

Primljen / Received: 22.7.2021.

Ispravljen / Corrected: 29.12.2021.

Prihvaćen / Accepted: 28.2.2022.

Dostupno online / Available online: 10.5.2022.

Utjecaj visine krova na dinamička svojstva djelovanja vjetra kod niskih zgrada kvadratnog tlocrta

Autori:

Mr.sc. **Tingting Liu**, dipl.ing.građ.Sveučilište Northeast Forestry, Harbin, Kina
Građevinski fakultet
liutingting@nefu.edu.cnMr.sc. **Dongzhi Wang**, dipl.ing.građ.Institut kineskog odjela za projektiranje i
istraživanje, Jinan, Kina
wdfzfxr@163.comDr.sc. **Hongfu Zhang**, dipl.ing.građ.Sveučilište Northeast Forestry, Harbin, Kina
Građevinski fakultet
zhanghongfu@nefu.edu.cn

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Dabo Xin**, dipl.ing.građ.Sveučilište Northeast Forestry, Harbin, Kina
Građevinski fakultet
xindabo@nefu.edu.cn

Izvorni znanstveni rad

Tingting Liu, Dongzhi Wang, Hongfu Zhang, Dabo Xin

Utjecaj visine krova na dinamička svojstva djelovanja vjetra kod niskih zgrada kvadratnog tlocrta

Veliko usisavanje inducirano jakim vjetrom na ravnom krovu može izazvati ozbiljna lokalna oštećenja ili čak prevrtanje čitavog krova. Krovna visina značajno utječe na svojstva velike sile usisavanja vjetra. U ovom radu ispitan je utjecaj tlaka vjetra na ravne krovove različitih visina. Ekstremne vrijednosti pristiska vjetra i njegov položaj prvi su proučavani i to pri različitim kutovima djelovanja vjetra. Provedene su pravilna ortogonalna dekompozicija (POD) te analize funkcije koherentnosti kako bi se analizirala dinamička svojstva. Rezultati pokazuju da se povećanjem krovnih visina povećava i lokalni ekstremni tlak. Povećava se i oscilacija područja odvajanja te postoji i nadmetanje između prvih dvaju modova POD-a. Nasuprot tome, krovne visine imaju manji utjecaj na ljevokaste vrtloge. Štoviše, na krovu su proučavana i dva usklađena područja (ljevokasta vrtloga). Iako ta dva područja imaju male vrijednosti korelacijskih koeficijenata, imaju veliku koheziju pri niskim frekvencijama. Dobiveni rezultati mogu pomoći pri boljem razumijevanju utjecaja velikog usisavanja na ravne krovove te potencijalno omogućiti izbjegavanje šteta na krovovima koje nastaju snažnim usisavanjem vjetra.

Ključne riječi:

pritisak vjetra, ravan krov, ljevokasti vrtlozi, različite krovne visine

Original scientific paper

Tingting Liu, Dongzhi Wang, Hongfu Zhang, Dabo Xin

Effect of roof heights on dynamic characteristics of wind pressure on square low-rise buildings

The high suction induced by strong wind on a flat roof can result in severe local damage or even in the overturning of the entire roof. The roof height has a significant effect on characteristics of the high wind suction force. The wind pressure on flat roofs of various heights is investigated in this paper. The extreme wind pressure and its position are firstly studied at different wind incidence angles. Proper orthogonal decomposition (POD) and coherence function analyses are then conducted to analyse dynamic characteristics. The results show that the local extreme pressure increases with an increase in roof height. The fluctuation of the separation bubble also increases, and there exists a mode competition of the first two POD modes. On the contrary, the roof height has fewer effects on conical vortices. In addition, two coherent regions (conical vortices) are observed on the roof. Although these two regions have small correlation coefficients, they have a considerably high coherence function at low frequency. These results are expected to contribute to better understanding of high suction characteristics on flat roofs, and can potentially provide guidance for avoiding roof damage induced by strong wind suction.

Key words:

wind pressure, flat roof, conical vortices, various roof heights

1. Uvod

Zbog porasta potrebe za niskim zgradama te zgradama dugog raspona (terminali, industrijske radionice, itd.), u velikoj mjeri grade se niske zgrade ravnog krova s manjim omjerom širine i visine. Niske zgrade, koje se nalaze na dnu atmosferskog graničnog sloja, imaju složeni protok i aerodinamička svojstva. Zbog oštrog ruba, odvajanje protoka uvijek se događa blizu glavnog ruba krova i vodi do nepovoljnog gradijenta tlaka niz rub krova [1, 2]. Odvajanje protoka poprečnog sloja koje je posljedica nepovoljnog gradijenta tlaka popraćeno je stvaranjem različitih vrsta vrtloga od kojih su najpoznatiji odvojeni vrtlog i ljevkašti vrtlog [3, 4]. Kada je smjer vjetra okomit na glavni rub, odvajanje vrtloga koje vodi do velikog usisavanja uvijek nastaje blizu glavnog ruba. Kada smjer vjetra djeluje koso u odnosu na glavni rub, ljevkašti vrtlozi se stvaraju [5] izazivajući povećana opterećenja vjetrom. Te dvije kohezijske strukture na krovu, a čija je posljedica vršno usisavanje (ekstremna vrijednost negativnog pritiska), mogu uzrokovati ozbiljnu štetu za građevine ili čak prouzročiti prevrtanje čitavog krova u situaciji kada krovni sustav nije dovoljno čvrst [6, 7]. Štoviše, složeni vrtlozi koji djeluju na niske zgrade uvijek izazivaju neujednačenu raspodjelu djelovanja vjetra na krovu. Drugim riječima, opterećenje vjetra usko je povezano uz vrtloge na krovu. Prema tome, potrebno je proučavanje opterećenja vjetrom i svojstava polja protoka kada je riječ o krovovima niskih zgrada.

Brojni istraživači ispituju odvajanje vrtloga i ljevkašte vrtloge [8-10] zbog toga što je lokalno djelovanje vjetra usko povezano s te dvije kohezijske strukture. Vrtlog odvajanja nastaje kada se nadolazeći protok vjetra odvađa od glavnog ruba zgrade, a snažno usisavanje nastaje u blizini glavnog ruba ravnog krova. Kim je kvantificirao karakteristične dimenzije odvajanja vrtloga u različitim poprečnim presjecima trodimenzionalne prizme i to primjenom metode brzine polja protoka (eng. *particle image velocimetry* - PIV) [8]. Ustanovljeno je da se maksimalna turbulentna kinetička energija pojavljuje u sloju odvajanja na gornjoj granici odvajanja vrtloga blizu glavnog ruba ploče na vrhu, a magnituda maksimalne energije iznosi približno 2,5 puta pratećeg područja. Pratt i Kopp istražili su odvajanje vrtloga i inducirani pritisak vjetra na nisku zgradu i to primjenom usklađenog tlaka i mjerenjima brzine [9]. Zaključili su da su vršni pritisci na različitim površinama i lokacijama krova povezani s duljinama ponovnog spajanja ili s odvajanjem vrtloga različite veličine. U blizini glavnog ruba duljine ponovnog spajanja (veličina odvajanja vrtloga) tih područja povezane su s veličinom površine i lokacijom područja. Kada je u pitanju malo područje u blizini glavnog ruba, ponovno spajanje događa se na približno 20 % srednje duljine ponovnog spajanja. Vršno usisavanje povezano je s lokalno ubrzanom protokom vjetra u blizini glavnog ruba zgrade, a čija vrijednost ovisi o veličini i lokaciji područja na krovnoj površini na koje djeluje pritisak od vjetra. Akon i Kopp su ispitivali utjecaj intenziteta turbulencije i debljine graničnog sloja na srednju vrijednost duljine ponovnog spajanja kod niskih zgrada primjenom PIV metode [10]. Zaključeno je da na srednju

vrijednost veličine odvajanja vrtloga na krovu nije utjecala duljina turbulencije, dok je intenzitet turbulencije značajno utjecao na duljinu ponovnog spajanja. Do stvaranja ljevkaštog vrtloga dolazi zbog protoka zraka ispuštenog s vertikalnih strana koji se zaokreće prema gore. Pozicija ljevkaštog vrtloga i njegova svojstva posljednjih se godina više proučavaju. Lin i dr. proveli su mjerenja vezana uz djelovanje vjetra na modele ravnih krovova različitih visina i veličina u zračnom tunelu. Otkrili su da se sila usisavanja koja prati smjer vjetra eksponencijalno smanjuje pod djelovanjem ljevkaštog vrtloga [12].

Na temelju analize srednje i oscilirajuće vrijednosti pritiska vjetra na niske zgrade, Kawai i Nishimura ispitivali su jezgru vrtloga i položaj ponovnog spajanja ljevkaštog vrtloga na ravni krov i to djelovanjem ujednačenih i turbulentnih polja protoka [13]. Zaključili su da dva najčešća oblika kretanja osi ljevkaštog vrtloga su niskofrekventno njihajuće kretanje te visokofrekventno rotacijsko kretanje. Kut između osi ljevkaštog vrtloga i krovnog ruba u smjeru vjetra kod glatkog toka je veći nego onaj kod turbulentnog toka. Marwood i Wood proveli su sinkronizirana mjerenja pritiska na modelu kocke i otkrili da se ljevkašti vrtlog konstantno mijenjao u horizontalnim i vertikalnim smjerovima [14]. Chun i dr. ispitivali su djelovanje ljevkaštog vrtloga na ravni krov niske zgrade kako bi došli do podataka vezanih uz volumno polje vrtloga, polje brzine te turbulentnu kinetičku energiju vrtloga pri raznim kutovima djelovanja vjetra i to primjenom PIV metode [15]. Rezultati pokazuju da je djelovanje vjetra pod kutom od 30° najnepovoljniji smjer djelovanja vjetra, a volumen vrtloga i turbulentna kinetička energija jednosmjernog ljevkaštog vrtloga postižu maksimalnu vrijednost u svim slučajevima. Sun i Ye ispitivali su ljevkašte vrtloge koji nastaju u kutovima ravnih krovova dugih raspona i to primjenom PIV metode [16]. Pozicija glavnog ruba koja odgovara negativnoj vršnoj vrtložnosti i maksimalnoj kinetičkoj energiji turbulencije nalazi se u središtu ljevkaštog vrtloga. Pritisak vjetra doseže svoju maksimalnu vrijednost blizu kuta glavnog ruba krova, a trokut snažne zone usisavanja pojavljuje se nizvodno. Kozmar je proučavao površinski tlak na kockastoj zgradi izloženoj ljevkaštim vrtložima [5]. Otkrio je da se veću srednju vrijednost usisavanja može uočiti na vrhu kockaste površine u manje turbulentnom graničnom sloju. Povećanjem turbulencije područje snažnog usisavanja se smanjuje, a koeficijent oscilacije pritiska bio je veći u turbulentnijim protocima.

Oblik niske zgrade značajno utječe na vrtloge i opterećenja vjetrom koja utječu na njen krov [17, 18]. Visina krova jedan je od najvažnijih čimbenika koji utječu na polje protoka oko niske zgrade. Mnoga istraživanja pokazuju da visina krova značajno utječe i na vrtložne strukture kod građevina. U slučaju visokih i srednje visokih zgrada još je važniji utjecaj visine na polje protoka te poprečne i uzdužne sile vjetra na zgradu. Primjenom tehnika vizualizacije strujanja putem generatora dima, otkrivene su dvije vrste vrtloga kojima se oblikuju ili gube zidni cilindri [19]. U slučaju kad je omjer visine i širine veći od 2 prevladava smanjenje vrtloga tipa Kármán; inače je vjerojatnije smanjenje vrtloga u obliku luka. Wang i dr., primjenom PIV metode, istraživali su tipičnu topologiju

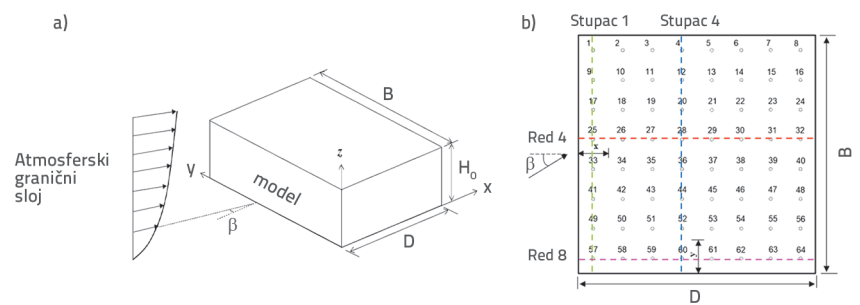
protoka u slučaju smanjenja vrtloga tipa Kármán i vrtloga u obliku luka na primjeru dvaju modela prizmi veće dubine, a čiji su omjeri visine i širine 2 i 6 [20]. Elsharawy i dr. proveli su ispitivanja pritiska vjetra s različitim smjerovima vjetra i to na četiri modela zgrade (s punim visinama: 6, 12, 25 i 50 m) te pri različitim visinama na otvorenom području kako bi se procijenili trenutačni posmik na dnu građevine i torzijski momenti koji se koriste kako bi se dobile srednje i najviše vrijednosti posmičnih i torzijskih koeficijenata za različite visine [21].

Sumner i dr. istražili su utjecaj omjera visine i širine na polje protoka i to numeričkom simulacijom [22]. Zaključeno je da kritični omjer visine i širine prizme iznosi 3, te da je polje protoka oko prizme znatno drugačije ispod kritičnog omjera visine i širine prizme.

Međutim, u slučaju niskih zgrada s ravnim krovom, još uvijek se nije sustavno proučio utjecaj visine krova na polje protoka i površinski tlak krova. Osim toga, niske zgrade s ravnim krovom koji imaju manji omjer širine i visine poput industrijskih postrojenja grade se vrlo često; stoga je potrebno i vrlo važno provesti detaljnu analizu vezanu uz karakteristike dinamičkog djelovanja vjetra na takvim krovovima. Takva analiza može omogućiti izbjegavanje štete na krovu koja nastaje jakim usisvanjem vjetra. U ovom istraživanju sustavno se proučava utjecaj pritiska vjetra na površinama ravnih krovova različitih visina. U prvom dijelu rada proučavaju se ekstremne vrijednosti tlaka, te srednje i oscilirajuće vrijednosti tlaka. Zatim se provode POD analiza te analiza funkcije koherentnosti kako bi se proučile dinamičke karakteristike ravnih krovova različitih visina.

2. Postav eksperimenta i prikupljanje podataka

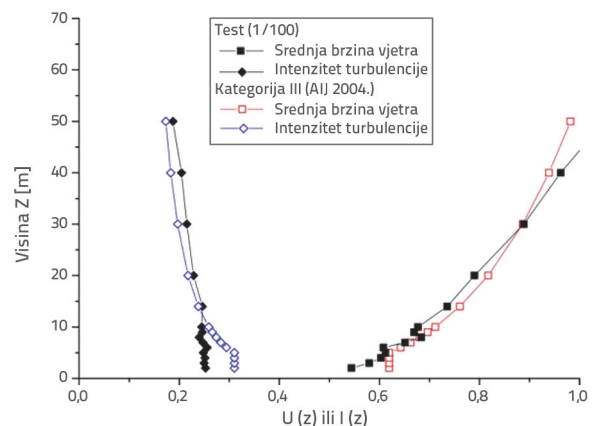
Ispitivanja u zračnom tunelu s ciljem da se izmjeri pritisak vjetra na niskim zgradama za ovu bazu podataka i to u graničnom sloju provedena su na Politehničkom sveučilištu u Tokiju u Japanu, više detalja može se pronaći u [23]. Zračni tunel je širok 2,2 m te visok 1,8 m. Omjer duljine je definiran sa 1/100. Kako je brzina definirana s omjerom 1/3, omjer kod jedinice vremena može se procijeniti sa 3/100. Referentna visina definirana je kao visina koja se nalazi 10 cm iznad poda. Ideja je simulirati područje japanskog predgrađa kao granični sloj u aerotunelu koji odgovara tipu III terena prema Japanskom arhitektonskom institutu (eng. *Architectural Institute of Japan - AIJ*). Indeks srednje vrijednosti brzine vjetra za ovu kategoriju iznosi 0,2 (vidi sliku 2.), visina nagiba iznosi 450 m. Na slici 2., $U(z)$ i $I(z)$ označavaju brzinu vjetra i intenzitet turbulencije na visini Z . Srednja vrijednost brzine vjetra i intenzitet turbulencije mjereni su se u središtu okretne aerotunelu. Takav utjecaj se simulirao uz pomoć generatora turbulencije, elemenata hrapavosti te tepiha koji je postavljen uzvodno



Slika 1. a) Geometrijski parametri i koordinatni sustav modela; b) Položaj izvoda za mjerenje na ravnom krovu

u odnosu na područje zračnog tunela u kojem se provodi ispitivanje. Intenzitet turbulencije na referentnoj visini iznosi 25 %. Ispitivana brzina vjetra na referentnoj visini iznosi oko 7,4 m/s, što odgovara brzini otprilike od 22 m/s na visini od 10 m u stvarnoj veličini. Prije ispitivanja pritiska provjerena je ujednačenost protoka po porečnom presjeku zračnog tunela te homogenost u smjeru protoka.

Model za mjerenje pritiska na niskim zgradama prikazan je na slici 1.a. H_0 predstavlja visinu, B širinu, a D dubinu zgrade. Širina modela iznosi 160 mm, a omjer širine i dubine iznosi $B : D = 1 : 1$, dok su omjeri stranica $H_0/B = 1 : 4, 2 : 4, 3 : 4$, te $4 : 4$. Sedam različitih smjerova djelovanja vjetra su mjereni za svaku konfiguraciju: $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ te 90° . Uređaji za mjerenje pritiska vjetra jednoliko su raspoređeni na krovu modela koji se ispituje. Položaji uređaja za mjerenje i njihovi brojevi prikazani su na slici 1.b. Cijevi od sintetičke smole duljine 80 cm s unutarnjim promjerom koji iznosi 1,2 mm povezala je svaki mjerni uređaj sa Scanivalve uređajem za multipleksiranje tlaka, koji može izmjeriti oscilirajući pritisak vjetra gotovo istovremeno u 384 točke. Frekvencija pri kojoj je izvedeno uzorkovanje iznosila je 500 Hz, a uzorkovanje je trajalo 18 sekundi za svaki uzorak što je odgovaralo 15 Hz i 10 minuta u stvarnosti. Svaki slučaj podvrgnut ispitivanju bio je uzorkovan 10 puta. U ovom radu analizirani su podaci o pritisku dobiveni ispitivanjem u aerotunelu na modelu s ravnim krovom.



Slika 2. Simulirana polja vjetra na prigradskom terenu [27]

3. Rezultati i rasprava

3.1. Karakteristike djelovanja vjetra na krovove

U eksperimentu kojem se mjeri pritisak vjetra, koeficijenti pritiska vjetra računaju se kao

$$Cp(i,t) = p(i,t) / p_H \tag{1}$$

gdje je $Cp(i,t)$ koeficijent pritiska vjetra na izvodu za mjerenje i u vremenu t , $p(i,t)$ je tlak izmjeren na referentnoj točki za mjerenje i u vremenu t , a p_H je referentni dinamički pritisak na visini krova, H , gdje $p_H = 0.5\rho V_H^2$. Srednja vrijednost koeficijenta oscilirajućeg tlaka definira se na sljedeći način:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_p(t_i) \tag{2}$$

$$C'_p = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_p(t_i) - \bar{C}_p)^2} \tag{3}$$

Ekstremna vrijednost koeficijenta lokalnog tlaka kao funkcija djelovanja pod kutom β te odgovarajuće oznake lokacije prikazani su na slici 3., gdje $-c_{pmin}$ označava minimalni koeficijent tlaka (ekstremni koeficijent lokalnog tlaka), a c'_{pmax} označava maksimalni koeficijent oscilirajućeg tlaka na model krova. Minimalni tlak $-c_{pmin}$ uzima u obzir funkciju raspodjele vjerojatnosti te se prikladno oblikuje u skladu s koeficijentom Cook-Mayne [24]. Na temelju ekstremnog koeficijenta tlaka tipa I, koeficijent minimalnog tlaka modificira se na sljedeći način:

$$C_{pmin} = \bar{C}_p \times c_{ad} \tag{4}$$

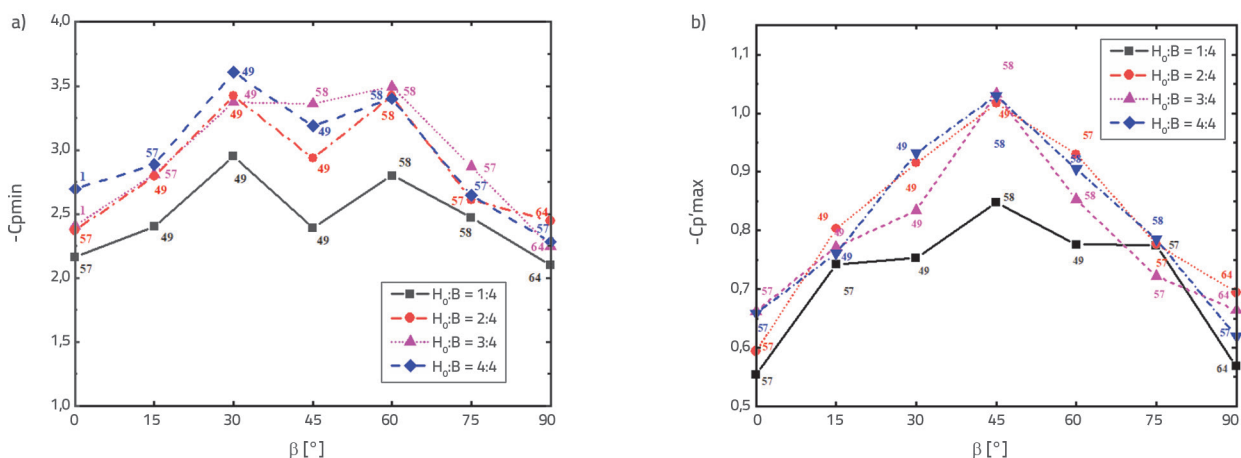
$$c_{ad} = 1 + 0,636 V_x \tag{5}$$

gdje c_{ad} je faktor prilagodbe, V_x je varijabilni koeficijent, $V_x = s/m$.

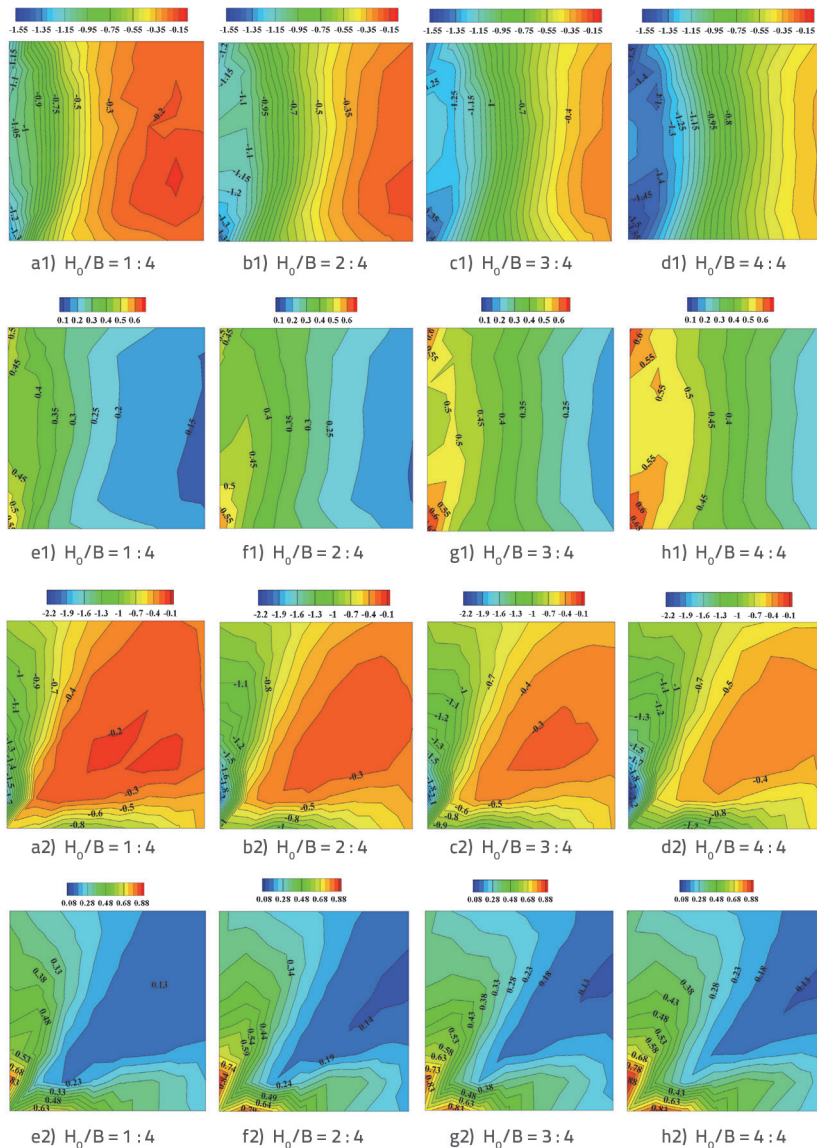
σ je rms-vrijednost ekstrema, a m je srednja vrijednost ekstrema. \bar{C}_p je srednja vrijednost koeficijenta tlaka.

Slika 3.a upućuje na to da je maksimalno usisavanje na razini krova osjetljivije na visinu krova i kut djelovanja vjetra. S druge strane, položaj koeficijenta ekstremnog tlaka ne mijenja se s različitim promjenama visine i kutom djelovanja vjetra, što je uvijek slučaj na rubu (izvod 57) ili na poziciji koja neznatno odstupa od ruba tj. kuta (izvod 49 ili 58). Postoje dvije vršne vrijednosti kada je u pitanju koeficijent ekstremnog tlaka s različitim smjerovima djelovanja vjetra, a maksimalna vršna vrijednost postiže se pod kutom $\beta = 30^\circ$, osim u slučaju kad je $H_0/B = 3 : 4$, čiji položaj neznatno odstupa od kuta (izvod 49), a koji je pokazao rezultate slične onima koje su dobili Kim i dr. te Tieleman [15, 25]. Nadalje, maksimalna vrijednost vršne vrijednosti povećava se s povećanjem omjera visine krova i ta vrijednost doseže 3,6 pri $H_0/B = 4 : 4$. To je dvostruko veća vrijednost od srednje vrijednosti. To upućuje na činjenicu da kad vjetar djeluje pod kutom, tada dolazi do ekstremno jačeg usisavanja vjetra u kutu krova kod veće krovnne visine. Kada je riječ o koeficijentima oscilirajućeg tlaka vjetra, a koji su prikazani na slici 3.b, postoji samo jedna vršna vrijednost za razne β (koji se nalaze pod kutom $\beta = 45^\circ$), a ona se razlikuje od rezultata prikazanih na slici 3.a. Ipak, rezultati u slučajevima gdje je $\beta = 30^\circ$ slični onima prikazanim na slici 3.a. Oscilirajući tlak raste povećanjem krovnne visine.

Slika 4. prikazuje raspodjelu pritiska vjetra na modelu krova u smjeru djelovanja vjetra pod kutom od 0° i 30° . Općenito, ponašanje srednje vrijednosti pritiska dijeli svojstva slična svojstvima oscilirajućeg pritiska u slučaju kad je $\beta = 0^\circ$ i $\beta = 30^\circ$. U slučaju djelovanja vjetra pod kutom od 0° , nadolazeći protok zraka pokraj zgrada i odvajanje vrtloga s velikim negativnim pritiskom i jakim oscilacijama pojavljuje se na glavnom rubu krova kao što je prikazano na slici 4.a.1. Gradijent tlaka je veći i snažniji u blizini glavnog ruba. Nadalje, u kutu se nalaze maksimalne vrijednosti srednjeg i oscilirajućeg tlaka vjetra. Kako se povećava visina krova, povećava se i vrijednost



Slika 3. a) Variranje koeficijenta minimalnog tlaka ($-c_{pmin}$) u slučaju kuta djelovanja vjetra (β); b) Variranje koeficijenta maksimalnog oscilirajućeg tlaka (c'_{pmax}) u slučaju kuta djelovanja vjetra (β). Napomena: vrijednosti su izmjerene na ravnom krovu različitih omjera visine i širine H_0/B

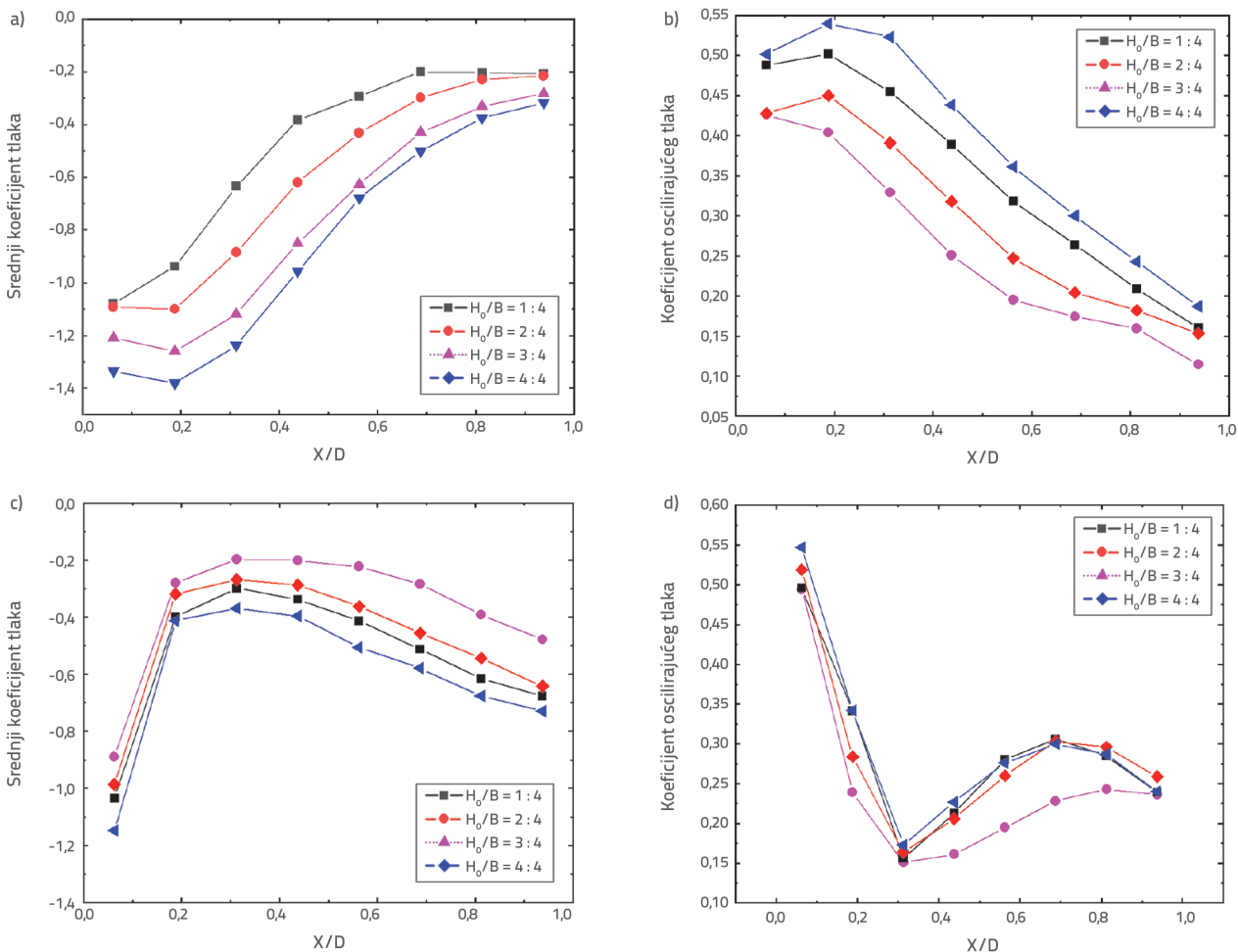


Slika 4. Koeficijenti srednje vrijednosti tlaka vjetra na krov u slučaju kad je $H_0/B = 1:4 - 4:4$ pri smjeru vjetra pod kutom od 0° prikazano je kao (a1) - (d1), i koeficijenti oscilirajućeg tlaka kao (e1) - (h1); pri smjeru vjetra pod kutom od 30° prikazano je kao (a2) - (d2), i koeficijenti oscilirajućeg tlaka kao (e2) - (h2). Oznake na grafovima označavaju vrijednosti koeficijenta tlaka

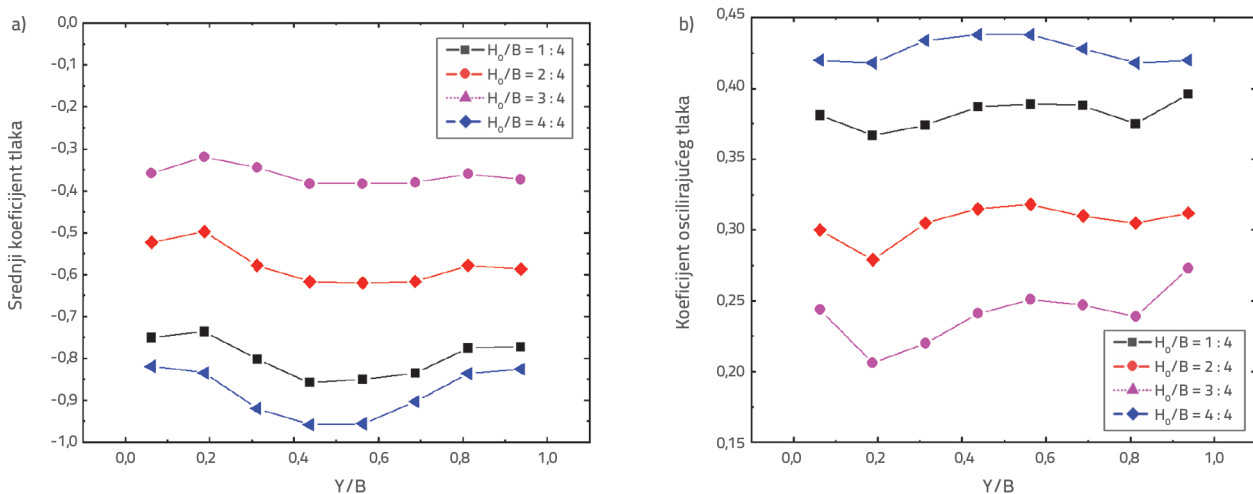
srednjeg i oscilirajućeg tlaka, pogotovo u kutu, a razlog tome su utjecaji bočnog ruba. U slučaju kada je $\beta = 0^\circ$, kut krova pokazuje veće usisavanje na jednoj strani nego na drugoj, a pojavljuju se i dva asimetrična ljevka vrtloga kao što je prikazano na slici 4.a2, i to s većom snagom usisavanja u području vrtloga. Povećanjem krovne visine povećava se i srednja vrijednost pritiska vjetra, a ponašanje postaje sve više asimetrično oko dijagonalne linije, dok isto pravilo ne vrijedi i za oscilirajući tlak. Osim toga, maksimalna vrijednost srednjeg i oscilirajućeg tlaka vjetra događa se na mjestu koje neznatno odstupa od kuta, što može objasniti pojavu koja je prikazana na slici 3.a.

Kako bi se nadalje kvantificiralo djelovanje vjetra na krov, za analizu je odabran pritisak u smjeru vjetra u redu 4. (prikazan na slici 1b). Na slici 5. iscrtane su krivulje koje prikazuju vrijednosti srednjeg i oscilirajućeg tlaka. U slučaju kad je $\beta = 0^\circ$, negativni srednji tlak na krov zapravo je odvajanje vrtloga. Prema tome, odvajanje vrtloga pokriva gotovo čitav krov. Nadalje, izvod za mjerenje udaljen je od glavnog ruba u smjeru vjetra, a usisavanje vjetra i oscilirajući tlak pokazuju padajući trend, kao što prikazuju slike 5.a i 5.b. Štoviše, usisavanje vjetra značajno se povećava povećanjem krovne visine u blizini glavnog ruba ($X/D < 0,4$), a oscilirajući se tlak povećava na cijelom rasponu krova. U slučaju kad je $\beta = 30^\circ$, kako se izvod za mjerenje udaljava od glavnog ruba u smjeru vjetra, usisavanje vjetra i oscilirajući tlak naglo se smanjuju te potom postupno rastu, kao što je prikazano na slikama 5.c i 5.d. Štoviše, usisavanje vjetra i oscilirajući tlak postupno se povećavaju s povećanjem krovne visine. To upućuje na činjenicu da je utjecaj krovne visine na odvajanje vrtloga veći nego kod ljevkastih vrtloga. Drugim riječima, odvajanja vrtloga na krovu osjetljivija su na krovnu visinu niske zgrade nego što je to slučaj kod ljevkastih vrtloga.

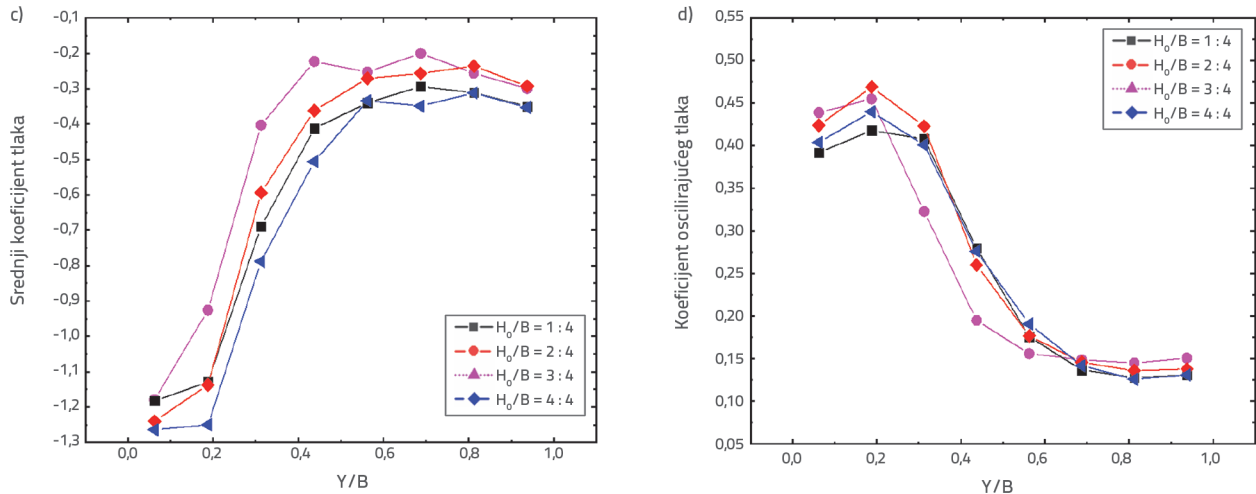
Za potrebe analize odabran je pritisak u smjeru vjetra u stupu 4. (prikazan na slici 1.b). Na slici 6. iscrtane su krivulje koje prikazuju vrijednosti srednjeg i oscilirajućeg tlaka. U slučaju kad je $\beta = 0^\circ$, odvajanje vrtloga odvija se preko čitavog glavnog ruba. Zbog utjecaja bočnog ruba na odvajanje vrtloga, usisavanje vjetra i oscilirajući tlak na unutarnjem dijelu neznatno su veći nego oni koji su blizu bočnog ruba, kao što to prikazuju slike 6.a i 6.b, što upućuje na to da je odvajanje vrtloga slabije blizu bočnih rubova. Štoviše, usisavanje vjetra i oscilirajući tlak značajno se povećavaju s povećanjem omjera visine i širine. Međutim, u slučaju kad je $\beta = 30^\circ$, usisavanje vjetra i oscilirajući tlak malo se mijenjaju s povećanjem krovne visine. To potvrđuje da su odvajanja vrtloga na krovu osjetljivija na krovnu visinu niske zgrade nego što je to slučaj s ljevkastim vrtlozima. Ukupna sila odizanja osjetljivija je na visinu niske zgrade pod kutom $\beta = 0^\circ$ nego pod kutom $\beta = 30^\circ$.



Slika 5. Raspodjela koeficijenata srednjeg i oscilirajućeg tlaka kod različitih H₀/B: a) 0° kut vjetra; b) 0° kut vjetra; c) 30° kut vjetra; d) 30° kut vjetra



Slika 6. Raspodjela koeficijenata srednjeg i oscilirajućeg tlaka različitih H₀/B: a) 0° kut vjetra; b) 0° kut vjetra (prvi dio slike 6.)



Slika 6. Raspodjela koeficijenata srednjeg i oscilirajućeg tlaka različitih H_0/B : c) 30° kut vjetra; d) 30° kut vjetra (nastavak slike 6.)

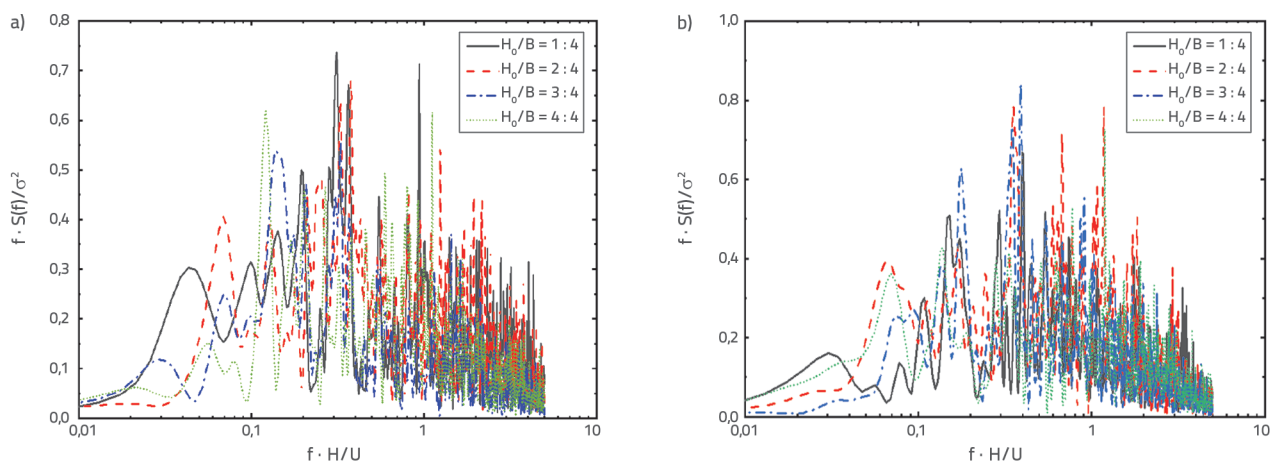
3.2. Spektar snage pritiska vjetra

Spektri snage oscilirajućeg vjetra za ekstremno negativni pritisak vjetra u smjeru vjetra pod kutom 0° izmjeren na izvodu 1, odnosno u smjeru vjetra pod kutom 30° izmjeren na izvodu 49 prikazani su na slikama 7.a i 7.b za različite visine krova. Ovdje je $f \cdot H/U$ izraz za bezdimenzijsku frekvenciju, a $f \cdot S(f)/\sigma^2$ predstavlja vrijednost bezdimenzijskog spektra vlastite snage. f je frekvencija, H je visina krova, a U je brzina vjetra na krovnoj visini. $S(f)$ je izvod za mjerenje djelovanja vjetra u samom spektru, a σ^2 je oznaka za promjenu oscilirajućeg tlaka vjetra. Horizontalne koordinate izražene su logaritmičkim koordinatama kako bi se jasno moglo uočiti propadanje krivulje i raspodjela energije. Spektar snage oscilirajućeg vjetra na izvodu 1 ima očite karakteristike širokog spektra pri djelovanju vjetra pod kutom od 0° . Vršna vrijednost se pojavljuje pri $f \cdot H/U \approx 0,3$ u slučaju kad je $H_0/B = 1 : 4$, što podrazumijeva prevladavanje turbulentne komponente malih razmjera. Povećanjem visine krova, vršna vrijednost spektra pomiče se sa srednje frekvencije na nisku frekvenciju, pogotovo

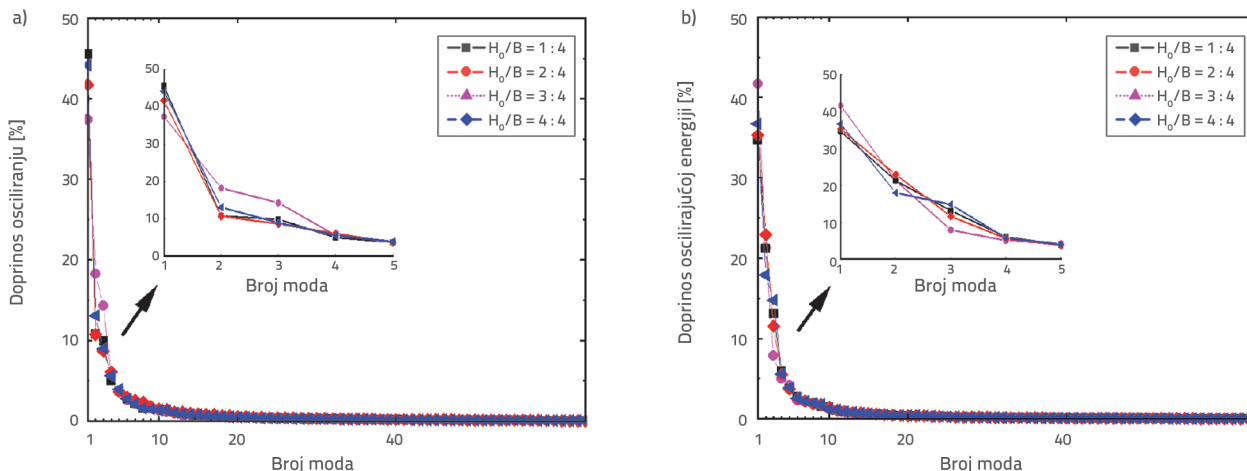
u slučaju kad je $H_0/B = 4 : 4$ s $f \cdot H/U \approx 0,12$. To pokazuje da se postupno smanjuje komponenta turbulencije malog razmjera, a da se postepeno povećava komponenta turbulencije velikog razmjera. Komponenta turbulencije malog razmjera nastaje uslijed nekvalitetnog ponovnog spajanja te tijekom nastanka područja odvajanja, što upućuje na to da se odvajanje vrtloga povećava povećanjem krovne visine te se postupno povećava i omjer. Položaji na kojima se nalaze vršne vrijednosti spektra nemaju definiran jasan propis u slučaju udara vjetra pod kutom od 30° te se svi pojavljuju na srednjoj i visokoj frekvenciji. Najveći dio energije vjetra pretvara se u visokofrekvencijsko rotacijsko gibanje ljevkastog vrtloga.

3.3. POD analiza oscilirajućih polja tlaka

POD (eng. *Proper orthogonal decomposition*) je metoda prostorno-vremenske analize kojom se raščlanjuje strukturno polje djelovanja vjetra na glavne koordinate ovisne o vremenu te na vlastite oblike ovisne o prostoru. Kako bi se detaljnije proučile



Slika 7. Spektar snage: a) na izvodu 1, 0° kut vjetra; b) na izvodu 49, 30° kut vjetra



Slika 8. Frakcijski doprinos oscilirajućoj energiji primjenom različitih POD modova: a) 0° kut vjetra; b) 30° kut vjetra

karakteristike polja djelovanja vjetra na krovovima različitih krovnih visina, primijenjena je POD metoda na oscilirajuće polje tlaka na krovovima. U nastavku ukratko je predstavljena POD analiza. Izvodi za mjerenje tlaka ravnomjerno su raspoređeni na krovu, a prostorna kovarijanta tlaka izražena je izrazom (4) koja predstavlja kovarijantu djelovanja vjetra na različitim položajima gdje se nalaze izvodi za mjerenje.

$$R_p(x, y, x', y') = \overline{p(x, y, t)p(x', y', t)} \tag{6}$$

Maksimalna vrijednost projekcije $p(x, y, t)$ na funkciju $\phi(x, y)$ izražena je kao kvadratna srednja vrijednost, što dovodi do problema kod vlastitih vrijednosti [26].

$$R_p f = I f \tag{7}$$

gdje se vlastite vrijednosti λ_n i vlastiti vektori $\phi_n(x, y)$ mogu dobiti rješavanjem ove jednadžbe. Primjenom ortogonalizacije vlastitih vektora, polje tlaka može se izraziti kao

$$p(x, y, t) = \sum_{m=1}^M a_m(t)\phi_m(x, y) \tag{8}$$

gdje je $a_m(t)$ glavna koordinata. Kako su te funkcije optimalne u smislu srednje vrijednosti kvadrata, a oblici se rangiraju prema njihovim vlastitim vrijednostima, POD zahtijeva samo manji broj

uvjeta u smislu širenja s ciljem da točnije opiše nasumično polje. Slika 8. prikazuje frakcijski doprinos oscilirajućoj energiji dobivenoj različitim POD modovima pod kutom od (a) $\beta = 0^\circ$ i (b) $\beta = 30^\circ$. U slučaju kad je $\beta = 0^\circ$, prvim se modom dobiva približno 40% ukupne oscilirajuće energije, a frakcijski doprinos se naglo smanjuje povećanjem broja POD modova. Povećanjem krovne visine povećava se doprinos prvog moda za ukupnu oscilirajuću energiju, dok doprinos viših modova ne slijedi isto pravilo, niti čak obrnuto pravilo. To znači da što je manja visina krova, to je djelovanje tlaka kaotičnije budući da se energija određenog moda rasipa što može biti posljedica utjecaja tla. Pod kutom $\beta = 30^\circ$ prvi modovi s različitim krovnim visinama prikazani na slici 8.b imaju sličan frakcijski doprinos kao oni pod kutom $\beta = 0^\circ$, s razlikom što $H_0/B = 1 : 4$ ima najviši frakcijski doprinos. Stopa nagiba iz prvog u drugi mod pod kutom $\beta = 30^\circ$ puno je viša nego kod $\beta = 0^\circ$, što upozorava na to da je ljevkastni vrtlog koji nastaje pri kosom smjeru djelovanja vjetra puno složeniji nego vrtlozi koji nastaju pri normalnom smjeru vjetra.

Kao što je prethodno navedeno, vlastite vrijednosti predstavljaju doprinos odgovarajućih POD modova u ukupnoj oscilirajućoj energiji turbulencije. Tablica 1. prikazuje prvih pet vlastitih vrijednosti modova te zbroj svih vlastitih vrijednosti u slučaju kad je $\beta = 0^\circ$, a tablica 2. prikazuje prvih pet vlastitih vrijednosti modova te zbroj svih vlastitih vrijednosti u slučaju kad je $\beta = 30^\circ$. U situaciji kad je $\beta = 0^\circ$, vlastite vrijednosti prvih pet modova

Tablica 1. Prvih pet vlastitih vrijednosti oscilacije tlaka za četiri omjera stranica u slučaju kad je $\beta = 0^\circ$

Način	Vlastite vrijednosti			
	1 : 4	2 : 4	3 : 4	4 : 4
1	2,377	2,812	4,194	4,870
2	0,473	0,666	1,070	1,444
3	0,407	0,553	0,855	0,989
4	0,315	0,404	0,471	0,620
5	0,176	0,277	0,328	0,420
Zbroj svih vlastitih vrijednosti	3,748	4,662	6,918	8,343

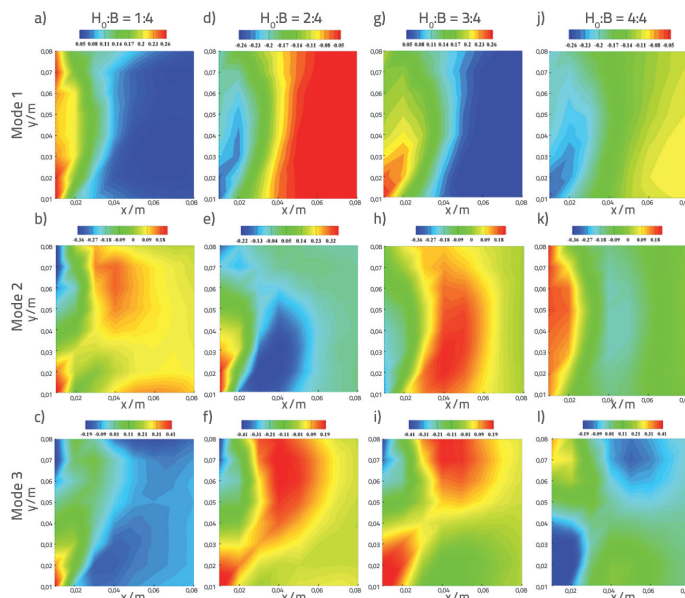
Tablica 2. Prvih pet vlastitih vrijednosti fluktuacije tlaka za četiri omjera stranica pod $\beta = 30^\circ$

Način	Vlastite vrijednosti			
	1 : 4	2 : 4	3 : 4	4 : 4
1	2,795	2,907	2,665	3,108
2	1,425	1,886	1,63	1,517
3	0,525	0,95	1,005	1,250
4	0,332	0,453	0,457	0,475
5	0,278	0,304	0,291	0,331
Zbroj svih vlastitih vrijednosti	5,355	6,500	6,048	6,681

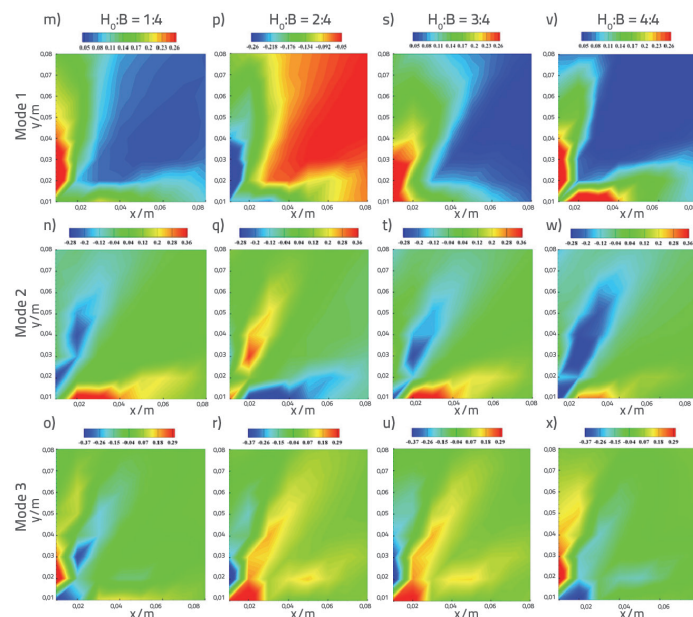
povećavaju se povećanjem visine krova, pogotovo za vlastite vrijednosti prvog moda koji predstavlja oscilirajuća polja tlaka [27]. Energija moda u slučaju kad je $H_0/B = 4 : 4$ dvostruko je veća nego ona kad je $H_0/B = 1 : 4$. To znači da je povećanjem krovne visine oscilirajuće djelovanje vjetra na krov snažnije. U situaciji kad je $\beta = 30^\circ$, za različite krovne visine, vlastite vrijednosti drugog moda uglavnom su veće nego u slučaju kad je $\beta = 0^\circ$ u tablici 2. te imaju veću oscilirajuću energiju. To upućuje na činjenicu da se ne može zanemariti doprinos moda visokog reda u smislu ukupne oscilirajuće energije, te da ljevčasti vrtlozi stvaraju više kaosa u poljima tlaka.

Konture prvih triju oblika u četiri slučaja kad je $\beta = 0^\circ$ i $\beta = 30^\circ$ prikazane su na slici 9., odnosno slici 10. Bitno je naglasiti da tlak oscilira u različitim položajima u isto vrijeme za određeni POD oblik i da su oni predstavljeni isključivo kao funkcija fizičkih koordinata. Njihovu magnitudu osciliranja, koja ovisi o vremenu, definira samo glavna koordinata koje se dobiva jednadžbom 8. Drugim riječima, POD oblik predstavlja relativne vrijednosti osciliranja među točkama. Za prvi mod u slučaju kad je $\beta = 0^\circ$, vrijednosti oscilacije tlaka na glavnom rubu krova koji se pruža u smjeru vjetra velike su kad je $H_0/B = 1 : 4$, a osciliranje se postupno koncentrira u kutu krova i to u smjeru vjetra. To se podudara s položajem koeficijenta ekstremnog tlaka dobivenog u prethodnom poglavlju prilikom mjerenja. Što se tiče drugog moda, pozitivne i negativne oscilacije tlaka pojavljuju se simetrično u kutovima u smjeru vjetra, i to u slučaju kad je $H_0/B = 1 : 4$. Kada je $H_0/B = 2 : 4$, oscilirajući tlak u jednom od kutova slabi, a u drugom jača. Sa povećanjem krovne visine, kut u kojem je veći tlak osciliranja širi se u potpunosti duž glavnog ruba krova, što nalikuje na prvi mod slučaja u kojem je $H_0/B = 4 : 4$. Drugim riječima, s povećanjem krovne visine prva dva moda mogu se zamijeniti jedan s drugim.

U slučaju kada je $\beta = 30^\circ$ prva tri moda pokazuju da se osciliranje pojavljuje samo na strani glavnog ruba koji je u smjeru vjetra, što se nalazi blizu kuta, a s povećanjem krovne visine veći tlak osciliranja širi se na drugu stranu u smjeru vjetra, kao što je prikazano u slučaju kad je $H_0/B = 2 : 4$. Općenito, vršna vrijednost svakog moda uvijek se pojavljuje blizu kuta, što je pokazatelj da se najjače



Slika 9. Konture POD oblika 1–3 u slučaju kad je $H_0/B = 1 : 4, 2 : 4, 3 : 4, te 4 : 4$ sa smjerom vjetra 0° : $H_0/B = 1 : 4$ (a–c), $H_0/B = 2 : 4$ (d–f), $H_0/B = 3 : 4$ (g–i), i $H_0/B = 4 : 4$ (j–l)



Slika 10. Konture POD oblika 1–3 u slučaju kad je $H_0/B = 1 : 4, 2 : 4, 3 : 4, te 4 : 4$ sa smjerom vjetra 30° . $H_0/B = 1 : 4$ (m–o), $H_0/B = 2 : 4$ (p–r), $H_0/B = 3 : 4$ (s–u), te $H_0/B = 4 : 4$ (v–x)

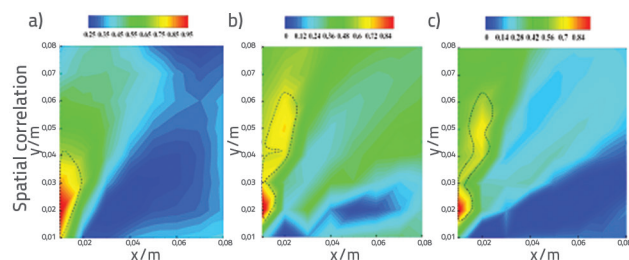
oscilacije pojavljuju u kutovima krova. Štoviše, sve vrste prva tri moda nisu osjetljive na krovnu visinu.

3.4. Korelacijska analiza

Koeficijent prostorne korelacije između referentne točke za mjerenje na različitim položajima je mjera prostorne korelacije između dvije pozicije referentnih točaka u vremenskoj domeni. Vrlo je korisno razumjeti prostornu korelaciju tlaka vjetra između referentne točke u kojoj se mjeri ekstremni tlak isvake druge referentne točke. Koeficijent prostorne korelacije određuje se prema izrazu (9):

$$Cor_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \tag{9}$$

gdje σ_{ij} je kovarijanta tlaka vjetra u referentnoj točki i i j , a σ_i i σ_j su kovarijante tlaka vjetra u referentnoj točki i , odnosno j .



Slika 11. Koeficijenti prostorne korelacije na krovu pod kutom: a) 0°; b) 30°; c) 45° (za referentnu točku 49)

Analiza prostorne korelacije cijelog krova provedena je za referentnu točku 49 kojom se mjeri ekstremni tlak pod različitim kutovima djelovanja vjetra u slučaju kad je omjer između visine i širine 1 : 4, kao što je prikazano na slici 11. Crveno područje predstavlja područje jake korelacije u kojem je značajna prostorna korelacija, a plavo je područje slabe korelacije. Očito je da se područje slabe korelacije nalazi na drugoj strani dijagonalne linije krova. U usporedbi s drugim slučajevima, područje najvećeg utjecaja je kad je $\beta = 30^\circ$.

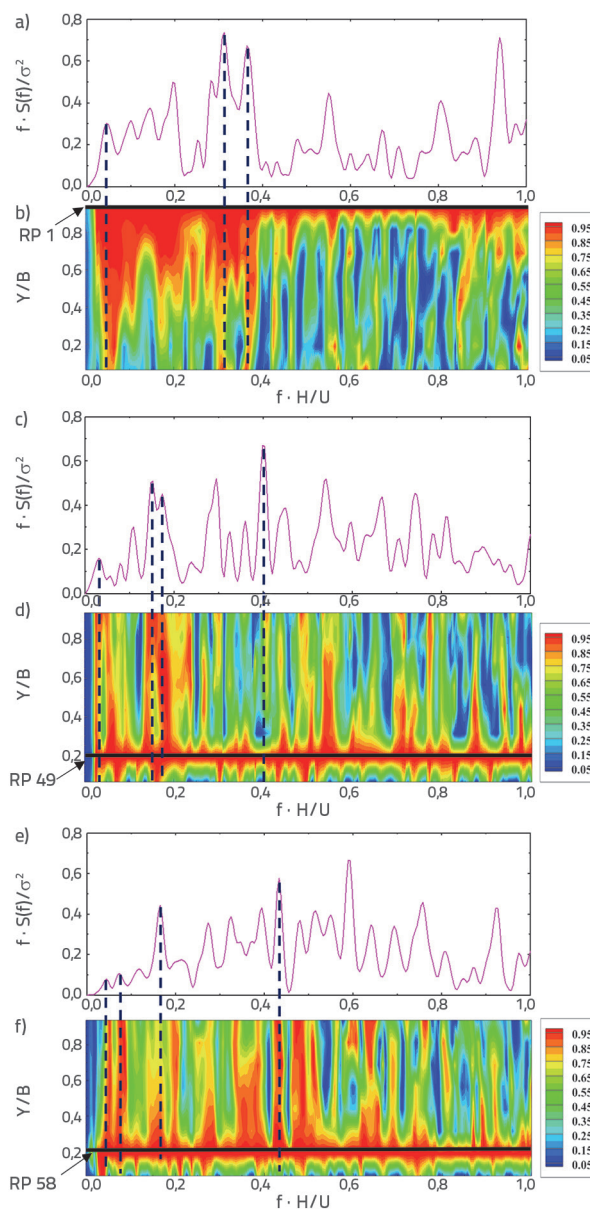
Mjesta osjetljiva na vjetar su kutovi krova te glavni rub koji se nalazi u smjeru vjetra. Kako bi se dublje ispitale karakteristike vrtloga na pozicijama osjetljivim na djelovanje vjetra, u domeni frekvencije dana je vrijednost koherentnosti oscilacije u stupcu 1. pri 0° i 30°, odnosno u redu 8. pri 30°. Funkcija koherentnosti r_{ij}^2 može se odrediti pomoću izraza (10):

$$r_{ij}^2 = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_i(f)S_j(f)} \tag{10}$$

gdje je $S_{ij}(f)$ spektar u kojem se isprepleću snage u referentnim točkama i i j ; $S_i(f)$ predstavlja spektar automatske snage u referentnoj točki i , a $S_j(f)$ predstavlja spektar automatske snage u referentnoj točki j .

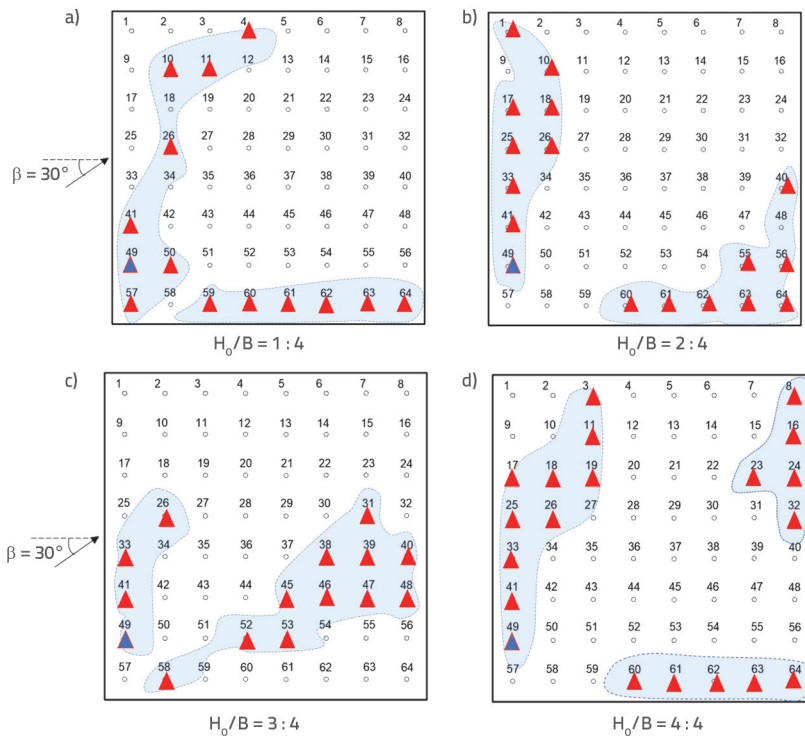
Debele pune linije na slikama 12.b, 12.d te 12.f predstavljaju položaje referentnih točaka (eng. *referent point* - RP) 1, 49 i 58

kojima se mjeri ekstremni tlak. Kontura funkcije koherentnosti je prugasto raspoređena i to tako da, što je jača koherentnost, to je bliža referentnoj točki.



Slika 12. Spektralna snaga gustoće (linije) i konture funkcije koherentnosti za: (a, b) referentnu točku 1, stupac 1., $H_0/B = 1 : 4$, ($H_0/B = 1 : 4$, $\beta = 0^\circ$); (c, d) referentnu točku 49, stupac 4. ($H_0/B = 1 : 4$, $\beta = 30^\circ$); (e, f) referentnu točku 58, red 8. ($H_0/B = 1 : 4$, $\beta = 30^\circ$)

Slika 12.b pokazuje da, u rasponu bezdimenzijske frekvencije koji iznosi 0–0,5, postoji širokopojasna karakteristika, te da niskofrekventni vrtlog zahvaća cijeli glavni rub što u potpunosti odgovara vrhovima spektra snage dobivenima na referentnoj točki 1. Većina vršnih vrijednosti spektra energije koncentrira se u rasponu niske frekvencije, što upućuje na to da je prvi



Slika 13. Koherentnost svih mjernih točaka za referentnu točku 49 čiji kut vjetra iznosi 30° : a) $H_0/B = 1 : 4$; b) $H_0/B = 2 : 4$; c) $H_0/B = 3 : 4$; d) $H_0/B = 4 : 4$

stupac mjerne točke za mjerenje u velikom rasponu unutar istog odvajanja vrtloga, da je turbulencija unutar odvajanja vrtloga intenzivna te da postoji snažna koherentnost između referentnih točaka za mjerenje na glavnom rubu koji se pruža u smjeru vjetra. Na slici 12.d spektral energija približno je jednako raspoređena u svim poljima frekvencije, te postoji prodiranje čak i u niskofrekventno polje. Iako je visoka frekvencija $f \cdot H/U = 0,4$ u skladu s najvećom vrijednošću spektralne gustoće snage, ona nije u istom vrtlogu kao referentnu točku 49. To upućuje na činjenicu da se lijevi ljevokasti vrtlog sastoji od dominantnih koherentnih vrtloga velikih razmjera (niska frekvencija) te nekih nekoherentnih vrtloga manjih razmjera (visoka frekvencija) pri djelovanju vjetra pod kutom od 30° . Na slici 12.f spektralne vršne vrijednosti događaju se pri niskim i visokim frekvencijama, te mnogi prodiru kroz red 8. To upućuje na činjenicu da visokofrekventni vrtlozi čine veliku većinu desnog ljevokastog vrtloga.

Ovdje se ispituje koherentnost izvoda za mjerenje na krovu za različite visine krovova za kut djelovanja vjetra od 30° te se proučava ekstremni izvod za referentnu točku 49. Slika 13. prikazuje koherentnost između mjernih točaka za mjerenje na krovu i ekstremne vrijednosti za referentnu točku 49 koja je označena plavim trokutom za različite visine krova s kutom djelovanja vjetra od 30° za sve mjerne točke. Ovdje je naglasak na mjerne točke čiji je interval koherentne frekvencije između 0,05–0,1 (naglasak na vrtloge velikog razmjera) i na funkciju koherentnosti veću od 95 % čije su mjerne točke označene crvenim trokutima. Iscrta se raspon područja koherentnosti te se oscilacije tlaka mjernim

točkama održavaju na visokoj razini funkcije koherentnosti. Postoje dva područja koherentnosti na svim četirima krovnim visinama s obje strane dijagonale. Očito je da ta područja nastaju kao posljedica ljevokastih vrtloga velikih razmjera. Iako ta područja imaju malen koeficijent korelacije, kao što je prikazano na slici 13., njihova funkcija niskofrekventne koherentnosti je visoka. To pokazuje da funkcija prostorne koherentnosti nije uvijek opadajuća funkcija udaljenosti, što sugerira da se sinkronija opterećenja vjetrom u tim dvama područjima treba uzeti u obzir tijekom projektiranja.

4. Zaključak

Djelovanje vjetra na ravnim krovovima sustavno se ispitalo primjenjujući različite krovne visine na niskim zgradama. Ekstremni pritisak vjetra i njegov položaj prvi su proučavani pri različitim kutovima djelovanja vjetra na četiri krova. POD analiza i analiza funkcije koherentnosti primijenjene su

s ciljem da se analiziraju dinamičke karakteristike (prostorni oblik i frekvencija) i ljevokasti vrtlozi. Doneseni su idući zaključci:

- Magnituda ekstremnog usisavanja vjetra na krovu usko je povezana s krovnom visinom zgrade i kutom djelovanja vjetra. Međutim, položaji koeficijenta ekstremnog djelovanja vjetra ne mijenjaju se u skladu s različitim promjenama visine i kutom djelovanja vjetra, koji se uvijek nalaze u kutu ili na položaju koji neznatno odstupa od kuta. Postoje dvije vršne vrijednosti koeficijenta ekstremnog djelovanja s različitim smjerovima djelovanja vjetra. Maksimalna vrijednost javlja se u slučaju kad je $\beta = 30^\circ$ na položaju koji neznatno odstupa od kuta. Štoviše, maksimalna vrijednost povećava se povećanjem visine.
- U usporedbi s ljevokastim vrtlozima, odvajanje vrtloga na krovovima niskih zgrada uvelike ovisi o visini niskih zgrada. Povećanje visine krova jača odvajanje vrtloga te se povećava raspon njegovog djelovanja, a u skladu s tim povećava se energija oscilacije u turbulenciji velikog razmjera.
- Povećanjem krovne visine te pri djelovanju vjetra pod kutom od 0° vlastite vrijednosti najviše se povećavaju kod prvog moda, a oscilacije tlaka na glavnom rubu krova postaju sve intenzivnije. Povećanjem krovne visine prva dva moda mogu se zamijeniti jedan s drugim, što znači da postoji mod upotpunjavanja. Pri djelovanju vjetra pod kutom od 30° krovna visina ima ograničeni utjecaj na oblik moda i energiju.
- Postoje dva područja koherentnosti na svim četirima krovnim visinama s obje strane dijagonale. Ta područja

nastaju kao posljedica ljevkastih vrtloga velikih razmjera. Iako ta dva područja imaju male vrijednosti koeficijenta korelacije, ona imaju visoku vrijednost niskofrekventne funkcije koherentnosti što sugerira da funkcija prostorne koherentnosti nije uvijek opadajuća funkcija udaljenosti, a to pak sugerira da se sinkronija opterećenja vjetrom u tim dvama područjima treba uzeti u obzir prilikom faze projektiranja. Osim toga, krovna visina ima ograničeni utjecaj na područja koherentnosti.

Zahvala

Autori su prikazali račun koji pokazuje financijsku pomoć dobivenu za istraživanje, autorstvo i/ili objavu ovog rada: Projekt zajednički podupiru Zaklada za prirodne znanosti provincije Heilongjiang u Kini (potpora br. LH2020E010), Zaklada za postdoktorske znanosti u Kini (potpora br.2018M641791) i Nacionalna zaklada za prirodne znanosti Kina (potpora br. 51908107).

LITERATURA

- [1] Richards, P.J., Hoxey, R.P., Short, L.J.: Wind pressures on a 6m cube, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 89 (2001) 14, pp. 1553-1564.
- [2] Pindado, S., Meseguer, J.: Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 91 (2003) 9, pp. 133-1139.
- [3] Tieleman, H.W.: Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 91 (2003) 12, pp. 1627-1649.
- [4] Su, N., Sun, Y., Wu, Y., Shen S.Z.: Three-parameter auto-spectral model of wind pressure for wind-induced response analysis on large-span roofs, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 158 (2016), pp. 139-153.
- [5] Kozmar, H.: Surface pressure on a cubic building exerted by conical vortices, *Journal of Fluids & Structures*, 2020, 92.
- [6] Mertol, H.C., Tunc, G., Akis, T.: Evaluation of masonry buildings and mosques after Sivrice earthquake, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 881-892, <https://doi.org/10.14256/JCE.3101.2021>
- [7] Čokić, M., Folić, R.: Fragility and robustness analysis of a multistorey RC building, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 1, pp. 27-44, <https://doi.org/10.14256/JCE.3036.2020>
- [8] Kim, K.C., Ji, H.S., Seong, S.H.: Flow structure around a 3-D rectangular prism in a turbulent boundary layer, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 91 (2003) 5, pp. 653-669.
- [9] Pratt, R.N., Kopp, G.A.: Velocity field measurements above the roof of a low-rise building during peak suction, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 133 (2014), pp. 234-241.
- [10] Akon, A.F., Kopp, G.A.: Mean pressure distributions and reattachment lengths for roof-separation bubbles on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 155 (2016), pp. 115-125.
- [11] Banks, D., Meroney, R.N., Sarkar, P.P., Zhao, Z., Wu, F.: Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 84 (200) 1, pp. 65-85.
- [12] Lin, J.X., Surry, D., Tieleman, H.W.: The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 56 (1995) 2, pp. 235-265.
- [13] Kawai, H., Nishimura, G.: Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 60 (1996), pp. 211-225.
- [14] Marwood, R., Wood, C.J.: Conical vortex movement and its effect on roof pressures, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 69 (1997), pp. 589-595.
- [15] Kim, K.C., Ji, H.S., Seong, S.H.: PIV measurement of roof corner vortices, *Wind and Structures*, 4 (2001) 5, pp. 441-454.
- [16] Sun, H.J., Ye, J.H.: 3-D characteristics of conical vortex around large-span flat roof by PIV technique, *Wind and Structures*, 22 (2016) 6, pp. 663-684.
- [17] Aly, A.M., Khaled, F., Gol-Zaroudi, H.: Aerodynamics of Low-Rise Buildings: Challenges and Recent Advances in Experimental and Computational Methods, *Aerodynamics*, 2020.
- [18] Liu, Z.X., Yu, Z.X., Chen, X.X., Cao, R.Z., Zhu, F.: An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations, *Building and Environment*, 2020, pp. 169.
- [19] Sakamoto, H., Arie, M.: Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech*, 126 (1983) 1, pp. 147-165.
- [20] Wang, F., Lam, K.M., Zu, G.B., Cheng, L.: Coherent structures and wind force generation of square-section building model, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 188 (2019), pp. 175-193.
- [21] Elsharawy, M., Galal, K., Stathopoulos, T.: Torsional and shear wind loads on flat-roofed buildings, *Engineering Structures*, 84 (2015) feb.1, pp. 313-324.
- [22] Sumner, D., Rostamy, N., Bergstrom, D.J., Bugg, J.D.: Influence of aspect ratio on the mean flow field of a surface-mounted finite-height square prism, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 65 (2017) Jun., pp. 1-20.
- [23] http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html
- [24] Cook, N.J., Mayne, J.R.: A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 6 (1980) 1, pp. 125-137.
- [25] Tieleman, H.W.: Pressures on surface-mounted prisms: The effects of incident turbulence, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1993.
- [26] Bienkiewicz, B., Tamura, Y., Ham, H.J., Ueda, H., Hibi, K.: Proper orthogonal decomposition and reconstruction of multi-channel roof pressure, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1995.
- [27] Fu, J.Y., Wu, J.R., Liang, S.G.: Wind tunnel testing of wind pressures on a large gymnasium roof, *Journal of Central South University*, 18 (2011) 002, pp. 521-529.
- [28] TPU Aerodynamic Database, http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure.html, 2013.