



UDK: 621.36:697.921.2

*Originalan naučni rad
Original scientific paper*

OPTIMIZACIJA PRIRODNE VENTILACIJE POLJOPRIVREDNIH OBJEKATA NUMERIČKIM SIMULACIJAMA

Olivera Ećim¹, Vasil Stamenov², Marija Todorović¹, Goran Topisirović¹

¹ Poljoprivredni fakultet - Beograd

² "Arhipro" - Beograd

Sadržaj: U radu je dat metod optimizacije prirodne ventilacije u cilju smanjenja potrošnje energije i povećanja energetske efikasnosti, odnosno poboljšanja uslova ugodnosti u objektu. Metod optimizacije uključuje ispitivanje trodimenzionog strujnog i temperaturnog polja numeričkim simulacijama. Ispitivanja simulacijama se sprovode za definisan referentni model okolnih objekata u širem kompleksu posmatranog objekta obuhvatajući sve merodavne prepreke strujanju iz pojedinih pravaca ruže vetrova, i definisan referentni model samog objekta. Na osnovu ovako dobijene strujne slike i definisane prepreke vazdušnoj struji za različite orijentacije pravca vetra, se potom definišu unapređeni modeli i korigovani ulazni podaci za preciznije određivanje i složenije strujne slike oko i unutar objekta.

Ključne reči: *energetska efikasnost, prirodna ventilacija, numeričke simulacije, višemodelske simulacije, davači za male razlike pritiska.*

1. UVOD

Energetska optimizacija, povećanje energetske efikasnosti omotača i cele građevinske strukture, sistema grejanja, ventilacije, hlađenja i klimatizacije, kao i svih ostalih tehničko-tehnoloških sistema objekata, postaje sve važniji element pri definisanju projektnih zadataka novih objekata, kao i rekonstrukcije starih.

Optimizacija energetske efikasnosti podrazumeva razmatranje brojnih mera za smanjenje potreba za energijom, niza mogućnosti umanjenja potrošnje energije za zadovoljenje tako smanjenih potreba, mogućnosti uvođenja novih ekoloških - čistih tehnologija i obnovljivih izvora energije, kao i detaljnu analizu odgovarajućih ekonomskih faktora. Pored toga rešavanjem uporedo problema energetike i kvaliteta vazduha unutrašnje sredine, ne zanemarujući ni efekte na spoljašnju sredinu, energetskom optimizacijom uspostavljaju se uslovi ne samo za smanjenu potrošnju energije reda veličine 30-60% pa nekada i više u odnosu na objekte pri čijem

projektovanju energetska efikasnost nije bila u središtu pažnje, već se i popravljaju uslovi higijene odnosno kvaliteta unutrašnjeg prostora za veću produktivnost proizvodnje, biljne ili stočne, u datom prostoru. Kako se smanjenjem potrošnje fosilnih goriva smanjuje emisija gasova efekta staklene bašte, što nalaže Protokol Kyota, ovakvi objekti i poljoprivredna proizvodnja u njima ulaze u domen razvoja "održive" poljoprivrede prestižnog epiteta "Kyoto proizvodnje" (3/, /4/).

Posebna pažnja u integralnom projektovanju ovakvih objekata poklanja se ustanovljavanju i vrednovanju merodavnih indikatora i kriterijuma, i metodološkog sadržaja merodavnog za razvoj integralno održivog objekta, uključujući i sve aspekte primene održivih tehnologija i poljoprivredne tehnike odgovarajuće biljne ili stočne proizvodnje. Ovo pre svega ima za cilj uspostavljanje brže, efikasnije i sveobuhvatnije komunikacije i saradnje između eksperata koji rade na planiranju, projektovanju, inženjeringu i upravljanju razvojem projekata novih i projekata revitalizacije postojećih objekata (/6/, /7/). Neslaganje određenih pretpostavki i uprošćenja u pojedinim projektnim modelima ekspertskih prilaza različitih stručnih domena inženjerskih disciplina, kao i vrednosti ulaznih i merodavnih parametara sa kojima se sprovede prethodne dinamičke simulacije početnih uslova i stanja definisanih modela problema, može da bude razlog ograničene izvesnosti i pouzdanosti rezultata i detaljnijih simulacija, kao i razlog neuspešnosti daljeg postupka projektovanja, analize i pokušaja optimizacije modela.



Slika 1.

Sprovođenje dinamičkih simulacija na višezonskim modelima, na pr. stočnih nastambi zahteva da se za svaki domen fizičkog modela obezbede ulazni parametri. Održivi poljoprivredni objekti, optimizacija energetske efikasnosti objekta, primena obnovljivih izvora energije i simulacije ponašanja objekta su oblasti u kojima je saradnja na odabiru i proveru podataka od najveće važnosti kako za primenu postojećih i unapređenje znanja tako i za dalji tehnološki i tehnički napredak.

Prirodna ventilacija je jedan od načina da se smanji potrošnja energije u odnosu na potrošnju energije sa mehaničkom ventilacijom a time poveća energetska efikasnost objekta. Zavisno od temperaturnih uslova u objektu i van njega, prirodnom ventilacijom može da se postigne u izvesnoj meri i hlađenje objekta.



Slika 2.

2. MATEMATIČKI MODEL

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 prema /8/:

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

gde je ρ_{ij} gustina vazduha strujnom prolazu i koji se odnosi na prostor j (kg/m^3), Q_{ij} (m^3/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 kroz otvore na fasadi nastao uticajem vetra može se predstaviti u obliku /8/:

$$Q_w = 0.05AU \quad (2)$$

gde je A površina otvora (m^2) kroz koji vazduh ulazi u zgradu, a U brzina vetra na visini otvora. U slučaju ventilacije nastale efektom dimnjaka, protok je:

$$Q_s = 0.2A \left(\frac{g h \Delta T}{T_{av}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

gde je g ubrzanje zemljine teže (m/s^2), h je visina otvora (m), ΔT temperaturska razlika unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha a T_{av} (K) srednja vrednost spoljne i unutrašnje temperature. Kada se pojedinačno odrede oba protoka, tada se ukupni protok dobija na sledeći način /8/:

$$Q_{\text{tot}} = (Q_w^2 + Q_s^2)^{1/2} \quad (4)$$

Glavni zadatak ventilacije efektom dimnjaka je dobijanje željene raspodele strujanja na svakom nivou. Pri konstantnoj temperaturi, pritisak vazdušnog stuba linearno opada sa povećanjem visine. Kako se unutrašnja i spoljašnja temperatura razlikuju, gradijenti pritiska su različiti, a spoljni pritisak se izjednačava sa unutrašnjim na neutralnom nivou pritiska (NN). Na ovom nivou nema strujanja ni u ni van zgrade.

Razlika pritisaka Δp (Pa), za datu visinu h (m), iznad ovog nivoa može se dobiti:

$$\Delta p = (\rho_{sp} - \rho_{un})g(h - h_{NN}) \quad (5)$$

gde je ρ_{un} gustina unutrašnjeg vazduha (kg/m^3), a ρ_{sp} gustina spoljašnjeg vazduha (kg/m^3), h_{NN} visina neutralnog nivoa a g ubrzanje zemljine teže kako je već dato gore.

Primenjujući zakon idealnog gasa, veza između gustina spoljnog i unutrašnjeg vazduha može se prikazati preko njihovih temperatura, što daje sledeću jednačinu

$$\Delta P = \rho_{un} g (h - h_{NN}) \left(\frac{T_{un} - T_{sp}}{T_{un}} \right) \quad (6)$$

gde su $T_{un,sp}$ unutrašnja i spoljašnja temperatura. Protok Q kroz veliki otvor površine A i koeficijent pražnjenja C_d dat je /8/:

$$Q = C_d A \left(\frac{2\Delta P}{\rho_{un}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

gde je C_d koeficijent pražnjena (0.61 za velike otvore) i A potrebna površina otvora (m^2).

Kao posledica može se dobiti izraz koji se odnosi na protok kroz otvor, položaj otvora u odnosu na neutralni nivo, i unutrašnje/spoljašnju temperatursku razliku:

$$Q = C_d A \left[\frac{2}{\rho_{un}} \rho_{un} g (h - h_{NN}) \left(\frac{T_{un} - T_{sp}}{T_{un}} \right) \right] \quad (8)$$

Prednost ove pojednostavljene metode je što većina članova u jednačini može se odrediti eksplicitno pa se površina otvora može lako izračunati. Potrebna površina otvora za svaku zonu može se izračunati iz jednačine (8).

3. METODE REŠAVANJA

Danas u praksi postoji veliki broj metoda kojima se mogu rešiti problemi prirodne ventilacije, a izbor metode zavisi od projektnih zahteva. Neke od ovih metoda se koriste za preliminarna dimenzionisanja modela, dok su neke od njih vrlo složene i mogu prikazati dinamiku godišnjeg ponašanja objekta. U osnovi svih metoda je način prikazivanja objekta koji se može predstaviti kao jednozonski ili višezonski model. CFD - računarskom dinamikom fluida (RDF), kao veoma moćnim alatom, moguće je odrediti vrlo detaljno podatke o strujnom polju u nekom prostoru, a posebna je pogodnost metoda

što se mogu posmatrati i lokalna kretanja fluida - vazduha. Pomoću RDF mogu se predvideti temperature, pravac i brzina kretanja vazduha u toku samog projektovanja, a na taj način se može lokalno intervenisati izmenama u toku projektovanja, odnosno vršiti modifikacije rešenja sve dok se ne dobije željena slika merodavnih parametara na objektu. Ako se želi sveobuhvatna analiza jednog objekta od posebnog značaja su programi koji povezuju termičke simulacije i RDF simulacije. U ovim simulacijama je neophodna detaljna provera ulaznih podataka koji mora da uslove brzu konvergenciju rešenja. Jedna od glavnih prednosti ove metode je predviđanje strujanja oko objekta, i mogućnost promene geometrije modela u cilju postizanja željenih rezultata.

Ispitivanje u vazдушnim tunelima je jedna od ekperimentalnih metoda, koje na žalost ne daju potvrdu projekta efekata sistema prirodne ventilacije unutar objekta, pošto se u njemu dobija samo spoljno strujanje oko zgrade, ali se ovim putem određuje merodavno polje pritiska a time i pouzdana osnova za proračun ventilacije. Rezultati merenja se mogu dobiti za različite oblike objekata, a alternativno se mogu uraditi merenja za pojedinačne modele objekta.

4. PRIMENA REZULTATA SIMULACIJA U KONTROLI

Diferencijalni senzor pritiska za milibarski opseg. Za razvoj primene kontrolisane prirodne ventilacije su neophodni davači odgovarajuće osetljivosti. U cilju razvoja odgovarajućih davača je ispitana mogućnost izrade diferencijalnog merača pritiska korišćenjem debeloslojnog senzora pritiska kao i mogućnost njegove primene za merenje razlike pritiska u ventilacionim sistemima, kao jedne od veličina potrebnih pri optimizaciji prirodne ventilacije. Dugogodišnji rad na razvoju pretvarača pritiska u Institutu "Mihajlo Pupin" rezultovao je u osvajanju različitih tipova industrijskih merača pritiska korišćenjem originalnog debeloslojnog senzora. Konstrukcija senzora omogućava primenu ovakvih merača pritiska u različitim agresivnim i abrazivnim sredinama, u širokim temperaturnim uslovima i velikom opsegu pritiska a takođe je moguća njegova primena i za merenje razlike pritiska u uslovima kada nema velikih kolebanja statičkih pritisaka tj. kada ne postoji potreba za skupom i komplikovanim zaštitom senzora od preopterećenja. Rešen je i način temperaturne kompenzacije što dovodi do povećanja tačnosti senzora s jedne strane kao i mogućnosti merenja malih razlika pritisaka koji se javljaju u ventilacionim sistemima.

Debeloslojni senzor pritiska zasniva svoj rad na reverzibilnom piezootpornom efektu debeloslojnih otpornika. Senzor se sastoji od keramičke membrane zalepljene na keramički prsten (Al_2O_3). Na unutrašnjoj strani membrane su, debeloslojnom hibridnom tehnologijom, nanete provodne linije i otpornici, povezani u Wheatstone-ov most i pozicionirani tako da daju maksimalnu naponsku neravnotežu mosta pri deformaciji membrane.

Materijali koji se ovde koriste su standardne otporne paste na bazi rutenijum oksida, sa velikim GF (10-20), i provodne paste na bazi platine i zlata. Kao membrane senzora se koriste standardni keramički substrati ali i nestandardni, vrlo malih debljina (ispod 0,1 mm) i koji su posebno važni pri izradi senzora za milibarsko područje. Pri projektovanju senzora za određeni pritisak, polazi se od sledećih jednačina i veličina njima definisanih. Pritisak loma membrane:

$$P_{lom} = \left(\frac{d}{r}\right)^2 \sigma_t \quad (\text{bar}) \quad (9)$$

gde je σ_t granica razvlačenja (za Al_2O_3 σ_t je 1750 bar). Osetljivost senzora:

$$\frac{U_{\text{out}}}{PU_{\text{nap}}} = \frac{3}{4} \left(\frac{r}{d} \right)^2 \frac{GF}{E} \quad (\text{mV/Vbar}) \quad (10)$$

gde je GF Gauge Factor a E modul elastičnosti (za Al_2O_3 E je 3.25×10^6 bar). Kombinujući jednačine 1 i 2 dobija se izraz za naponski izlaz mosta pri $P = P_{\text{lom}}$:

$$\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{nap}}} \approx GF \quad (\text{mV/V}) \quad (11)$$

Ovo je teoretski izlaz mosta i postiže se pozicioniranjem otpornika na mestima gde je najveće naprezanje membrane – dva u sredini i dva na obodu. Pretpostavka je i da su otpornici tačkasti. Realno, otpornici imaju svoje dimenzije tako da je stvarni izlaz mosta oko 70% od teorijskog, gde se posebno smanjuje naprezanje otpornika na obodu membrane. Naponski izlaz senzora je linearan i proporcionalan primenjenom pritisku. Temperaturna zavisnost osetljivosti senzora, koja potiče od promene GF sa temperaturom, je takođe linearna. Kritična promena je temperaturno pomeranje nule senzora, tj. promena naponskog izlaza mosta pri promeni temperature i $P = 0$. Ovaj efekat je posledica različite TCR vrednosti za otpornike u mostu što dovodi do različite temperaturne promene otpornosti za svaki otpornik u mostu.

$$\frac{\Delta U_{\text{out}}}{\Delta TU_{\text{nap}}} = \left[\frac{R_4/R_3}{(1+R_4/R_3)^2} (TCR_3 - TCR_4) + \frac{R_1/R_2}{(1+R_1/R_2)^2} (TCR_1 - TCR_2) \right] \quad (12)$$

Kako se iz jednačine (12) vidi, ova promena zavisi od vrednosti otpornika u mostu i njihovih koeficijenata temperaturne otpornosti (TCR). Temperaturna kompenzacija ove promene je neophodna pri proizvodnji merača pritiska sa tačnošću merenja ispod 1%.

Izrada diferencijalnog senzora pritiska za milibarski opseg. Iz jednačine 1 se vidi da se P_{lom} za određenu membranu smanjuje sa povećanjem prečnika membrane i smanjenjem debljine membrane. Imajući u vidu tehnologiju proizvodnje Al_2O_3 substrata i tehnologiju proizvodnje senzora (proces nanošenja otpornika i provodnih linija sitoštampom i njihovog sinterovanja i lepljenja membrane i keramičkog prstena) minimalna debljina membrane je oko 0.1 mm a maksimalni prečnik je oko 40 mm. Stavljajući ove vrednosti u jednačinu 1 dobijamo $P_{\text{lom}} = 44$ mbar. Naponski izlaz senzora na ovom pritisku zavisi od GF faktora primenjene otporne paste i može da iznosi od 10 do 18 mV/V. Međutim, sami otpornici ne mogu da podnesu deformaciju koja bliska deformaciji loma same membrane. Zbog zrnaste strukture, u otpornicima se formiraju mikropukotine koje dovode do trajne promene otpornosti otpornika posle čega se gubi linearnost i ponovljivost naponskog izlaza senzora sa primenjenim pritiskom. Eksperimentalno je utvrđeno da ove promene nastaju pri pritiscima od oko 50% od P_{lom} . Takođe mora da se ostavi rezerva za eventualno preopterećenje koje senzor može da podnese a da ne dođe do trajne promene u otpornicima. Ako uzmemo u obzir i dozvoljeno preopterećenje, optimalni opseg pritisaka za ovaj senzor je 15 mbar. Naponski izlaz senzora bi bio oko 3.5 mV/V (za standardnu pastu čiji je GF 15).

Ranije spomenuto pozicioniranje piezootpornika, pred smanjenog naponskog izlaza, ima još jedan nedostatak, pogotovu kod senzora sa tankom membranom i velikim prečnikom: različite temperature u sredini i na obodu membrane i to naročito pri promeni temperature okoline ili merenog fluida. Ovo unosi dodatnu grešku i smanjuje tačnost merenja. U ventilacionim sistemima, mereni fluid je vazduh i on može doći u dodir sa piezootpornicima. Zbog toga je moguće promeniti konstrukciju senzora tako da se postigne veći naponski signal (90% od teorijskog) i veća temperaturna stabilnost (sva četiri otpornika se nalaze praktično na istom mestu i istoj temperaturi).

Određivanje minimalnog opsega pritiska i merenje razlike pritiska u ventilacionim sistemima. Minimalni opseg pritisaka za koji bi ovaj senzor bio primenljiv zavisi od više uslova: zahtevane tačnosti merenja, temperaturnog opsega primene, kvaliteta temperaturne kompenzacije. Za zahtevanu tačnost od 1%, uzimajući u obzir da najveći uticaj na tačnost merenja ima temperaturni drift nule a koji se dovodi na nivo od 0.01 mV/V, zahtevani naponski izlaz senzora je 1 mV/V. Na osnovu predhodnih proračuna, ovaj naponski izlaz se dobija pri pritisku od 4 mbar, t.j. ovaj senzor može da se upotrebi za merenje diferencijalnog pritiska od -2 do +2 mbar sa tačnošću 1%.

Diferencijalni merač pritiska se konstruiše na istom principu kao i standardni industrijski merači pritiska, korišćenjem istog elektronskog pojačavača signala, istih pokaznih i upravljačkih jedinica kao i u slučaju standardnih merača pritiska. Razlika pritiska dovodi do deformacije keramičke membrane i promene otpornosti otpornika na membrani. Promena naponskog izlaza mosta se preko elektronskog pretvarača prosleđuje do pokazno/upravljačke jedinice (kao standardni industrijski strujni ili naponski signal) gde se vrši prikaz izmerenog pritiska, uključivanje ili isključivanje nekog uređaja pri unapred definisanom pritisku ili dalje prosleđuje signala do računara. Postoji mogućnost povezivanja više senzora na jednu pokazno-upravljačku jedinicu ili prosleđivanje signala i po više stotina metara.

5. ZAKLJUČAK

Dobijene vrednosti brzina i pritisaka za merodavne orijentacije vetra unutar ventiliranih prostora, mogu da ukažu na moguće kretanje vazdušne mase i na prepreke strujanju na modelu koje treba modifikovati, tj povećanje ili smanjenje otvora. Delom se može uticati i na geometriju objekta, i određivanje optimalnog oblika.

Uporedo sa ovim podacima, iz strujne slike se mogu dobiti podaci koje su strane objekta najviše izložene jakim udarima vetra, pa se mogu predvideti prepreke kako bi se sprečila pojačana konvekcija na najizloženijim stranama ili suprotno postavili usmerivače i kanalisati strujanje uz intenziviranje istog u cilju pojačanja prirodne ventilacije.

Razlika pritiska je jedna od mnogih ulaznih veličina pri modelovanju i upravljanju ventilacionim sistemima. Potrebno je znati vrednost razlike pritiska u pojedinim delovima ventilacionih kanala, delovima objekta i unutar i van objekta. Kako su ove razlike pritisaka vrlo male (reda veličine 1 mbar pa i manje) a za nivo statičkog pritiska od 1 bar, njihovo merenje je moguće jedino primenom diferencijalnih merača pritiska. Za kontrolu jednog ventilacionog sistema je potreban veliki broj takvih merača a s obzirom na visoku cenu industrijske verzije ovih merača, postoji potreba za jeftinijim i jednostavnijim merilima.

LITERATURA

- [1] Todorovic M.: *A Global Space for Building Performance Dynamic Simulation Science and Technology - Network of Excellence for Sustainable Building's Integrated Projects*, International Building Performance Simulation Association Conference, Chicago, 2003.
- [2] Todorovic M., Ecim O.: *Sustainable Buildings Energz Efficiencz Optimization, RES Integration and Performance Simulation*.
- [3] Todorovic M.S.: *RES Integrated Building's Performance Simulation and Energy Efficiency Optimization for Sustainable Local and Regional Development*, ASHRAE Technical Committee Seminar - RES Integrated Sustainable Buildings, Kansas City, 2003.
- [4] Todorovic M.S. and others: *USCE Tower - Building Envelope and Construction Energy Optimization Study*, EnPlus/DERES, Euro Construction, Belgrade, 2003.
- [5] Todorović M., Ećim O.: *Globalni prostor i mreža izvrsnosti EU-FP6 za integralne projekte održivih zgrada - polivalentne energetske fasade i integrisani sistemi korišćenja OIE u zgradama*, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primene u zemlji, Budva, 2003, pp. 54-59.
- [6] Ecim O., Todorovic M.: *Polyvalent Facades - Distributed CHP Production Based on Buildings Integrated Solar Energy*, Ekofilia, Jelena Gora 2004.
- [7] Todorović M.: *Istraživanje u cilju unapređenja znanja I prenosa informacija I tehnologija obnovljivih izvora energije za održiv razvoj*, Projekat Tehnološkog razvoja Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije 2002-2005.
- [8] The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, SW 12 9BS, *Application Manual AM10*, 1997.

NATURAL VENTILATION OPTIMISATION OF LIVERSTOCK BUILDINGS BY NUMERICAL SIMULATIONS

Olivera Ećim¹, Vasil Stamenov², Marija Todorović¹, Goran Topisirović¹

¹ Faculty of Agriculture - Belgrade

² "Arhipro" - Belgrade

Abstract: Numerical simulations and computational fluid dynamics can be usefully integrated with architectural modeling, providing designers with a powerful single CFD based architectural modeling and design framework. This framework can be interfaced with the building thermal performance modeling, integrating further fully thermal and flow domains within the architectural modeling. CFD analysis is generally restricted to the building's environment flows or indoor single rooms and spaces flows study, and the designer must supply boundary conditions in the form of external and internal building's envelope/wall surface conditions. In the case of natural and mixed ventilation, this presents a fundamental problem as the outdoor and indoor boundary conditions are dynamic, inter-related and interactive via building's architecture and in addition are dependent on external weather conditions and indoor environment control/related heat gains. Therefore, in this study both sides' boundary conditions are dynamically described, and integrated CFD, BPS and architectural modeling, as a unique framework – new design method, are developed, leading to natural and mixed ventilation energy efficiency optimization. In addition to the presented method, paper gives results of its implementation in designing the building complex in Belgrade. Finally, needs for further research and engineering development are outlined.

Key words: energy efficiency, natural ventilation, numerical simulations, multimodel simulation, low pressure difference sensors.