



UDK: 631.1.017.1

## NUMERIČKO PREDVIĐANJE STRUJNOG POLJA PRI PRIDODNOJ VENTILACIJI STOČARSKIH OBJEKATA

Goran Topisirović, Olivera Ećim-Đurić

*Poljoprivredni fakultet - Beograd*

**Sadržaj:** U radu je dat metod predviđanja trodimenzionalnog strujnog polja u stočarskim objektima primenom numeričkih simulacija i kompjuterske dinamike fluida - CFD. Ispitivanje strujnog polja sprovodi se na osnovu analize svih relevantnih faktora koji utiču na strujnu sliku unutar i oko objekta uzimajući u obzir lokalne meteorološke podatke, merodavne prepreke strujanju iz pojedinih pravaca. Na osnovu dobijene strujne slike, moguće je definisanje unapređenih modela objekta u cilju unapređenja energetske efikasnosti objekta ili arhitektonskog korigovanja objekta u ranim fazama projektovanja.

**Ključne reči:** *numerička simulacija, prirodna ventilacija, proračunska dinamika fluida.*

### 1. UVOD

Unapređenje energetske efikasnosti stočarskih objekata u osnovi podrazumeva niz mera koje se primenjuju na objektu u cilju smanjenja potrošnje toplotne i električne energije, kao i mogućnost primene ekoloških-čistih tehnologija. Kontrola mikroklimatskih uslova primenom čistih tehnologija je od posebne važnosti za uspeh primarne stočarske proizvodnje. Smanjenje potrošnje električne energije za rad sistema mehaničke ventilacije može smanjiti ukupnu potrošnju energije na godišnjem nivou i do 60% ne zanemarujući pri tome higijenske i zdravstvene uslove koji se održavaju u objektu.

Optimizaciju prirodne ventilacije, kao i predviđanje strujnih i temperaturnih polja u objektima primarne stočarske proizvodnje moguće je ostvariti i u ranim fazama projektovanja, čime je moguće objekat kao celinu optimizirati sa svim tehničko-tehnološkim procesima. Predviđanje strujnog polja oko objekta uzimajući u obzir lokalne mikroklimatske uslove, pre svega ružu vetrova daje za rezultat optimalan položaj objekta i u odnosu na lokalne prepreke i određivanje optimalne veličine otvora za prihvat vazduha. Kombinujući podatke dobijene iz numeričkih simulacija strujnog polja unutar objekta sa referentnim vrednostima, potrebnim za smanjenje količine čestica prašine u zoni boravka životinja i automatskom kontrolom i spregom prirodne i mehaničke ventilacije tokom godine moguće je projektovanje efikasnog sistema ventilacije uz maksimalno smanjenje potrošnje energije.

Prirodna ventilacija je jedna od tehnika za smanjenje potrošnje energije u stočarskim objektima i efikasno može zameniti sistem mehaničke ventilacije u određenim uslovima. U zavisnosti od uslova spoljašnje sredine, prirodnom ventilacijom moguće je ostvariti smanjenje temperature unutar objekta kao i efikasno provetravanje, smanjenje sadržaja prašine i njeno taloženja, kao i redukciju CO<sub>2</sub>. Efikasnost prirodne ventilacije stočarskih objekata leži u smanjenju zahteva kvaliteta vazduha u pojedinim delovima objekta, tj. definisane minimalne i maksimalne temperature u zoni boravka životinja, kao i brzina strujanja vazduha. Iz tog razloga, primena prirodne ventilacije efikasna je u objektima sa većim, tj. odraslim životinjama, gde mikroklimatski uslovi nisu striktni. Mlađe životinje obično zahtevaju konstante uslove unutrašnje sredine u pogledu temperature i vlažnosti vazduha, nezavisne od spoljašnje sredine, što se prirodnom ventilacijom ne može u potpunosti ostvariti.

## 2. DEFINISANJE STRUJNOG POLJA OKO I UNUTAR OBJEKTA

Kretanje vazduha u nekom prostoru može se pojaviti ili dejstvom mehaničkih sila ili silama potiska. Mehaničke sile mogu biti prouzrokovane uticajem vetra spoljašnjeg vazduha koji ulazi kroz otvor objekta. Sile potiska javljaju se usled temperaturske razlike unutrašnjih površina objekta i vazduha unutra. Strujanje vazduha unutar objekta je nekompresibilno a kako je vazduh Newtonian-ski fluid postoji linerana veza između napona i deformacija u njemu. Prema ovoj postavci fizičkog modela, sledećim skupom diferencijalnih jednačina, opisuje se strujanje vazduha u zatvorenom prostoru:

- zakon o održanju količine kretanja

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{v}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{w}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{u}}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} \right) - \overline{\rho u' u'_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{v}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{w}\bar{v}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{v}}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} \right) - \overline{\rho v' u'_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{v}\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{w}\bar{w}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{w}}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{w}}{\partial z} \right) - \overline{\rho w' u'_j} \right] - \rho\beta g(\bar{T}_\infty - \bar{T}) \quad (3)$$

- jednačina kontinuiteta

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\bar{w}) = 0 \quad (4)$$

- zakon o održanju energije

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p \bar{u}\bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_p \bar{v}\bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p \bar{w}\bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial\bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{T' u'_j} \right) + q'' \quad (5)$$

S obzirom da je strujanje oko i unutar objekta puno razvijeno turbulentno strujanje i nestacionarno, a za uspešno rešavanje datih jednačina potrebno je modeliranje graničnog sloja i turbulencije neposredno uz čvrste površine, analitičko rešenje ovih jednačina je teško dobiti. Projektanti se u većini slučajeva koriste empirijskim izrazima ili numeričkim simulacijama, tj. primenom kompjuterske dinamike fluida – CFD tehnike kojom je moguće dobiti precizne slike strujnog i temperaturnog polja u nekom prostoru.

U osnovi niza metoda projektovanja je zakon o održanju mase. Za bilo koji prostor u zgradi, suma uticanja fluida mora biti jednaka sumi isticanja fluida, to znači u zgradi sa  $j$  prostora, za svaki prostor je:

$$\sum_{i=1}^N (\rho_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad (6)$$

gde je  $\rho_{ij}$  gustina vazduha strujnom prolazu  $i$  koji se odnosi na prostor  $j$  ( $\text{kg/m}^3$ ),  $Q_{ij}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) je zapreminski protok vazduha u prolazu  $i$  a  $N$  je ukupan broj strujnih prolaza u vezi sa prostorom  $j$ . Prirodna ventilacija nastaje uglavnom iz dva razloga. Jednim delom prirodna ventilacija nastaje uticajem vetra, tj. brzinom vazduha koji sa jedne strane opstrujava zgradu, a sa druge "efektom dimnjaka", ukoliko postoje otvori koji su postavljeni relativno visoko na zgradi. Protok vazduha određuje se iz sledećeg izraza:

$$Q_w = C_d \cdot A^* \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

gde je

$$A^* = \frac{A_{ul} \cdot A_{iz}}{\sqrt{A_{ul}^2 + A_{iz}^2}} \quad (8)$$

Ukoliko koeficijenti pražnjenja ulaznog i izlaznog otvora nisu isti izraz (8) transformiše se u sledeći:

$$A^* = \frac{(C_{dul} \cdot A_{ul})(C_{diz} \cdot A_{iz})}{C_d \sqrt{(C_{dul} \cdot A_{ul})^2 + (C_{diz} \cdot A_{iz})^2}} \quad (9)$$

gde se za  $C_d$  može uzeti jedna od dve vrednosti koeficijenta pražnjenja.

U praktičnoj primeni, za poprečno strujanje može se koristiti izraz:

$$Q_w = C_d \cdot A^* v \sqrt{\Delta c_p} \quad (10)$$

gde  $\Delta c_p$  predstavlja razliku koeficijenta pritiska na mestu ulaska i izlaska vazduha iz objekta.

Dotatna komponenta koja kontroliše kretanje vazduha kroz otvor na objektu je potisak. Ukupan protok vazduha u unutrašnjost objekta nastao usled potiska je:

$$Q_p = C_d A^* \sqrt{\frac{2gh\Delta T}{\bar{T}}} \quad (11)$$

gde je  $\bar{T} = T_{un} - T_{sp}$ .

U realnim uslovima strujanje nastaje istovremenim uticajem vetra i potisnih sila i prema zakonu o održanju mase ukupan protok kroz otvor računa se prema izrazu:

$$Q = \sqrt{Q_w^2 + Q_p^2} \quad (12)$$

U zavisnosti od položaja otvora u omotaču objekta i njihove orijentacije u odnosu na pravac vetra, vetar može ili da povećava prostrujavanje nastalo efektom potiska, ili da deluje suprotno. U slučaju da vetar u potpunosti povećava uticaj potisnih sila, izraz (7) može se predstaviti:

$$Q = C_d A^* \sqrt{2gh \frac{T_{un} - T_{sp}}{T_{sp}} + \Delta p_w} \quad (13)$$

gde je sa  $\Delta p_w$  označena razlika pritisaka na otvorima, i uvek je pozitivna veličina.

Ukoliko vetar deluje nasuprot potisnih sila, ukupan protok je:

$$Q = C_d A^* \sqrt{2gh \frac{T_{un} - T_{sp}}{T_{sp}} - \Delta p_w} \quad (14)$$

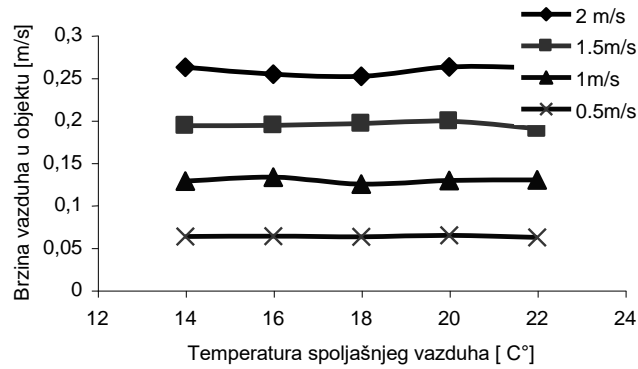
### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Numeričke simulacije strujnog polja na test objektu vršene su za slučaj poprečne ventilacije nastale kombinovanim uticajem vetra i sila potiska uz pretpostavku da je sistem mehaničke ventilacije u objektu isključen. Iz eksperimentalnih merenja sa sistemom mehaničke ventilacije ustanovljene su referentne brzine strujanja vazduha na određenim visinama u objektu sa kojima su poređene vrednosti dobijene numeričkim simulacijama u cilju određivanja efekta prirodne ventilacije i graničnih slučajeva primene.

Brzina vetra varirana je u intervalu od 0.5 m/s do 2 m/s, a određena je prema ruži vetrova za mikrolokaciju na kojoj se nalazi ispitivani objekat u prolećnom i letnjem periodu kada su vršena i merenja brzina kretanja vazduha unutar objekta kada je sistem mehaničke ventilacije uključen. Pravac i smer vetra variran je u intervalu od 0 do 90° u odnosu na ravan otvora. Variranjem pravca i smera vetra u odnosu na ravan otvora obezbeđeno je određivanje maksimalnih brzina strujanja (varijanta kada je pravac vetra normalan na ravan otvora) i minimalnih brzina strujanja (slučaj kada je pravac brzine vetra u ravni otvora).

Temperature spoljašnjeg vazduha varirane su u intervalu od 14 do 22°C, gde se temperaturna razlika unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha pri tome kretala od 0 do 8°C. U graničnom slučaju, kada su temperature spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha jednake, prirodna ventilacija nastaje samo pod uticajem vetra. Ovaj slučaj je u letnjem periodu česta pojava kod stočarskih objekata upravo zbog činjenice da su površine ulaznih i izlaznih otvora maksimalne, pa su i protoci svežeg vazduha maksimalni.

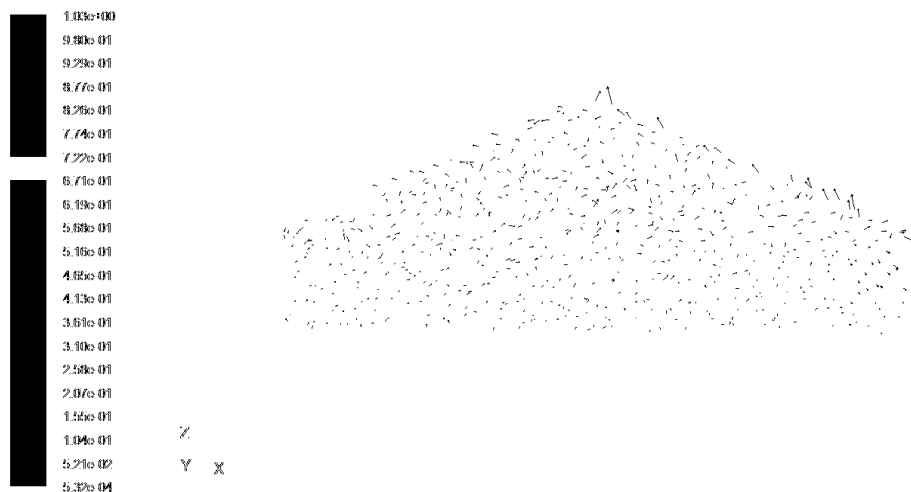
Na slici 1. prikazane su vrednosti brzina strujanja vazduha unutar objekta u odnosu na spoljašnju temperaturu i brzinu vetra mereno na visini 0.5 m od poda, u slučaju kada je pravac vetra normalan na ravan otvora, kada se ujedno ostvaruju i maksimalni protoci vazduha unutar objekta.



Slika 1. Brzine strujanja vazduha u objektu u zavisnosti od parametara spoljašnje sredine, brzine vetra i temperature spoljašnjeg vazduha

Od posebnog značaja je utvrđivanje minimalnih brzina strujanja u poprečnom preseku ulaznog otvora i minimalnih protoka vazduha. Iz meteoroloških podataka ustanovljeno je da je brzina vetra od 0.5 m/s minimalna brzina vetra u posmatranom periodu. Protok vazduha određivan je variranjem upadnog ugla pravca vetra u odnosu na normalu otvora.

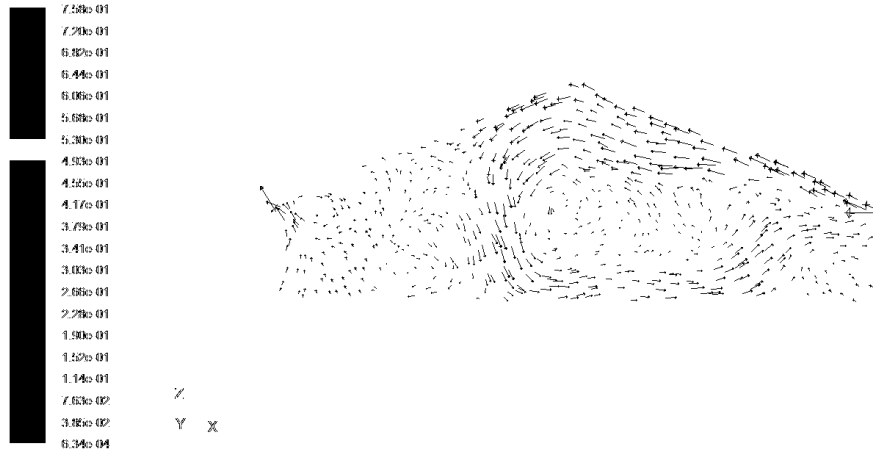
Na slici 2. prikazani su vektori brzina vazduha unutar objekta u slučaju brzine spoljašnjeg vazduha od 0.5 m/s i ugla od  $90^\circ$  u odnosu na normalu otvora.



Slika 2. Vektori brzina strujanja vazduha unutar objekta za brzinu vetra 0.5 m/s i pravac  $90^\circ$  u odnosu na normalu otvora

Može se smatrati da kretanje vazduha u ovom slučaju nastaje samo usled sila potiska, pošto spoljašnji vazduh zbog upadnog ugla skoro da i ne ulazi u objekat. Brzine kretanja vazduha u ovom slučaju su nedovoljne za uklanjanje čestica iz zone boravka životinja, i ovo predstavlja granični slučaj primene prirodne ventilacije, tj. slučaj kada je neophodna primena mehaničke ventilacije u objektu.

Na slici 3. prikazani su vektori brzina vazduha u objektu za slučaj kada je brzina vetra 0.5 m/s i napadni ugao 45° u odnosu na normalnu otvora.

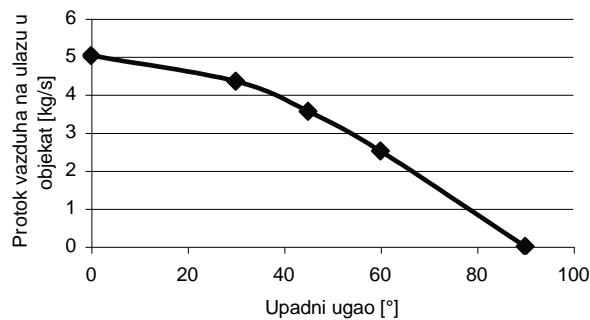


Slika 3. Vektori brzina strujanja vazduha unutar objekta za brzinu vetra 0.5 m/s i pravac 45° u odnosu na normalu otvora

U odnosu na granični slučaj, promena napadnog ugla vetra u odnosu na normalu otvora uslovljava kretanje vazduha u objektu. Analizom strujne slike moguće je predvideti količinu uklanjanja čestica prašine iz zone boravka životinja i efekat prirodne ventilacije, kao i moguću vezu sa sistemom mehaničke ventilacije.

Prednost numeričkog predviđanja strujnih polja pored vrednosti brzina strujanja i temperature vazduha, što je sa slika 2 i 3 uočljivo, je ustanovljavanje stagnacionih zona unutar objekta koje se mogu u praksi otkloniti promenom veličine ili broja otvora.

Pravac vetra pri određenoj brzini strujanja uslovljava promenu protoka svežeg vazduha kroz otvor, a samim tim i promenu efekta prirodne ventilacije u objektu. U slučaju malih brzina vetra, promena napadnog ugla može dovesti i do varijante da svež vazduh uopšte ne ulazi u objekat, a da strujanje unutar objekta nastaje samo usled temperaturnih razlika zidova objekta i vazduha u njemu. Na slici 4. date su vrednosti protoka vazduha na ulazu u objekat u zavisnosti od upadnog ugla vetra u ravni otvora za brzinu vetra od 0.5 m/s.



Slika 4. Zavisnost protoka vazduha od upadnog ugla vetra u ravni otvora

## ZAKLJUČAK

Analizirajući podatke dobijene numeričkim simulacijama strujnog polja oko i unutar objekta može se zaključiti da se primenom prirodne ventilacije može direktno uticati na termički komfor unutar objekta. Prirodna ventilacija nastala uticajem vetra zavisi ne samo od brzine strujanja spoljašnjeg vazduha nego i u velikoj meri od upadnog ugla vazduha u ravni otvora čime se može doći do graničnih slučajeva kada prirodna ventilacija nije u stanju da obezbedi optimalne uslove.

Uzimajući u obzir činjenicu da se brzine strujanja vazduha u zoni boravka životinja kod sistema krovne i podne mehaničke ventilacije kreću do 0.1 m/s, jasno je uočljivo da poprečna ventilacija u letnjem periodu može da obezbedi brzine strujanja vazduha unutar objekta dovoljne za uklanjanje čestica prašine i obezbeđenje adekvatnog termičkog komfora. Pri povećanju brzine spoljašnjeg vazduha, smanjenje protoka vazduha u objekat, a samim tim i smanjenje brzina strujanja vazduha u objektu moguće je smanjenjem veličine ulaznih i izlaznih otvora. Postavljanjem usmerivača na otvorima, takođe se može uticati na protok vazduha u objekat, obezbeđivanjem da je vazдушna struja normalna na ravan otvora kako bi se ostvario maksimalni protoka svežeg vazduha.

## LITERATURA

- [1] Topisirović Goran: Proučavanje uticaja različitih ventilacionih sistema na raspodelu koncentracija čestica inhalabilne i respirabilne prašine u objektima za završni tov svinja, Doktorska disertacija, Beograd, 2002.
- [2] Topisirović Goran, Dušan Radivojević: Influence of ventilation systems and related energy consumption on inhalable and respirable dust concentration in fattening pigs confinement building, *Energy and Buildings*, Vol. 37, str. 1241-1249, 2005.
- [3] Todorović Marija, Ećim Olivera, Marjanović Aleksandar, Randjelović Ivan: Natural and Mixed Ventilation Design via CFD and Architectural Modeling, Palenc 2005 - the First Passive and Low Energy Cooling for Built Environment, Proceedings, Santorini, 2005.
- [4] Ećim Olivera, Stamenov Vasil, Todorović Marija, Topisirović Goran: Optimizacija prirodne ventilacije poljoprivrednih objekata numeričkim simulacijama, *Agricultural Engineering*, pp. 41-48, Beograd, 2005.
- [5] Ećim Olivera: Istraživanje kombinovane konvekcije otvorenog neizotermnog kaviteta za razvoj interoperabilnosti simulacija dinamike fluida i termičkog ponašanja objekta, Doktorska disertacija, Beograd, 2008.

Rezultati istraživačkog rada nastali su zahvaljujući finansiranju Ministarstva za nauku Republike Srbije, Projekat broj 20012 - TR
---

## NUMERICAL PREDICTION OF NATURAL VENTILATION FLOW FIELD IN LIVESTOCK BUILDINGS

**Goran Topisirović, Olivera Ećim-Đurić**

*Faculty of Agriculture - Belgrade*

**Abstract:** This paper deals with three dimensional flow fields of livestock buildings prediction by numerical simulations and computational fluid dynamics - CFD. Flow field investigation is based on analysis of all relevant parameters that influences on temperature and flow field inside and outside of object, taking in account local meteorological conditions and terrain configuration. Based on results it is possible to design improved models in early stages of architectural design or later, and improvement of object energy efficiency.

**Key words:** numerical simulation, natural ventilation, computational fluid dynamics.