

doi: 10.67563/ASESCONF2026043G

Anina Glumac¹, Olivier Flamand², Jonas Thor Snæbjörnsson^{3,4}, Theophile Bresson⁵, Serge Garay⁵, Đorđe Romanić⁶, Hristina Ilić¹, Rebeka Čolo¹, Jasna Bogunović Jakobsen⁴

WIND EFFECTS ON FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Summary: Renewable energy is rapidly expanding across Europe, with solar power expected to become a major electricity source in the coming decades. Floating photovoltaic systems offer a promising solution for regions with limited land availability by utilizing nearshore areas. This project aims to develop an open-access experimental benchmark to improve understanding of wind-induced effects on floating solar units, focusing on the modular floating photovoltaic system developed by HelioRec. Wind-tunnel tests examine aerodynamic loads on different solar panel configurations. An isolated floater, a floater with a supporting structure, as well as a complete setup including the solar panel are tested in full-scale size. At a reduced scale, various multi-unit arrangements representing possible installation layouts are also investigated. The resulting dataset will characterize wind–structure interactions and support safer FPV design and future CFD studies.

Keywords: floating photovoltaic system, wind tunnel experiments, wind loads, isolated and multi-unit arrangement

DEJSTVO VETRA NA PLUTAJUĆE FOTONAPONSKE SISTEME

Rezime: Obnovljivi izvori energije beleže ubrzan razvoj u Evropi, pri čemu se očekuje da će solarna energija postati jedan od vodećih izvora električne energije. Plutajući fotonaponski sistemi predstavljaju perspektivno rešenje za područja sa ograničenom dostupnošću zemljišta. U radu je predstavljen razvoj eksperimentalnog skupa podataka otvorenog pristupa za unapređenje razumevanja dejstva vetra na plutajuće solarne jedinice, sa fokusom na modularni plutajući fotonaponski sistem kompanije HelioRec. U vazdušnom tunelu ispitana su aerodinamička opterećenja izolovanog plovka, plovka sa nosećom konstrukcijom i kompletnog sistema sa solarnim panelom u prirodnoj razmeri, kao i različiti rasporedi više jedinica u umanjenoj razmeri. Dobijeni skup podataka omogućuje karakterizaciju interakcije vetra i konstrukcije, unapređenje projektovanja FPV sistema i validaciju budućih CFD modela.

Кljučne речи: plutajući fotonaponski sistemi, eksperimenti u vazdušnom tunelu, opterećenje vetrom, izolovana jedinica, raspored više jedinica

¹ Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Serbia, sarkicanina@gmail.com

² Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), France

³ Reykjavik University, Iceland

⁴ University of Stavanger, Norway

⁵ HelioRec, France

⁶ McGill University, Canada

1. UVOD

Sistemi za korišćenje obnovljivih izvora energije se ubrzano razvijaju, pri čemu se očekuje da solarna energija postane jedan od dominantnih izvora električne energije u narednim decenijama. Solarna energija se obično koristi putem fotonaponskih ćelija, koje se tradicionalno postavljaju na tlo ili krovove zgrada. Međutim, u gusto naseljenim područjima i na ostrvima sa ograničenom raspoloživošću zemljišta, plutajući fotonaponski sistemi (engl. *Floating Photovoltaic*, FPV) predstavljaju obećavajuću alternativu korišćenjem jezera, akumulacija i priobalnih područja. Dok je većina postojećih FPV sistema instalirana u kopnenim vodama, rastuća potražnja za energijom podstiče njihovo širenje ka pomorskim (*offshore*) okruženjima.

Uprkos brzom razvoju FPV tehnologije, razumevanje dejstva vetra na ovakve sisteme i dalje je ograničeno, posebno kada je reč o realnim modularnim jedinicama namenjenim velikim plutajućim postrojenjima.

Osnovni cilj ovog istraživanja je stoga uspostavljanje eksperimentalnog referentnog skupa podataka otvorenog pristupa o dejstvima vetra na realan plutajući solarni sistem koji je razvila kompanija HelioRec. Studija će se isključivo fokusirati na aerodinamička opterećenja koja deluju na plutajuće solarne konstrukcije u različitim konfiguracijama: (i) izolovani plovak, (ii) plovak sa potpornom konstrukcijom, (iii) kompletna konfiguracija sa plovkom, nosačima i panelom, i (iv) konfiguracije sa više jedinica koje predstavljaju realne rasporede instalacije fotonaponskih panela sa plovcima.

Glavni doprinos ovog rada predstavlja eksperimentalno ispitivanje realnih modularnih FPV konfiguracija izloženih isključivo dejstvu vetra, uključujući modele u prirodnoj i umanjenoj razmeri. Pored ispitivanja izolovane jedinice, studija razmatra i aerodinamičke interakcije unutar konfiguracija sa više jedinica, koje su od neposrednog značaja za praktične plutajuće solarne farme. Eksperimentalni referentni skup podataka služiće kao osnova za dalje numeričke i CFD studije, čime će se doprineti bezbednijem i efikasnijem projektovanju plutajućih fotonaponskih sistema.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Dejstvo vetra je od velikog značaja za bezbednost fotonaponskih sistema. Veliki broj istraživanja bavio se opterećenjem vetrom na fotonaponskim sistemima, sa fokusom kako na krovne, tako i na sisteme postavljene na tlu.

U [1] su sprovedeni eksperimenti u vazdušnom tunelu na petospratnoj zgradi, pri čemu je utvrđeno da prvi red solarnih panela obezbeđuje efekat zaklanjanja koji smanjuje opterećenje vetrom na ostalim redovima. U [2] su prikazani eksperimenti sa geometrijskom razmerom 1:50 radi određivanja karakteristika opterećenja vetrom solarnih panela na ravnom krovu. Utvrđeno je da je pojedinačni panel izložen većem opterećenju u odnosu na niz panela. Wood i saradnici [3] su eksperimentalno odredili uticaj visine panela i rastojanja između njih koristeći model u geometrijskoj razmeri 1:100.

Pored krovnih sistema, brojne studije su se bavile i konfiguracijama solarnih panela postavljenih na tlu. U [4] je ispitana osetljivost opterećenja vetrom na panele postavljene na tlu, eksperimentalno i numerički, pri različitim geometrijskim razmerama. Utvrđeno je da veličina modela nema značajan uticaj na srednja opterećenja, dok su vršna opterećenja osetljiva i na geometrijsku razmeru i na spektralni sadržaj strujanja tokom ispitivanja. Dalje, u [5] je sprovedena eksperimentalna studija geometrijski umanjenog modela komercijalnog sistema radi ispitivanja raspodele srednjeg pritiska na površini i sile uzgona pri različitim brzinama. U [6] su sprovedeni eksperimenti na nizovima solarnih panela u geometrijskoj razmeri 1:20, variranjem nagiba panela i pravca vetra. Ove studije ukazuju na značaj nagiba panela, razmaka između panela i pravca vetra, kao i na mogućnost nezavisnosti od Reynoldsovog broja u eksperimentima na umanjenim modelima.

Kao što se može uočiti, veći deo znanja o dejstvu vetra na fotonaponskim sisteme potiče iz ispitivanja na umanjenim modelima kopnenih fotonaponskih konfiguracija ili onih postavljenih na zgradama. Relativno malo pažnje posvećeno je plutajućim fotonaponskim sistemima, posebno onima projektovanim za pomorske uslove sa ekstremnim vremenskim pojavama. Postojeće studije o plutajućim fotonaponskim sistemima su ograničene i često se zasnivaju na pojednostavljenim ili idealizovanim geometrijama, koje ne predstavljaju u potpunosti realne modularne jedinice ili njihove potporne konstrukcije.

Eksperimentalna istraživanja opterećenja vetrom na realnim plutajućim fotonaponskim sistemima, posebno u prirodnoj razmeri i uključujući elemente plovka, potporne okvire i kompletne sklopove panela, i dalje su retka. Osim toga, efekti aerodinamičke interferencije u grupnim konfiguracijama — koje su reprezentativne za velike plutajuće solarne farme — u velikoj meri ostaju neistraženi.

Ovaj nedostatak eksperimentalnih podataka, kako na nivou ponašanja pojedinačne jedinice tako i na nivou interakcije u okviru niza, predstavlja ključnu prazninu u trenutnom stanju znanja.

3. OPIS ISPITIVANIH MODELA

Ispitivanja su sprovedena u aerodinamičkoj sekciji vazdušnog tunela u CSTB-u (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, Nant, Francuska), širine 6 m, visine 5 m i dužine 12 m. Ispitivani model čini FPV panel jedinica kompanije HelioRec u prirodnoj razmeri (1:1), koja predstavlja kompletan sklop plovka, nosača i panela, kao što je prikazano na Slici 1a. Solarni panel u prirodnoj razmeri ima dimenzije 2382 mm × 1134 mm i postavljen je na krutu potpurnu konstrukciju sa nagibom od 10°. Prednji nosači su dužine 384 mm, dok su zadnji nosači dužine 591 mm. Model ima masu od približno 52 kg i opremljen je šestokomponentnom vagom sila za merenje sila i momenata.

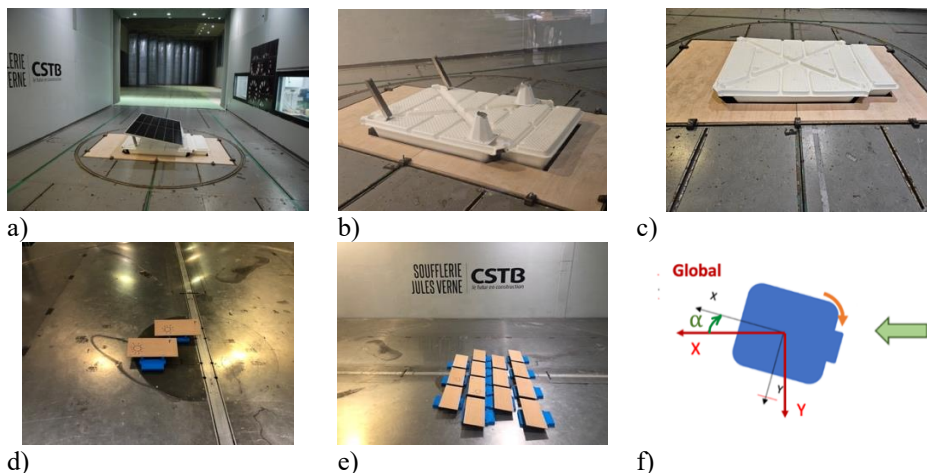
Tokom ispitivanja, plovak je postavljen na obrtni sto vazdušnog tunela, pri čemu se njegov donji deo pruža ispod površine stola kako bi se odrazilo stvarno radno stanje u kome je deo plovka potopljen. Ovakva postavka obezbeđuje realnu aerodinamičku izloženost dela konstrukcije iznad vode, uz očuvanje reprezentativnih radnih uslova. Radi procene mogućeg uticaja Reynoldsovog broja, ispitane su tri brzine vetra — 15 m s⁻¹, 35 m s⁻¹, and 55 m s⁻¹. Različiti upadni uglovi vetra ostvareni su obrtanjem stola. Pored kompletne plutajuće fotonaponske jedinice, ispitivanja u vazdušnom tunelu obuhvatila su i plovak sa potpornom konstrukcijom (Slika 1b), kao i sam plovak (Slika 1c).

Pored izolovane jedinice, ispitivan je i raspored sa više jedinica radi analize aerodinamičkih interakcija. Za ova ispitivanja korišćen je model u umanjenoj razmeri, sa geometrijskom razmerom 1:6. Radi provere validnosti umanjenja razmere, ispitana je i izolovana FPV jedinica u umanjenoj razmeri, čiji su rezultati direktno upoređeni sa modelom u prirodnoj razmeri. Konfiguracije sa više jedinica su zatim ispitane sa primerima prikazanim na Slici 1d (dve FPV jedinice) i Slici 1e (14 FPV jedinica raspoređenih u četiri reda). Plovci i nosači su izrađeni 3D štampom, dok su za panele korišćene drvene ploče. U okviru konfiguracije sa više jedinica, dve odabrane jedinice su opremljene vagama sila i postavljene blizu centra obrtnog stola. Ove instrumentisane jedinice ostaju na fiksnim pozicijama tokom svih merenja i koriste se za procenu aerodinamičkih opterećenja u okviru različitih grupisanih rasporeda. Različite konfiguracije dobijene su preraspoređivanjem neinstrumentisanih jedinica radi formiranja različitih rasporeda.

Za konfiguraciju u umanjenoj razmeri, u vazdušni tunel je uveden dodatni poda kako bi se bolje predstavili uslovi nadolazećeg strujanja. Međutim, dobijeni granični sloj nije potpuno identičan onom u konfiguraciji u prirodnoj razmeri i prevashodno utiče na donji deo panela i plovka.

Svi modeli su postavljeni na obrtni sto, što omogućava variranje upadnog ugla vetra od 0° do 360°. Globalni koordinatni sistem ostaje fiksiran tokom svih merenja, pri čemu je X-osa poravnata sa pravcem nastupajućeg vetra (Slika 1f). Shodno tome, izmereni aerodinamički koeficijenti sile

(C_x, C_y, C_z) direktno odgovaraju komponentama otpora, bočne sile i sile uzgona. Definisani su kao $C_{x,y,z} = F_{x,y,z} / (0.5 * \rho * U_{ref}^2 * A_p)$, gde su F_x , F_y i F_z izmerene sile otpora, bočne sile i sile uzgona; ρ je gustina vazduha pri uslovima ispitivanja u vazdušnom tunelu; U_{ref} je referentna brzina vetra usrednjena po visini panela; A_p je površina panela.



Slika 1: Ispitane FPV konfiguracije: (a) kompletna FPV jedinica; (b) plovak sa potpornom konstrukcijom; (c) plovak; (d) raspored sa dve jedinice; (e) raspored sa više jedinica; (f) globalni koordinatni sistem (X, Y) sa pozitivnim pravcem vetra.

4. REZULTATI

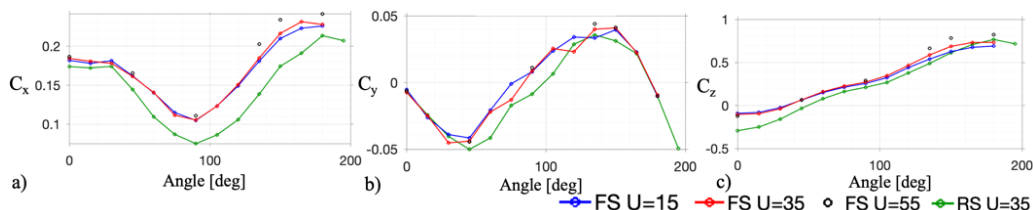
4.1. IZOLOVANA JEDINICA

Slika 2 prikazuje aerodinamičke koeficijente sile izolovane FPV jedinice u funkciji pravca vetra. Rezultati za prirodnu razmeru prikazani su za tri brzine vetra (15, 35, and 55 m s⁻¹), dok je model u umanjenoj razmeri uključen radi direktnog poređenja.

Rezultati u prirodnoj razmeri pokazuju da opšti oblik krivih koeficijenata ostaje dosledan pri svim ispitanim brzinama vetra, što ukazuje na dosledan aerodinamički odziv u okviru ispitnog opsega Reynoldsovog broja.

Poređenje rezultata u prirodnoj i umanjenoj razmeri pokazuje dobro slaganje u pogledu opštih trendova. Iako se uočavaju razlike u apsolutnim vrednostima, posebno kod koeficijenta otpora C_x , one predstavljaju primetan deo njegovog relativno malog opsega variranja. Kod koeficijenta sile uzgona C_z , odstupanja su veća u apsolutnom iznosu, ali ostaju umerena u odnosu na njegov znatno širi opseg, pri čemu je glavni trend dobro očuvan.

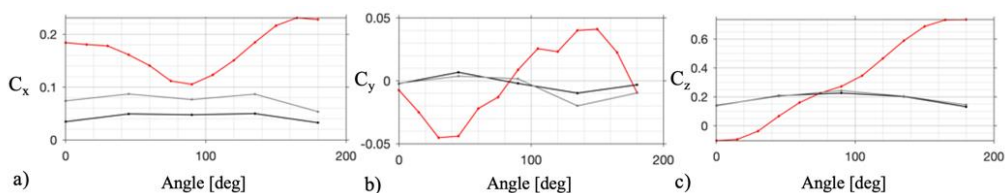
Ova odstupanja mogu se pripisati kako pojednostavljenoj geometriji i svojstvima materijala modela u umanjenoj razmeri, tako i razlikama u karakteristikama graničnog sloja između uslova u prirodnoj i umanjenoj razmeri. Ipak, konfiguracija u umanjenoj razmeri obuhvata dominantno aerodinamičko ponašanje sistema i stoga je pogodna za ispitivanje efekata interakcije u nizu u narednim analizama.



Slika 2: Aerodinamički koeficijenti sile (a) C_x , (b) C_y , (c) C_z , izolovane FPV jedinice u funkciji pravca vetra: poređenje rezultata u prirodnoj razmeri (engl, Full Scale, FS) pri različitim brzinama vetra (15, 35 and 55 m s⁻¹) i modela u umanjenoj razmeri (engl, Reduced Scale, RS) pri 35 m s⁻¹.

Slika 3 upoređuje aerodinamički odziv kompletnog sistema, plovka sa potpornom konstrukcijom i samog plovka. Rezultati pokazuju da je koeficijent sile uzgona za plovak i za konfiguraciju plovak–potporna konstrukcija sličan u celom opsegu pravca vetra, što ukazuje da potporna konstrukcija ima zanemarljiv uticaj na vertikalno aerodinamičko opterećenje.

Istovremeno, i konfiguracija samo sa plovkom i konfiguracija plovak–potporna konstrukcija pokazuju nezanemarljive vrednosti sile uzgona, posebno u opsegu pravca vetra od približno 45° do 135°. Ovaj nalaz ukazuje da sam plovak doprinosi ukupnom aerodinamičkom odzivu i da se ne može smatrati aerodinamički neaktivnim.

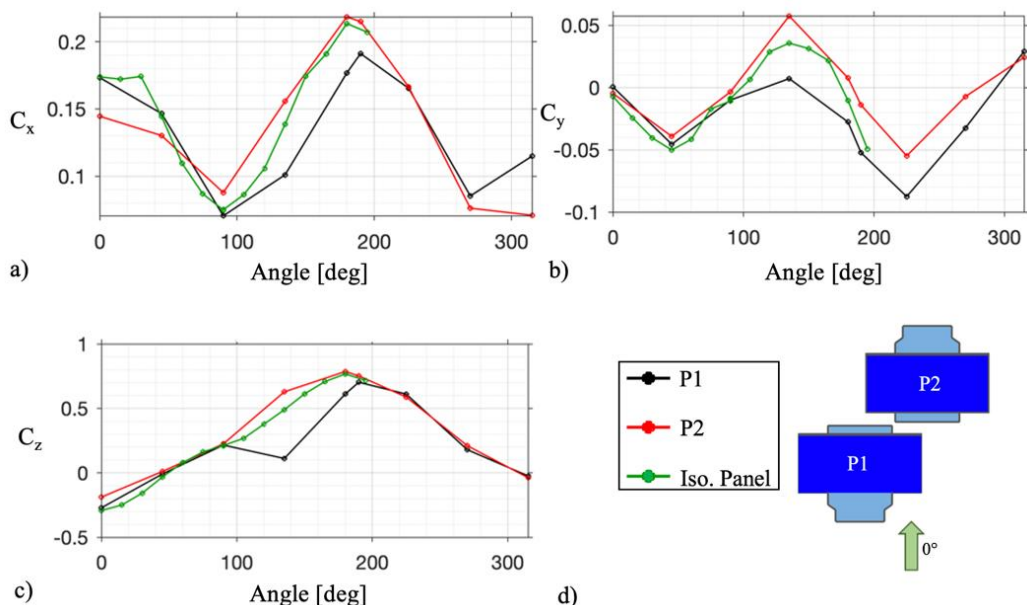


Slika 3. Aerodinamički koeficijenti sile (a) C_x , (b) C_y , (c) C_z , za FPV jedinicu u prirodnoj razmeri: kompletan sistem (crveno), plovak sa potpornom konstrukcijom (sivo) i sam plovak (crno).

Nasuprot tome, dodavanje fotonaponskog panela značajno povećava kako intenzitet, tako i variranje koeficijenata sile u zavisnosti od pravca vetra. Ovo zapažanje pokazuje da je panel dominantan izvor aerodinamičkog opterećenja, dok potporna konstrukcija doprinosi ukupnom aerodinamičkom odzivu, ali ima sekundarnu ulogu u generisanju sile uzgona.

4.2. RASPOREDI SA VIŠE JEDINICA

Slika 4 prikazuje koeficijente sile C_x , C_y i C_z za raspored sa dva panela prikazan na Slici 1d, zajedno sa izolovanim panelom u umanjenoj razmeri koji je korišćen kao referenca na Slici 2. Rezultati pokazuju da aerodinamički odziv grupisane konfiguracije ostaje blizak izolovanom slučaju u velikom delu opsega pravca vetra, posebno za koeficijent sile uzgona, dok se za pojedine pravce vetra javljaju izraženi efekti interakcije.

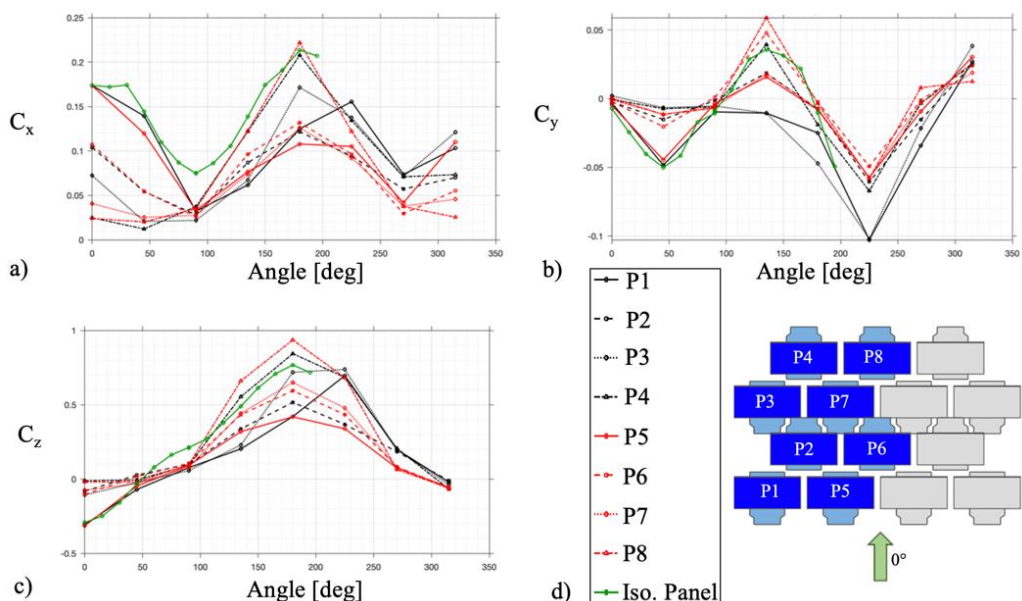


Slika 4. Aerodinamički koeficijenti sile (a) C_x , (b) C_y , (c) C_z , za raspored sa dva panela (d), upoređeni sa izolovanim panelom u umanjenoj razmeri (zeleno linija sa Slike 2).

Dosledan trend uočava se u opsegu pravca vetra od približno 135° do 180°, kada strujanje nastrujava na gornju ivicu nagnutog panela. Ovo ponašanje uočava se kod sva tri koeficijenta. Uzvodni panel pokazuje povećanu silu uzgona u odnosu na izolovani slučaj, dok nizvodni panel pokazuje smanjenu silu uzgona. Ovo ukazuje na usmerenu interakciju, pri čemu uzvodni panel menja uslove nastupajućeg strujanja za panel iza njega. Smanjenje sile uzgona na nizvodnom panelu može se protumačiti kao efekat zaklanjanja.

Koeficijenti C_x i C_y takođe pokazuju odstupanja u istom opsegu pravca vetra, iako sa manjom apsolutnom varijacijom. U celini, Slika 4 pokazuje da je za konfiguraciju sa dva panela aerodinamička interakcija najizraženija kada strujanje direktno pogađa gornju ivicu nagnutog panela, što dovodi do povećanog opterećenja uzvodne jedinice i smanjenog odziva nizvodne jedinice.

Slika 5 prikazuje koeficijente sile C_x , C_y i C_z za osam panela u okviru rasporeda sa više jedinica, obeleženih na Slici 5, zajedno sa izolovanim panelom u umanjenoj razmeri koji je korišćen kao referenca na Slici 2. Rezultati pokazuju da aerodinamički odziv u velikoj meri zavisi i od pozicije panela i od pravca vetra. Najveće varijacije uočavaju se kod koeficijenta sile uzgona C_z , dok su razlike kod C_x i C_y manje, ali i dalje ukazuju na efekte zavisne od pozicije.



Slika 5. Aerodinamički koeficijenti sile (a) C_x , (b) C_y , (c) C_z , za raspored sa 14 panela (d), upoređeni sa izolovanim panelom u umanjenoj razmeri (zeleni linija). Paneli 1–4 odgovaraju prvoj koloni, a paneli 5–8 drugoj koloni, numerisani odozdo nagore.

Najkritičnije opterećenje javlja se u opsegu pravca vetra od približno 135° do 225°, gde se uočavaju najveće vrednosti sile uzgona. U ovoj oblasti, Panel 8 (P8 na Slici 5) pokazuje maksimalnu vrednost C_z , koja premašuje vrednosti ostalih panela i izolovane reference za oko 27%. Uopšteno, u ovom opsegu pravca vetra uočava se značajna varijacija između panela, što ukazuje na izražene efekte interakcije.

Drugi kritični režim javlja se oko 225°, gde Paneli 1 i 3 (P1 i P3 sa Slike 5) razvijaju izražene lokalne vrhove vrednosti C_z . Ovi paneli se nalaze na spoljnim pozicijama prve kolone i postaju izloženi pri ovim pravcima vetra. Ovo pokazuje da se najnepovoljnija pozicija panela pomera u zavisnosti od pravca vetra i da ivični efekti imaju značajnu ulogu u aerodinamičkom opterećenju niza.

Koeficijenti C_x i C_y takođe pokazuju razlike zavisne od pozicije, iako sa manjom apsolutnom varijacijom u poređenju sa C_z . Konkretno, varijacije u C_y oko 225° ukazuju da je i bočno opterećenje pod uticajem pozicije panela.

U celini, Sl. 5 pokazuje da je aerodinamičko opterećenje unutar niza izrazito neujednačeno. Stoga izolovani panel ne može obezbediti dovoljnu projektnu obavojnicu za grupisanu konfiguraciju, s obzirom na to da različite pozicije panela određuju projektne uslove za različite sektore pravca vetra.

5. ZAKLJUČCI

Ova studija predstavlja eksperimentalno istraživanje aerodinamičkih opterećenja izazvanih dejstvom vetra na realan plutajući fotonaponski sistem, obuhvatajući izolovane jedinice u prirodnoj razmeri i konfiguracije sa više jedinica u umanjenoj razmeri. Rezultati pokazuju da je aerodinamički odziv izolovane jedinice dosledan pri svim ispitanim brzinama vetra, čime se potvrđuje opravdanost korišćenja modela u umanjenoj razmeri za proučavanje konfiguracija u nizu.

Analiza pokazuje da aerodinamičko opterećenje u okviru konfiguracija sa više jedinica u velikoj meri zavisi i od pravca vetra i od pozicije panela. Uočeni su značajni efekti interakcije,

posebno kod koeficijenta sile uzgona, pri čemu različiti paneli određuju projektne uslove za različite sektore pravca vetra. Ovi nalazi ukazuju da rezultati za izolovani panel nisu dovoljni za predstavljanje ponašanja niza.

Dalja analiza i prošireni skupovi podataka obuhvatiće dodatne konfiguracije i detaljnu diskusiju mehanizama aerodinamičke interakcije.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENTS

Ovaj rad je deo transnacionalnog pristupnog projekta „ERIES-FLOATING-SOLAR” podržanog od strane projekta Engineering Research Infrastructures for European Synergies (ERIES) (www.eries.eu), koji je finansiran iz Okvirnog programa Evropske unije Horizon Europe, u okviru Ugovora o dodeli sredstava br. 101058684. Ovaj rad je finansiran i iz istraživačko-inovacionog programa Evropske unije Horizon Europe, u okviru akcije Marie Skłodowska-Curie Action Staff Exchanges (MSCA-SE), Ugovor o dodeli sredstava br. 101182847.

This work is part of the transnational access project “ERIES-FLOATING-SOLAR” supported by the Engineering Research Infrastructures for European Synergies (ERIES) project (www.eries.eu), which has received funding from the European Union’s Horizon Europe Framework Programme under Grant Agreement No. 101058684. This work has received funding from the European Union’s Horizon Europe research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie Action Staff Exchanges (MSCA-SE), Grant Agreement No. 101182847.

REFERENCE

- [1] Radu A, Axinte E, Theohari C. (1986) Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 23: 249–58.
- [2] Cao J, Yoshida A, Saha PK, Tamura Y. (2013) Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 123: 214-25.
- [3] Wood GS, Denoon RO, Kwok KCS. (2001) Wind loads on industrial solar panel arrays and supporting roof structure. *Wind Struct*; 4(6): 481–94.
- [4] Aly AM, Bitsuamlak G. Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects. (2013) *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 123: 250–60.
- [5] Chung K, Chang K and Liu Y. (2008) Reduction of wind uplift of a solar collector model. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 96: 1294–1306.
- [6] Yenemci O, Askoy MO. (2021) An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 213: 104630.