BIBLID 0350–1426 (206) 44:2 p. 29–35

EKSPERIMENTALNA ANALIZA PRIMENE KONCEPTA DVOSTRUKIH VENTILISANIH FASADA U USLOVIMA UMERENO-KONTINENTALNE KLIME

Dr ALEKSANDAR S. ANĐELKOVIĆ, dipl. inž. maš.,
Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu,
Novi Sad, aleksa@uns.ac.rs

Omotač (fasada) predstavlja deo objekta koji formira primarnu termičku barijeru između unutrašnjosti zgrade i spoljašnjeg uticaja meteoroloških i drugih uslova. On zauzima najznačajnije mesto u određivanju nivoa komfora, prirodnog osvetljenja i ventilacije, a na kraju i koliko je potrebno energije za grejanje i klimatizaciju objekta.

Predmet istraživanja načelno se odnosi na razmatranje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada (DVF) i njihov uticaj na energetsku efikasnost objekta. Ovaj koncept predstavlja jedan od primera adaptivnih fasada. Plan istraživanja zasnovan je na eksperimentalnom radu (na realnom objektu). Dakle, zadatak istraživanja je da se eksperimentalnim putem prouče potencijali višespratnog tipa DVF, u cilju sniženja potrošnje toplotne energije objekta. Osnovno pitanje koje se postavlja je da li i na koji način DVF može doprineti smanjenju energetskih potreba objekta, uz povećanje kvaliteta termičkog i drugog komfora korisnika. Iako je osnovni cilj rada da se pruži univerzalna i što sveobuhvatnija metodologija proračuna i analize, istraživanje je u velikoj meri fokusirano na višespratni tip DVF koji se nalazi u uslovima umereno-kontinentalne klime. U vezi sa tim, dobijeni rezultati oslikavaju ponašanje objekta sa višespratnom DVF samo u posmatranom klimatskom području.

Eksperimentalna studija je sprovedena za prirodno ventilisanu dvostruku fasadu višespratnog tipa. Rezultati eksperimentalnog dela istraživanja pokazuju na koji način termičke osobine objekta

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE CONCEPT OF VENTILATED DOUBLE SKIN FACADES IN CONDITIONS OF THE MODERATE CONTINENTAL CLIMATE

The envelope (façade) is a part of the building which forms the primary thermal barrier with its environment. It represents the most important factor in determining the level of thermal comfort, natural lighting and ventilation ability, and finally how much energy is needed for heating and air-conditioning.

Research generally refers to the consideration of the concept of double skin facades (DSF) and their impact on energy efficiency of the building. This concept is an example of adaptive facades. The research plan is based on experimental work (an actual building). Thus, the task of this research is to experimentally study the potential of multi-storey naturally ventilated DSF in order to reduce the building energy consumption. The main question that arises is whether and how the DSF may contribute to the decrease in the building energy consumption by increasing quality of the thermal comfort of occupants. Although the main aim of the paper is to provide universal and comprehensive methodology for calculation and analysis, the research is mainly focused on multi-storey naturally ventilated DSF type located in the climatic conditions of the moderate continental climate. In that regard, the results reflect the behaviour of a multi-story building placed in the observed climatic region.

The experimental study was conducted for the multi-storey naturally ventilated DSF type. The results of the performed experimental research show how energy characteristics of the building with the DSF depend on the current meteorological conditions and façade regulation. The conclusion of the experimental work is that, in order to achieve the desired performance, it

sa DVF zavise od trenutnih meteoroloških uslova i načina regulacije. Zaključak eksperimentalnog dela je da je za postizanje željenih karakteristika neophodno imati odgovarajući tip i dizajn fasade, uz njeno kvalitetno vođenje i kontrolu u operativnoj fazi. Takođe, rezultati eksperimenta u narednom delu istraživanja poslužiće za detaljniju simulacionu analizu ponašanja termičkih karakteristika i strujanja vazduha u međuprostoru, kao i za fino podešavanje modela i postizanje što vernije slike realnog objekta.

KLJUČNE REČI: višespratne prirodno ventilisane dvostruke fasade; eksperimentalna tehnika; termičke karakteristike; energetske performanse; efektivnost fasade

is necessary to have the appropriate type and design of the façade with its quality management and control in the operational phase. Also, the results of the experiment were used for the detailed analysis of thermal characteristics and air flow behaviour in the cavity, as well as for further fine adjustment of the model in order to achieve, as closely as possible, the real presentation of the real building.

KEY WORDS: multi-storey building; naturally ventilated double skin façade; experimental technique; thermal characteristics; energy performance; façade effectiveness

1. Uvod

Omotač (fasada) predstavlja deo objekta koji formira primarnu termičku barijeru između unutrašnjosti zgrade i spoljašnjih uticaja meteoroloških i drugih uslova. On zauzima najznačajnije mesto u određivanju nivoa komfora, prirodnog osvetljenja i ventilacije, a na kraju i koliko je potrebno energije za grejanje i klimatizaciju posmatranog objekta. Omotač može da u značajnoj meri unapredi unutrašnji komfor korisnika, pružajući veliki doprinos u "neenergetskim" dobicima. Pod ovim, naglasak je stavljen na zdravlje i smanjene troškove lečenja korisnika.

Predmet istraživanja načelno se odnosi na eksperimentalno razmatranje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada (DVF) i njihov uticaj na energetsku efikasnost postojećeg objekta. Koncept DVF predstavlja jedan od primera adaptivnih fasada. Nastao je kao želja i potreba inženjera da poboljšaju transparentnost, akustiku, unutrašnji komfor i estetski nivo objekata, a da se pri tome smanji potrošnja energije i njen uticaj na okolinu. DVF sa svojim dodatnim konstrukcionim elementima postiže još bolju zaštitu objekata od nepovoljnih spoljašnjih uslova koristeći raspoloživu energiju sunca i vetra, zagreva i rashlađuje, ili provetrava objekat. Na taj način, kao što je pomenuto, fasada nije samo statička pregrada, već postaje i „snabdevač" i „upravljač" energijom u objektu.

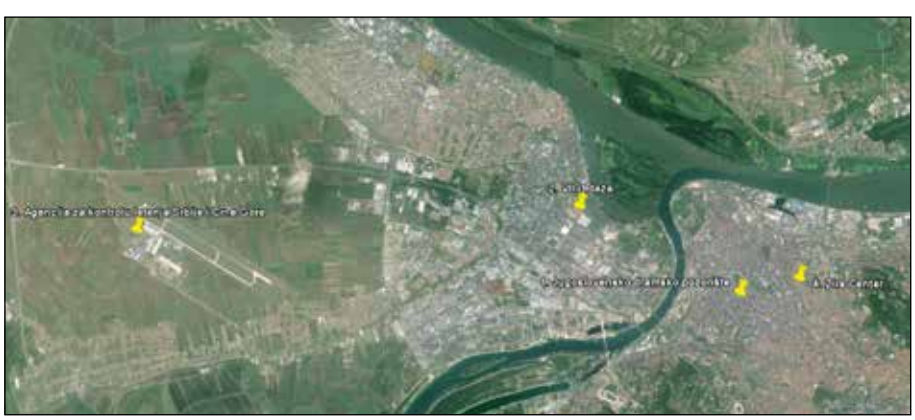
Geografska rasprostranjenost objekata sa DVF pokazuje da se dominantan broj zgrada nalazi u evropskim zemljama kontinentalnog i severnog dela (preko 50% od ukupnog broja objekata). Japan, kao predstavnik Azije, takođe učestvuje sa velikim procentom, od oko 13%. U tim zemljama klimatski uslovi su pogodniji za pravilnu adaptaciju i primenu DVF zbog hladnih zima i leta koja nisu isuviše topla.

Što se tiče zemalja, Nemačka ima najveći procenat – oko 20% – objekata sa DVF, a zatim sledi Japan sa 13%. Dominantno prisustvo DVF u Nemačkoj, može se povezati i sa činjenicom da je Nemačka jedna od prvih zemalja koja je počela da razvija ovaj koncept. S druge strane, veoma mali broj objekata je identifikovan u Kanadi, SAD, Australiji i drugim delovima sveta.

Iako su klimatski uslovi povoljni, u Srbiji nije zastupljen koncept gradnje objekata sa DVF (slika 1). Osnovni razlozi su, pre svega, nerazvijenost građevinske industrije, loši ekonomski uslovi i nedovoljno znanje o mogućim prednostima koje se mogu postići ovim načinom formiranja omotača objekta. Pored toga, nedovoljan je nivo istraživanja i komunikacije između ciljnih grupa istraživača, inženjera, arhitekata, projektnih i građevinskih firmi, kao i referentnih državnih tela.

Takođe, ne postoje standard ili pravilnik koji bi regulisali način projektovanja i gradnje ovakvih objekata u Srbiji. Znanje i informacije o ovom pristupu projektovanju fasada su na veoma niskom nivou.

Sledeći problem je što država svojim mehanizmima ne pomaže promociju i razvoj inovativnih rešenja u pogledu primene adaptivnih fasada, čime bi se sigurno povećao nivo energetske efikasnosti poslovnih objekta. Primer ovoga je postupak računanja bruto građevinske površine objekta, za čiju vrednost se plaća naknada za gradsko građevinsko zemljište. U Srbiji se za ovaj obračun primenjuje standard JUS U.C2.100.2002 (Izračunavanje površina objekata u oblasti visokogradnje), po kojem građevinska bruto površina predstavlja površinu prostora koji je određen spoljašnjim merama finalno obrađenih građevinskih elemenata (fasadni zidovi, ograda i sl.). Dakle, u objektima sa DVF dodatna površina (međuprostor fasade) je uključena u ovu površinu i značajno utiče na visinu naknade. Takođe, za objekte čiji spoljašnji zidovi ima-



Slika 1. Pregled postojećih objekata u Srbiji (Beograd) sa DVF (Izvor: Google Earth)

ju izolaciju, mora se platiti veća naknada. Smisao ovakvih fasada je da se poveća efikasnost objekata i smanji potrošnja, što država treba da podrži, a ne da za to naplaćuje veći iznos naknade za gradsko građevinsko zemljište.

Usvajanjem Pravilnika o energetskoj efikasnosti zgrada (stupio na snagu 30.9.2012. godine), ovaj problem je trebalo da bude prevaziđen. Dakle, u članu 2, stavu 3 ovog pravilnika, definiše se bruto razvijena građevinska površina, kao zbir površina svih nadzemnih etaža zgrade, merenih u nivou podova svih delova objekta – spoljne mere obodnih zidova (sa oblogama, parapetima i ogradama). *U bruto građevinsku površinu ne ulaze površine u sistemu dvostrukih fasada, staklenika i površine koje čine termički omotač zgrade. Bruto razvijena građevinska površina ne obuhvata heterogene zidove debljine termoizolacije preko 5 cm, a kod homogenih zidova debljinu zida veću od 30 cm uz postizanje ovim pravilnikom propisanih uslova energetske efikasnosti zgrada*. Na taj način država je videla problem i pokušala da ga reši. Međutim, praksa je pokazala da primena ovog pravilnika nije u svim opštinama ista, tj. da se u nekim slučajevima i dalje koristi stari JUS standard.

Naknade za gradsko građevinsko zemljište u gradu Beogradu kreću se od 15 €/m^2 do 400 €/m^2 bruto građevinske površine u zavisnosti od gradske zone (od I/1 do VIII). Pošto se poslovni objekti pretežno nalaze u užem gradskom jezgru, visina troškova za ovu naknadu nije mala. Na primeru poslovnog objekta VIG Plaza u Beogradu, može se izračunati da je bruto građevinska površina zbog prisustva DVF povećana za oko 50 m^2. Kada se sračuna visina naknade za gradsko građevinsko zemljište (objekat je završen 2011. godine), investitor je morao da plati oko 12.000 € više.

2. Opis izabranog objekta i postavka eksperimenta

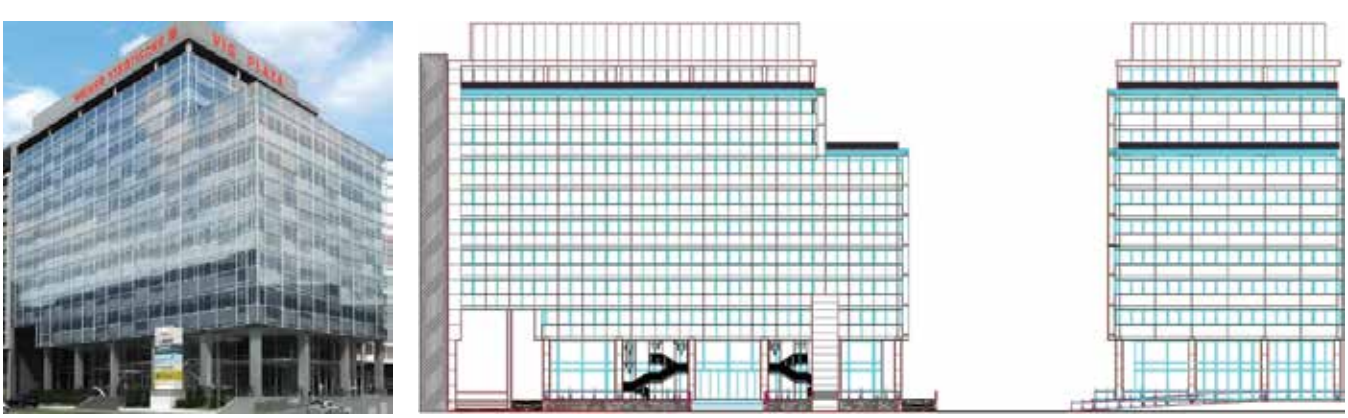
Poslovni objekat VIG Plaza nalazi se u Beogradu, a njegove geografske koordinate su 44,5° severne geografske širine, 20,3° istočne geografske dužine i vremenske zone +1 h GMT. Na slici 2 prikazan je posmatrani objekat zajedno sa spoljašnjim izgledom dela fasade koji je urađen po principu DVF. Širina DVF (parapet osnovnog sloja fasade – spoljašnje staklo pridodatog sloja fasade) iznosi 0,63 m, dok je širina DVF (dvostruki prozor osnovnog sloja fasade – spoljašnje staklo pridodatog sloja fasade) 0,78 m. Širina rešetke je 0,34 m, a rastojanje od spoljašnjeg stakla pridodatog sloja fasade do ose venecijanera je 0,23 m. Otvori na rešetkama su kvadratnog oblika, dimenzija 0,02 × 0,02 m. Na ulazu u DVF (I sprat objekta) nalazi se zaštitna mreža koja štiti prostor fasade od ulaska insekata i nečistoća, čiji su otvori kružnog poprečnog preseka širine 0,001 m. Na vrhu fasade (VI sprat), na izlazu, nalaze se aluminijumske žaluzine.

Zgrada je završena i zvanično otvorena 2011. godine. Objekat ima oko 12.800 m^2 grejne (korisne) površine i oko 5.000 m^2 garažnog prostora (bruto površina 21.625 m^2). U zgradi trenutno radi oko 600 ljudi, a prosečan dnevni broj posetilaca je oko 100. Jugoistočna i severoistočna fasada objekta su u potpunosti urađene po konceptu DVF, dok su preostale dve fasade konstruisane na tradicionalan način zbog okruženja zgrade. DVF je tipa višespratne kontinualne fasade, sa prirodnom ventilacijom međuprostora. U međuprostoru se nalaze venecijaneri, širine 0,1 m, za zaštitu objekta od sunčevog zračenja. Međuprostor nema regulacione klapne, tako da se ne može vršiti regulacija strujanja vazduha prema zahtevanom režimu. Fasada se na jugoistoku prostire od prvog do osmog, dok na severoistoku zauzima prostor od prvog do šestog sprata. Na svim spratovima se nalaze metalne rešetke i protivpožarne klapne koje u svakom trenutku mogu, po potrebi, odvojiti pojedine delove fasade. Prvi (osnovni) deo fasade je urađen na principu tradicionalne fasade, sa parapetnim delom i dvostrukim prozorima. Prozori se mogu ručno otvarati u svakom trenutku i omogućiti prirodnu ventilaciju. Drugi (pridodati) deo fasade je jednostruko ojačano staklo.

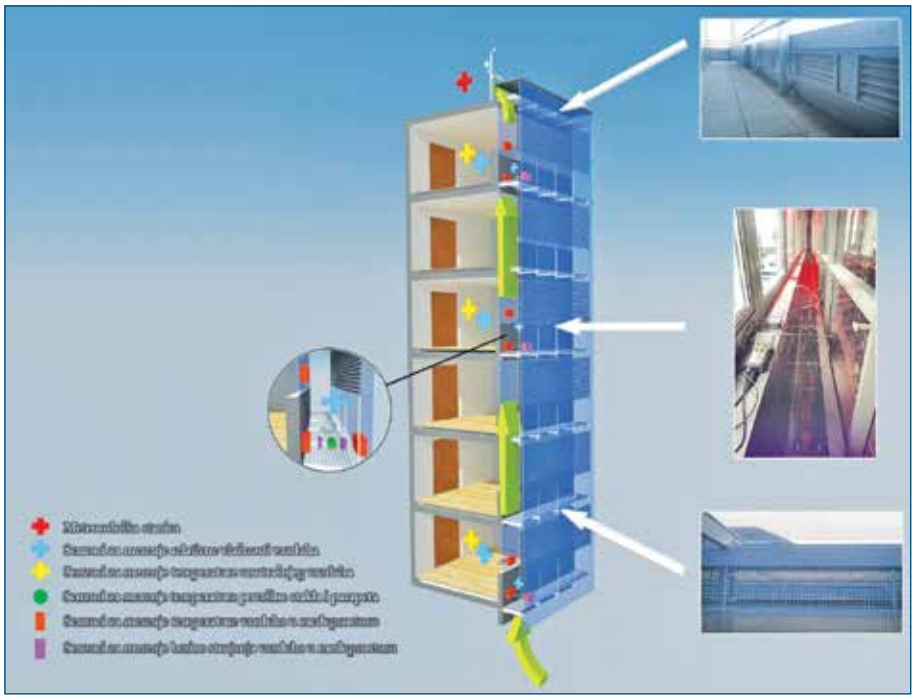
Izabrano mesto za postavku merne opreme je severoistočna fasada objekta. Razlog je njena kompaktnost i nezavisnost u odnosu na jugoistočnu fasadu. Ona uključuje šest spratova sa otvorima na prvom (ulaz vazduha u DVF) i na šestom spratu (izlaz vazduha iz DVF). Ideja je da se višespratna fasada podeli na tri dela, sa tri merna mesta, kako bi se imala kompletna slika o ponašanju fasade pri realnim meteorološkim uslovima letnjeg, zimskog i prelaznog režima. Merna oprema je postavljena na prvom, četvrtom i šestom spratu (slika 3). Parametri koji se prate na svim mernim mestima su:

1. temperatura prostorije (°C);
2. temperatura površine parapetnog dela prvog sloja fasade (°C);
3. temperatura površine spoljašnjeg stakla dvostrukog prozora prvog sloja fasade (°C);
4. temperatura vazduha u međuprostoru fasade, dve pozicije po širini fasade (°C);
5. temperatura unutrašnje površine drugog sloja fasade (°C);
6. brzina strujanja vazduha (m/s);
7. relativna vlažnost vazduha u prostoriji i međuprostoru fasade (%).

Zbog otežanog pristupa, neće se meriti temperatura spoljašnje površine drugog sloja fasade. Izabrani parametri u potpunosti mogu da odrede termičko ponašanje DVF. Njihove vrednosti najviše zavise od trenutnih meteoroloških uslova koji vladaju na objektu. Iz tog razloga, da bi se utvr-



Slika 2. Izgled posmatranog objekta VIG Plaza



Slika 3. Postavka eksperimenta i merne opreme

dila međusobna zavisnost, meriće se svi potrebni meteorološki parametri na objektu. To su:

1. temperatura vazduha (°C);
2. relativna vlažnost vazduha (%);
3. atmosferski pritisak (Pa);
4. brzina vetra (m/s);
5. smer strujanja vetra (°);
6. prosečno globalno sunčevo zračenje (W/m^2);
7. maksimalno globalno sunčevo zračenje u posmatranom satu (W/m^2).

Meteorološka stanica sa svim pripadajućim senzorima postavljena je na vrhu objekta. Svi termoparovi koji mere temperature staklenih površina su zaštićeni aluminijumskom folijom, kako bi se sprečio uticaj direktnog sunčevog zračenja. Termoparovi koji mere temperaturu površine stakla i parapeta, pričvršćeni su na podlogu sa specijalnom super provodnom silikonskom masom. Svi senzori, pre postavljanja na objekat, provereni su i kalibrisani po standardnoj proceduri. Opseg merenja svih opisanih parametara je 15 minuta u vremenskom intervalu od meseca januara do meseca avgusta 2014. godine.

3. Primenjena metodologija analize eksperimentalnih rezultata

Metodološki gledano, analiza merenja započinje posmatranjem trenutnih meteoroloških uslova u toku sva tri režima i kako priroda njenih promena utiče na ponašanje DVF. Na taj način se formiraju dijagrami zavisnosti promena temperature vazduha u DVF, u odnosu na promenu spoljašnje temperature i intenziteta sunčevog zračenja. Analiza se nastavlja prikazom zavisnosti brzine strujanja vazduha u međuprostoru DVF, u odnosu na uticaj brzine, smera vetra i intenziteta sunčevog zračenja. Metodologija obuhvata i formiranje dijagrama vertikalnog gradijenta i horizontalnog trenda temperatura za tipične dane svih režima. Ovaj deo eksperimentalnog istraživanja doprinosi boljem razumevanju i analizi transmisionih gubitaka i dobitaka posmatrane fasade.

Provera tačnosti sprovedenih merenja vrši se pomoću uporedne analize proračuna apsolutnih vrednosti vlažnosti vazduha u donjoj i u gornjoj zoni međuprostora DVF. Ove vrednosti se računaju na osnovu izmerenih podataka o temperaturi, relativnoj vlažnosti i atmosferskom pritisku vazduha u DVF. Proračun časovnih vrednosti apsolutne vlažnosti i entalpija vazduha, izvršen je pisanjem programskog koda u MS Excel-u koristeći VBA („Visual Basic for Application“). Detaljna procedura može se pronaći u [1, 2].

Primenom jednačine stanja idealnog gasa za pregrejanu vodenu paru i suvi vazduh dobija se izraz za apsolutnu vlažnost nezasićenog vlažnog vazduha kao [1, 2]:

$$X = 0{,}622\frac{p_d}{p_{sv}} = 0{,}622\frac{\varphi p_{dn}}{p\varphi p_{dn}} \qquad (1)$$

gde su:

X – apsolutna vlažnost vazduha [kg/kg];
p_d – stvarni parcijalni pritisak vodene pare na temperaturi tačke rose [Pa];
p_{sv} – parcijalni pritisak suvog vazduha [Pa];
p_{dn} – parcijalni pritisak zasićene vodene pare na temperaturi vlažnog vazduha [Pa];
p – barometarski pritisak, $p = p_{sv} + p_d$, [Pa];
φ – relativna vlažnost nezasićenog vazduha [%].

Za slučaj kada je t (temperatura posmatranog vazduha) niža od 0 °C, koristi se formula za određivanje vrednosti p_{dn}:

$$p_{dn} = \text{Exp}(-0{,}000000002465132 \cdot t^6 - 0{,}0000002733306 \cdot t^5 - 0{,}0000112064 \cdot t^4 - 0{,}0002065871 \cdot t^3 - 0{,}002017579 \cdot t^2 + 0{,}07729193 \cdot t - 5{,}101152)$$

U ostalim slučajevima koristi se sledeća formula:

$$p_{dn} = \text{Exp}(-7{,}789316\text{E-}15 \cdot t^6 + 7{,}363934\text{E-}12 \cdot t^5 - 0{,}000000003381446 \cdot t^4 + 0{,}000001096061 \cdot t^3 - 0{,}0002974345 \cdot t^2 + 0{,}07261845 \cdot t - 5{,}098158)$$

Izmerene vrednosti razlika temperatura vazduha u prostoriji i u DVF, predstavljaju osnovu za analizu transmisionih gubitaka u zimskom i transmisionih dobitaka u letnjem režimu. Na prirodno ventilisanim fasadama, strujanje vazduha predstavlja jednu od njihovih glavnih karakteristika. Za višespratni tip objekta sa ovakvim tipom fasade, podrazumeva se da je smer strujanja uvek vertikalno nagore. Kada vazduh prolazi kroz međuprostor fasade, on uzrokuje promenu i protok entalpije. Da bi se u celini procenila energetska performansa DVF, pored analize transmisionih gubitaka i dobitaka toplote, u obzir se mora uzeti i promena entalpije vazduha. Ovu promenu je izuzetno važno kvantifikovati u slučaju kada se analiziraju mogućnosti iskorišćenja DVF za prirodnu i noćnu ventilaciju prostorija, kao i za mogućnost povezivanja fasade sa sistemom za klimatizaciju objekta.

Neki od autora sugerišu da se vazduh iz DVF može koristiti za snabdevanje klima-komora u toku zimskog režima na višespratnim objektima. Na ovaj način se, u toku zime, deo transmisionih gubitaka i deo apsorbovane sunčeve energije može rekuperisati putem DVF.

Što se tiče letnjeg režima, da bi se smanjio rizik od potencijalnog pregrevanja međuprostora fasade (čest slučaj kada su višednevne visoke vrednosti temperatura i sunčevog zračenja), koriste se tehnike prirodnog provetravanja kada god je to moguće.

Entalpija nezasićenog vlažnog vazduha jednaka je sumi entalpija svih njegovih činitelja, odnosno sumi entalpija suvog vazduha i pridružene vodene pare [1, 2]:

$$h = h_a + \times h_v \quad (2)$$

gde su:
h – entalpija vlažnog vazduha [kJ/kg];
h_a – entalpija suvog vazduha [kJ/kg];
h_v – entalpija vodene pare [kJ/kg].

Uzimajući u obzir da je vazduh na konstantnom pritisku i da je latentna toplota isparavanja 2.500,84 kJ/kg, specifična toplota suvog vazduha i vodene pare može se opisati sledećim izrazima:

$$c_{pa} = 1{,}0029 + 5{,}4 \cdot 10^5\, t \quad (3)$$

$$c_{pv} = 1{,}856 + 2{,}0 \cdot 10^4\, t \quad (4)$$

Entalpija nezasićenog vazduha može se prikazati kao:

$$h = (1{,}0029 + 5{,}4 \cdot 10^5\, t)\, t + \times 2.500{,}84 + \\ + (1{,}856 + 2{,}0 \cdot 10^4\, t)\, t \quad (5)$$

Ova formulacija entalpije pogodna je za korišćenje u temperaturskim opsezima od –40 °C do 300 °C. Što se tiče barometarskog pritiska, opseg je od 0,1 do 5 bar. Za vrednosti pritisaka predložena jednačina daje dobre rezultate za većinu tehničkih proračuna.

Specifična promena entalpije vazduha, kao jedan od najznačajnijih pokazatelja energetske performanse DVF, definiše se kao:

$$E_{h,m2} = \rho(t)v(\tau)\left[\int_0^{\tau} h_I(\tau)d\tau - \int_0^{\tau} h_{III}(\tau)d\tau\right] \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (6)$$

$$E_h = A\, E_{h,m2} \text{ (kWh)} \quad (7)$$

$E_{h,m2}$ (6), predstavlja časovne vrednosti koje opisuju fluktuaciju energije vazduha u međuprostoru fasade, specificiranu po površini poprečnog preseka (m^2). Ukupna količina apsorbovane energije vazduha u DVF izražena je jednačinom (7). Predlozi budućih operativnih i kontrolnih strategija integracije DVF mogu se oceniti preko sledećeg bilansa:

$$E_u = \rho(t)v(\tau)\left[\int_0^{\tau} h_{I-III}(\tau)d\tau - \int_0^{\tau} h_p(\tau)d\tau\right] \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (8)$$

gde su:

$E_{h,m2}$ – specifična promena entalpije vazduha apsorbovane u DVF [kWh/m^2];
E_h – toplotna energija vazduha apsorbovana u DVF [kWh];
E_u – specifična promena entalpije vazduha u fasadi i prostoriji (potencijal uštede energije prilikom prirodne ventilacije) [kWh/m^2];
$v(\tau)$ – brzina vazduha u DVF u posmatranom trenutku [m/s];
A – površina poprečnog preseka DVF, 25·0,56 = 14 [m^2];
h_I – entalpija vazduha u donjoj (prvoj) zoni DVF [kJ/kg];
$h_{I–III}$ – entalpija vazduha u I, II ili III zoni DVF [kJ/kg];
h_p – entalpija unutrašnjeg vazduha u projektnim uslovima [kJ/kg];
ρ – gustina vazduha [kg/m^3];
τ – vreme [s].

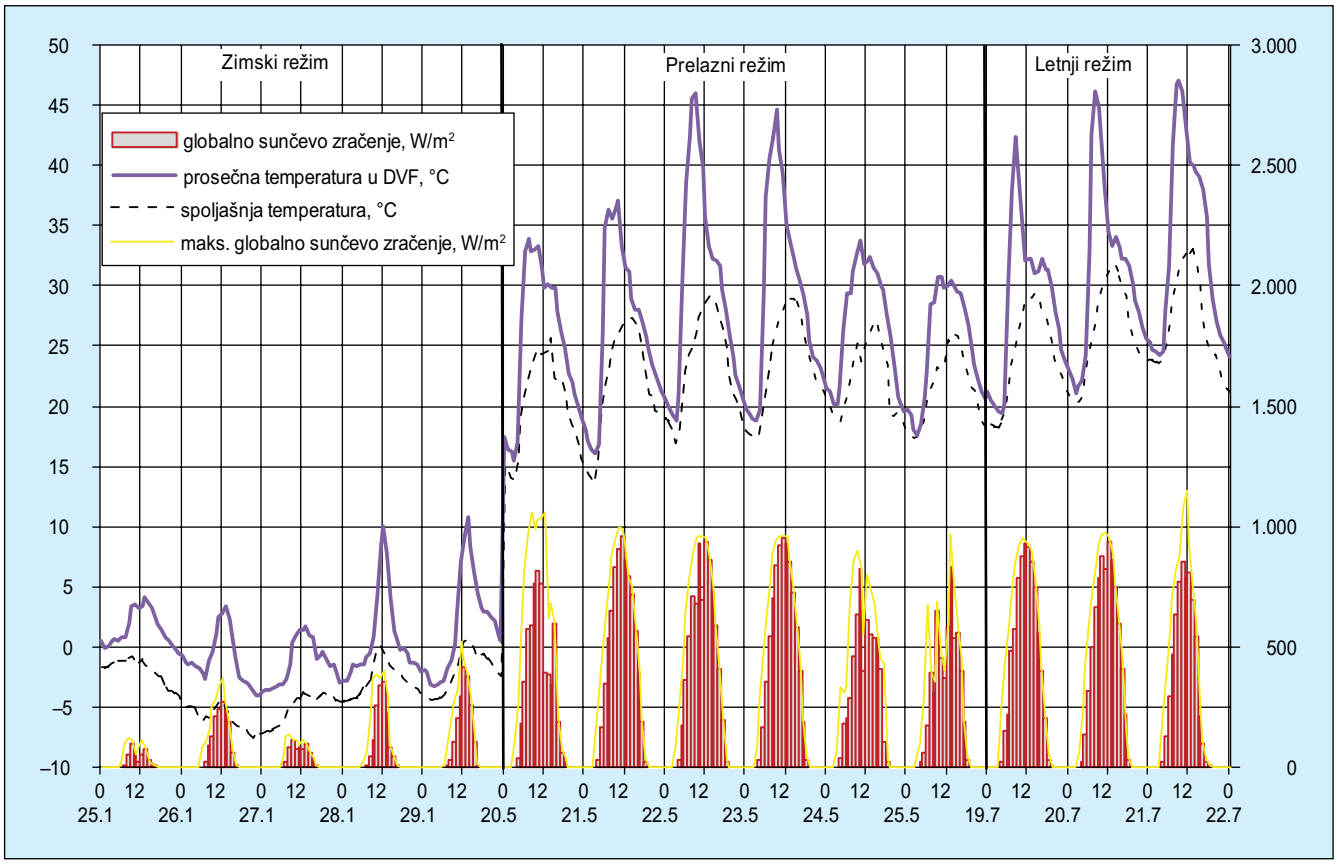
Na osnovu izračunatih časovnih bilansa (8) svih posmatranih zona DVF i njihovih referentnih zona u objektu, dobijeni rezultati ocenjuju energetski potencijal prirodne ventilacije objekta. Svi proračuni časovnih vrednosti entalpija i ostalih bilansa urađeni su pisanjem programskog koda u MS Excel-u, korišćenjem VBA („Visual Basic for Application“). Numerička integracija u Excel-u rešena je korišćenjem trapezoidnog pravila.

4. Zaključci izvršenih merenja

Osnovni zadatak izvršenih merenja je da se utvrdi trenutno stanje izabranog dela omotača objekta sa DVF. Dobijeni rezultati su iskorišćeni kako bi se stepen efektivnosti i kvantifikovao. Eksperimentalni rezultati pokazuju zimski, prelazni i letnji način termičkog ponašanja posmatrane fasade. Kako otvori na ulazu i izlazu fasade nisu regulisani, ponašanje fasade je u tesnoj vezi sa trenutnim spoljašnjim uslovima (unutrašnji uslovi se mogu pretpostaviti da su konstantni u toku posmatranog režima). Iz tog razloga, rezultati pokazuju da energetska efikasnost fasade nije u potpunosti dostignuta. Glavni problemi nastali su prilikom izbora projektnog rešenja, čiji je osnovni cilj bio težnja za estetikom i smanjenjem spoljašnje buke. Kasnije su se konstatovali i problemi sa nerazumevanjem osnovnih radnih principa ovog tipa fasade.

Na osnovu izvršenih merenja na objektu VIG Plaza, mogu se izvesti sledeći zaključci (slika 4):

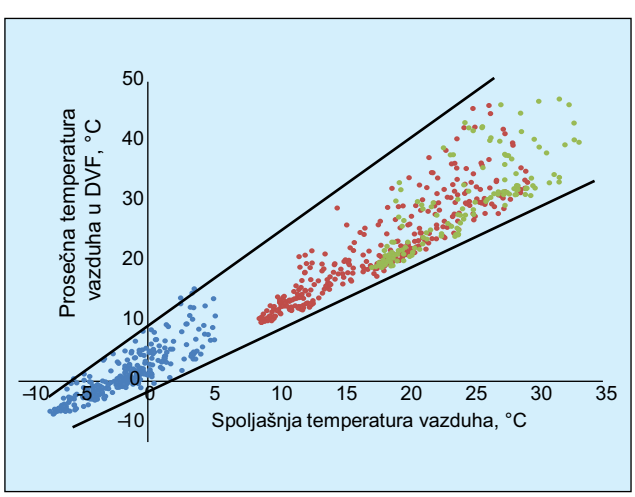
– U toku zime, temperature u međuprostoru fasade su malo više u odnosu na spoljašnje vrednosti. Vertikalni termički gradijent je više naglašen u toku perioda sa intenzivnijim sunčevim zračenjem. Brzina strujanja vazduha u fasadi najviše zavisi od uticaja vetra i u slučaju ekstremnih brzina (20 m/s) dokazano je da fasada u velikom meri eliminiše negativne efekte. Termovizijskim ispitivanjem prikazane su razlike u transmisionim gubicima u odnosu na tip omotača sa „zid-zavesom“. Analizom su potvrđene niže vrednosti gubitaka kod DVF i veoma male horizontalne i vertikalne devijacije temperatura po površini fasade. Zaključeno je da je neophodna regulacija otvora fasade u smislu još boljeg „buffer“ efekta fasade.
– Prelazni (prolećni) režim predstavlja period sa najboljim karakteristikama efektivnosti fasade. Umereni spoljašnji uslovi su glavni razlog tome. U ekstremnim slučajevima (niže ili više spoljašnje temperature i vrednosti insolacije), neophodni su regulacija otvora ili prikladna noćna ventilacija, kako bi se eliminisali negativni efekti pothlađenja ili pregrevanja vazduha u fasadi.
– U toku leta, međuprostor fasade je u određenim periodima pregrejan. Zbog toga je količina indirektnih solarnih dobitaka povećana, što negativno utiče na termičku ugodnost u blizini prozora. Tokom ovog perioda, neophodno je sniziti vrednosti temperatura u fasadi prikladnim operativnim strategijama. Pod tim se podrazumeva povećanje brzine strujanja vazduha u fasadi (ubrzano odvođenje toplote), noćno provetravanje ili povezivanje sa sistemom KGH. Zaključak je da za dobre performanse DVF, inženjeri moraju napraviti kompromis i optimizovati prirodne (razlika temperatura između delova DVF) i prinudne (uticaj vetra) efekte konvekcije. Takođe treba naglasiti da se u toku leta regulisanim venecijanerima i adekvatnim spoljašnjim zastakljenjem praktično eliminišu dobici nastali direktnim prodiranjem sunčevog zračenja. Budućim energetskim simulacijama neophodno je formirati bilans energije, koji predstavlja odnos negativnog (pregrevanje vazduha u međuprostoru fasade) i pozitivnog efekta (eliminisanje dobitaka toplote nastalih prodo-



Slika 4. Izabrani periodi zimskog, prelaznog i letnjeg režima

rom sunčevog zračenja), kako bi se doneo zaključak o uticaju DVF u letnjem režimu.

Na slici 5 prikazana je detaljnija veza između prosečne temperature vazduha u DVF i spoljašnje temperature za sva tri režima. Plave tačke predstavljaju zimski, crvene prelazni, a zelene letnji režim. Primećuje se da veće temperaturske razlike nastaju u prelaznom i letnjem režimu. Ove razlike su posledica većih dnevnih temperaturskih fluktuacija u toku proleća i leta.

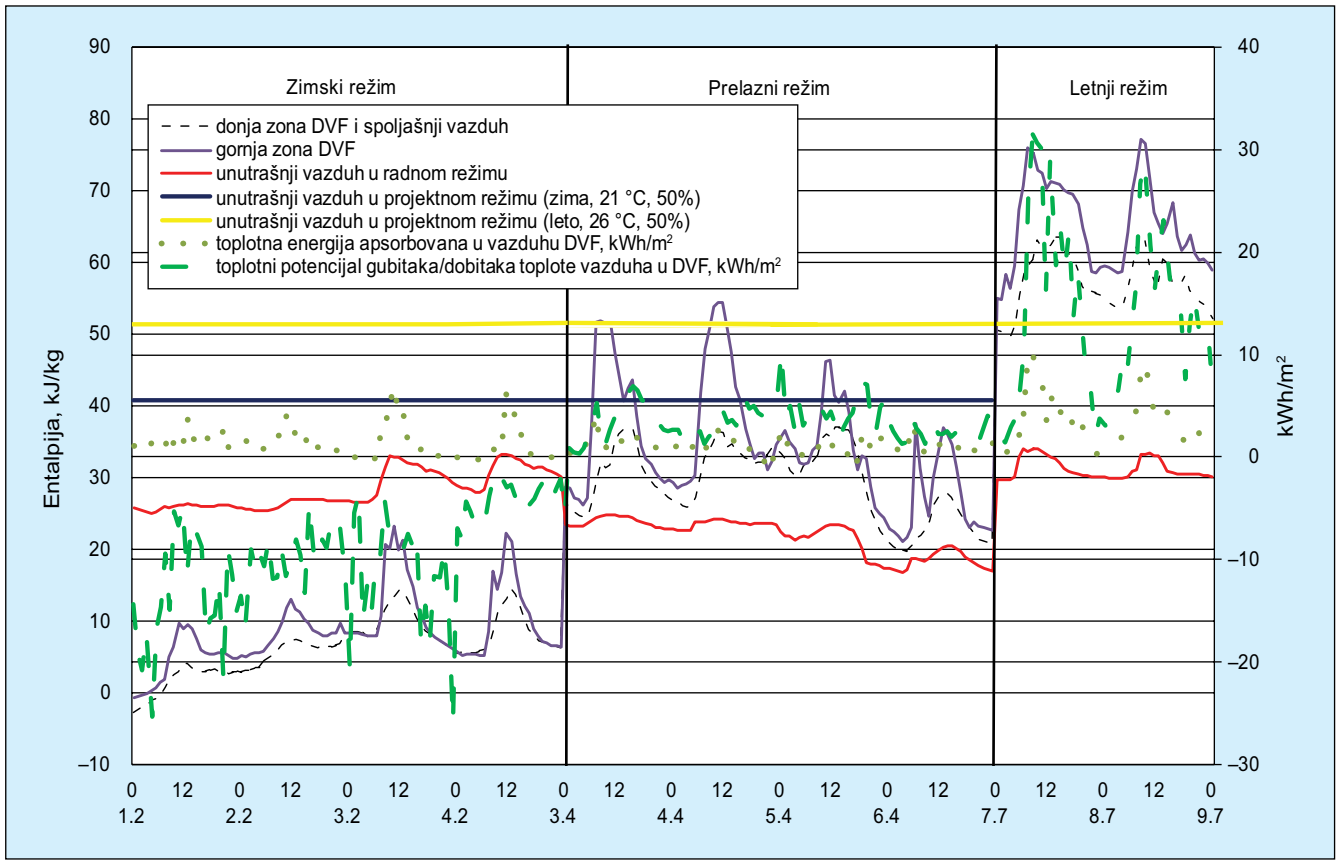


Slika 5. Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha za sve režime

Prateći predstavljenu metodologiju, analizom energetske efikasnosti DVF u toku svih režima, može se zaključiti sledeće (slika 6):

– Za izabrani deo zimske sezone, primećuje se da je apsorbovana energija u većini slučajeva pozitivna, što dovodi do smanjenja toplotnih gubitaka objekta. Časovne vrednosti specifične promene entalpije su u intervalu od 0,9 do 7 kWh/m^2. Međutim, nakon analize stanja vazduha u međuprostoru i u samom objektu, očigledan je zaključak da ne postoje uslovi za prirodnu ventilaciju. Operativnim strategijama regulacije otvora fasade ili njenim povezivanjem sa sistemom KGH, moguće je podići energetski nivo posmatranog vazduha.
– Posmatranjem prelaznog režima utvrđuje se da ovaj period predstavlja deo godine sa najvećim mogućnostima za uštedu ovog fasadnog rešenja. Veći deo vremena časovne vrednosti specifične promene entalpije su bliske 0 kWh/m^2, što oslikava slične uslove vazduha u prostoriji i u fasadi. Kao dodatak mogu se primetiti periodi sa blagim pregrevanjem ili pothlađivanjem, koji se mogu efikasno izbeći regulacijom otvora ili tehnikama noćne ventilacije.
– U toku dela leta sa ekstremno visokim temperaturama i vrednostima insolacije, entalpije vazduha u fasadi su više od vrednosti spoljašnjeg vazduha ili vazduha u prostoriji. Časovne vrednosti specifične promene entalpije vazduha u fasadi su u intervalu od 0,2 do 10 kWh/m^2. U ekstremnim slučajevima, kada se posmatra odnos sa vazduhom u prostoriji, vrednosti su još više i idu i do 32 kWh/m^2. Rezultati prikazuju veću količinu indirektnih solarnih dobitaka toplote. Takođe, treba napomenuti da zbog primenjenih mera regulacije venecijanera i dobro izabranog spoljašnjeg zastakljenja, direktni solarni dobici su u velikoj meri eliminisani.

Da bi se procenili trenutni energetski potencijali DVF za prirodnu ventilaciju, formiran je indikator efektivnosti. Za ovaj indikator izabran je parameter E_u, čije vrednosti predstavljaju trenutno energetsko stanje vazduha u DVF u odnosu na



Slika 6. Energetske karakteristike DVF za izabrane periode zimskog, prelaznog i letnjeg režima

stanje vazduha u prostoriji. Na ovaj način može se odrediti trenutni energetski potencijal vazduha u fasadi za prirodnu ventilaciju.

Da bi se detaljnije odredio energetski potencijal prirodne ventilacije, vrednosti indikatora su podeljene u tri grupe:

– E_u < –4 kWh/m^2, relativno niske vrednosti indikatora i bez potencijala za prirodnu ventilaciju – vazduh u fasadi je pothlađen;
– –4 ≤ E_u ≤ 4 kWh/m^2, umerene vrednosti indikatora i visok potencijal prirodne ventilacije;
– E_u > 4 kWh/m^2, relativno visoke vrednosti indikatora i bez potencijala za prirodnu ventilaciju – vazduh u fasadi je pregrejan.

Na osnovu izračunatih časovnih vrednosti indikatora i podele na predložene grupe, može se zaključiti sledeće:

– u toku zime, 98% perioda je sa relativno niskim vrednostima indikatora. Samo u nekoliko perioda u toku marta meseca vrednosti indikatora su umerene. Zaključak je da u toku zime nema energetskog potencijala za prirodnu ventilaciju;
– za vreme prelaznog režima, vrednosti indikatora su umerene u 64% ukupnog vremena. Postoje periodi u toku marta i aprila sa relativno niskim vrednostima (15%) i intervali u maju i junu, sa relativno visokim vrednostima (21%). Zaključak je da prelazni režim u većem delu vremena ima dobar energetski potencijal za prirodnu ventilaciju;
– leto predstavlja period u kojem su vrednosti indikatora relativno visoke (61% celog perioda). U većini slučajeva u toku noći i u nekoliko perioda u junu i julu, vrednosti indikatora su umerene. Zaključak je da u toku leta postoji rizik od pregrevanja, koji se može umanjiti efektom noćne ventilacije.

Ovako prikazana analiza ukazuje da najveći procenat energetskog potencijala za prirodnu ventilaciju predstavlja prelazni režim. Neophodnost regulacije otvorenosti fasade i tehnike noćne ventilacije umnogome mogu doprineti smanjenju gubitaka odnosno rizika od pregrevanja vazduha u DVF. Treba naglasiti da postoji značajna energetska razlika između zona u DVF zbog postojanja vertikalnog termičkog gradijenta. U tom smislu, prva (donja) zona ima najmanji potencijal smanjenja zimskih gubitaka toplote, ali sa druge strane ima i najmanji rizik od pregrevanja. Kako se pomeramo naviše, rezultati za drugu (središnju) i treću (gornju) zonu su u suprotnosti sa prvom. Potencijal za smanjenje toplotnih gubitaka i rizik od pregrevanja su sve veći.

Kao zaključak, raznolikost dobijenih rezultata ukazuje da inženjeri moraju uočiti da prisustvo DVF ne dovodi uvek do smanjenja energetske potrošnje, iako to predstavlja samo jedan, možda i najvažniji, od mnogih projektnih zahteva buduće zgrade [3, 4].

5. Literatura

[1] **Bošnjaković, F.,** *Nauka o toplini*, II dio, IV izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, Hrvatska, 1976.
[2] **Morvay, Z., D. Gvozdenac,** *Applied Industrial Energy and Environmental Management* (Toolbox 6, Wiley-IEEE Press), 2008.
[3] **Anđelković, A.,** *Modeliranje energetskih karakteristika dvostruko ventilisanih fasada*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
[4] **Anđelković, A. i drugi,** *Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin facade,* Energy and Buildings (Elsevier), January 2015, Vol. 86, pp. 766–781.