockwise direction, and the temperature distribution is more uniform in the cases with underfloor heating compared to the case with radiator heating.

Key words: heat transfer, numerical solving, finite control volume method, free convection