

Ispitivanja aerodinamičkih svojstava cestovnih vjetrobrana

Hrvoje Kozmar, Lorenzo Procino, Alessandra Borsani, Gianni Bartoli

Ključne riječi

cestovni vjetrobran, aerodinamička svojstva, vijadukti Hreljin i Bukovo, ispitivanje, zračni tunel, strujanje zraka

Key words

road wind screen, aerodynamic properties, Hreljin and Bukovo viaducts, testing, air tunnel, air flow

Mots clés

écran brise-vent routier, propriétés aérodynamiques, viaducs de Hreljin et Bukovo, essai, soufflerie aérodynamique, écoulement d'air

Ключевые слова

дорожная ветрозащитная стена, аэродинамические свойства, виадукты Хрелин и Буково, испытание, воздушный тоннель, течение воздуха

Schlüsselworte

Strassenwindfang, aerodynamische Kennzeichen, Talbrücken Hreljin und Bukovo, Untersuchung, Lufttunnel, Luftströmung

H. Kozmar, L. Procino, A. Borsani, G. Bartoli

Stručni rad

Ispitivanja aerodinamičkih svojstava cestovnih vjetrobrana

Prikazano je ispitivanje u zračnom tunelu aerodinamičkih karakteristika cestovnih vjetrobrana radi određivanja njihova optimalnog oblika za vijadukte Hreljin (autocesta) i Bukovo (riječka obilaznica). Mjerenja brzine strujanja zraka provedena su upotrebom sustava PIV (Particle Image Velocimetry). Prikazani su rezultati ispitivanja na vijaduktu Bukovo za razne kutove smjera strujanja zraka: horizontalni kut je 0° i vertikalni kut je 10° te za intenzitet turbulencije zraka od 17%.

H. Kozmar, L. Procino, A. Borsani, G. Bartoli

Professional paper

Testing aerodynamic properties of road windscreens

The wind tunnel testing of aerodynamic properties of road windscreens, aimed at determining an optimum windscreen form for Hreljin and Bukovo viaducts on the Rijeka - Zagreb motorway, is presented. The system called PIV (Particle Image Velocimetry) is used to measure velocity of air flow. Test results obtained by testing made at Bukovo Viaduct are presented for various air-flow angles: horizontal angle is 0° and vertical angle is 10°, and the air turbulence intensity is taken to be 17%.

H. Kozmar, L. Procino, A. Borsani, G. Bartoli

Ouvrage professionnel

Analyse des propriétés aérodynamiques des écrans brise-vent routiers

L'essai dans la soufflerie des propriétés aérodynamiques des écrans brise-vent routiers, visant à déterminer la forme optimale des écrans à utiliser sur les viaducs de Hreljin et Bukovo sur l'autoroute Rijeka - Zagreb, est présenté. Le système VIP (vélocimétrie par image de particules) est utilisé pour mesurer la vitesse d'écoulement d'air. Les résultats d'essai fait sur le viaduc de Bukovo sont présentés pour les angles d'écoulement d'air différents: l'angle horizontal est 0° et l'angle vertical est 10, tandis que l'intensité de turbulence d'air de 17% est adoptée.

H. Kozmar, L. Procino, A. Borsani, G. Bartoli

Отраслевая работа

Испытания аэродинамических свойств дорожных ветрозащитных стен

В работе показано испытание в воздушном тоннеле аэродинамических характеристик дорожных ветрозащитных стен для определения их оптимальной формы для виадуктов Хрелин и Буково на автострате Риека – Загреб. Измерения скорости течения воздуха проведены сравнением системы PIV (Particle Image Velocimetry). Показаны результаты испытаний на виадуке Буково для разных углов направления течения воздуха: горизонтальный угол 0° и вертикальный угол 10°, а также для измерения интенсивности воздуха в 17%.

H. Kozmar, L. Procino, A. Borsani, G. Bartoli

Fachbericht

Untersuchung der aerodynamischen Kennzeichen von Strassenwindfängen

Dargestellt ist eine Lufttunnel-Untersuchung der aerodynamischen Kennzeichen von Strassenwindfängen zwecks der Bestimmung deren optimalen Gestaltung für die Talbrücken Hreljin und Bukovo an der Autobahn Rijeka - Zagreb. Die Messungen der Geschwindigkeit der Luftströmung wurden durch Anwendung des Systems PIV (Particle Image Velocimetry) durchgeführt. Dargestellt sind die Ergebnisse der Untersuchung an der Talbrücke Bukovo für verschiedene Winkel der Luftströmungsrichtung: der Horizontalwinkel beträgt 0° und der Vertikalwinkel 10°, und für die Luftturbulenzintensität von 17%.

Autori: Doc. dr. sc. **Hrvoje Kozmar**, dipl. ing. stroj., Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, USA i Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; **Lorenzo Procino**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Gianni Bartoli**, dipl. ing. građ., Department of Civil Engineering, University of Florence, Italy; **Alessandra Borsani**, dipl. ing. građ., Department of Energetics S. Stecco, University of Florence, Italy

1 Uvod

Intenzivna izgradnja brzih prometnica na području Republike Hrvatske tijekom proteklog desetljeća potaknula je istraživače iz nekoliko različitih znanstvenih disciplina (meteorologija, strojarstvo, građevinarstvo, ekologija, prometne znanosti i dr.) na detaljno proučavanje popratnih efekata koji se javljaju pri gradnji ovih kapitalnih građevina. Motivi su poboljšanje kvalitete i dugovječnosti izgrađenih objekata, zaštita okoliša od zagađenja, sigurnost i komfor putnika u vozilima te nesmetani promet čak i u razdobljima kada autocestama prometuje maksimalni broj vozila.

Poznavanje strukture vjetra u blizini prometnice nužno je za procjenu nestabilnosti vozila uzrokovane djelovanjem vjetra i polazište za aerodinamička ispitivanja kojih je konačni cilj definiranje oblika cestovnih vjetrobrana. Posljednjih desetak godina provode se opsežna istraživanja strukture vjetrova na području RH radi izrade hrvatskih norma. U sklopu tih studija Bajić i dr. [1, 2, 3] prikazali su postojeće mogućnosti proračuna referentne brzine vjetra na području RH s obzirom na raspoložive podatke mjerenja i složenost strujanja, procijenili očekivane maksimalne brzine vjetra i analizirali utjecaj perioda osrednjavanja na iznos izmjerenih vrijednosti brzine. Na primjeru trase autoceste Sv. Rok (jug) – Maslenica provedena je analiza režima strujanja vjetra (Bajić [4]) u kojoj se upozorava na mogućnost izloženosti autoceste jakim i olujnim burama, a u analizi djelovanja vjetra na Dubrovački most (Peroš i dr. [5]) ukazuje se na važnost mjerenja brzine na terenu prije provedbe modelskih ispitivanja u zračnom tunelu.

Tragične posljedice prometnih nezgoda uzrokovanih djelovanjem vjetra opisane su u Chen i dr. [6], Sciborylski [7], Coleman i dr. [8], Baker [9], Baker i dr. [10], pri čemu gubici ljudskih života nisu bili rijetkost. Ovi događaji inicirali su brojna istraživanja radi optimalnog aerodinamičkog oblika cestovnih vjetrobrana koji bi pružali zaštitu prometujućim vozilima od vjetra. Cai i dr. [11] izradili su teorijski 3D model za određivanje dinamičkih karakteristika prometujućeg vozila na mostu izloženom jakom vjetru i zaključili da brzina vozila utječe uglavnom na karakteristike gibanja vozila u vertikalnom smjeru. Pri velikim brzinama vjetra stabilnost vozila u većoj je mjeri određena gibanjem mosta, dok je pri malim brzinama vjetra dominantan utjecaj hrapavosti kolnika. Stabilnost vozila izloženog bočnom vjetru ne ovisi samo o obliku vozila, već i o obliku okolne infrastrukture, Suzuki i dr. [12]. Modelsko istraživanje zaštite prometa od djelovanja bure na Masleničkom mostu proveli su Gjetvaj i dr. [13]. Analizu konstrukcije vijadukta Črni Kal i vjetrobrana koji su na njemu smješteni, a izloženi su djelovanju vjetra, proveli su Štrukelj i dr. [14]. Recentne

studije koje opisuju mogućnosti zaštite vozila od vjetra na području RH obuhvaćaju radove Sesar i dr. [15, 16] i Gjetvaj [17, 18, 19, 20]. Općenito, s obzirom na specifičnosti konfiguracije terena, oblika građevine i strukture vjetra na određenoj lokaciji, nužno je provesti ispitivanja mogućnosti zaštite od vjetra pojedinačno za svaku građevinu.

Trenutačno se u zračnom tunelu Sveučilišta u Firenci provode eksperimentalna ispitivanja radi optimizacije aerodinamičkog oblika cestovnih vjetrobrana. Cilj je odrediti oblik vjetrobrana koji će zaštititi prometujuća vozila od vjetra na vijaduktima Hreljin i Bukovo na dionici autoceste Rijeka-Zagreb i riječkoj obilaznici. U ovom je radu prikazan dio rezultata dobivenih mjerenjima na modelu vijadukta Bukovo.

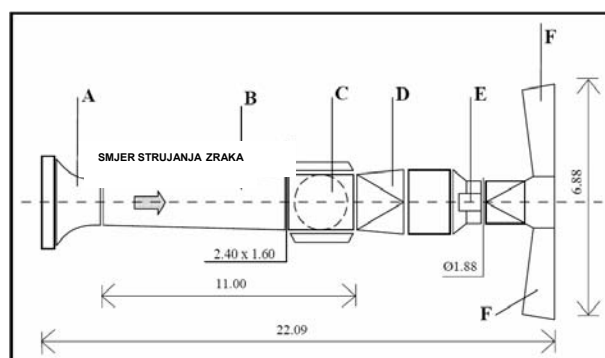
2 Mjerna oprema i postupak mjerenja

2.1 Zračni tunel

Eksperimenti su provedeni u zračnom tunelu za generiranje graničnog sloja koji je prikazan na slikama 1. i 2.



Slika 1. Zračni tunel za generiranje graničnog sloja, CRIACIV



Slika 2. Zračni tunel za generiranje graničnog sloja, CRIACIV (shematski prikaz); A - sapnica, B - sekcija za generiranje graničnog sloja, C - ispitna sekcija 2,40 x 1,60 m, D - spoj između dviju sekcija, E - motor snage 160 kW, F - difuzor T oblika

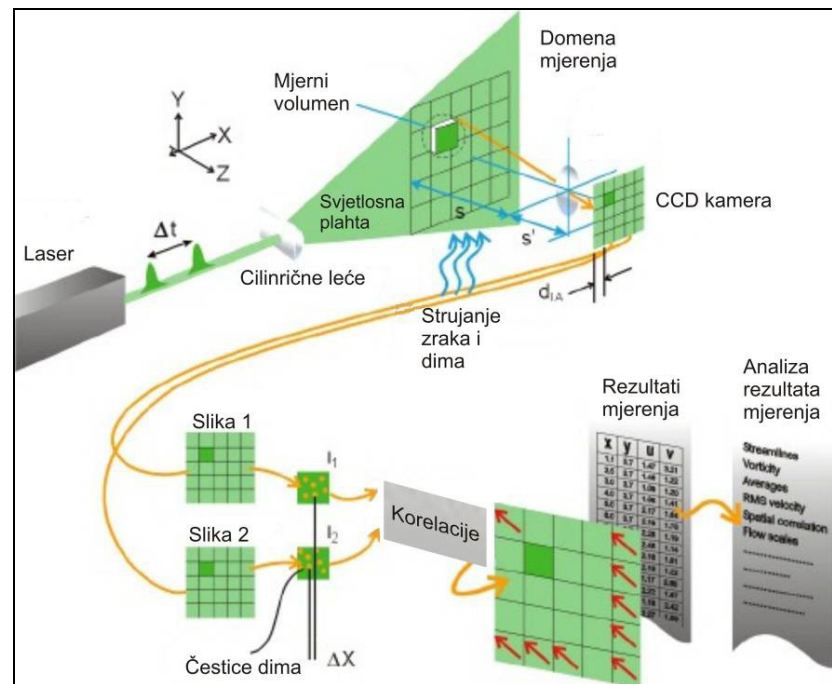
Tunel je u vlasništvu CRIACIV-a (Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del Vento), a nalazi se u Pratu, gradu udaljenom 15 kilometara od Firence u Italiji. Nosiva je struktura napravljena od čelika, a oplata je od drvenih panela sa staklenim prozorima i drvenim podom. Tunel je otvorenog tipa, a brzina strujanja zraka kroz zatvorenu mjerne sekciju može se regulirati u području 0–35 m/s variranjem kuta nagiba lopatica na rotoru ventilatora, kao i regulacijom brzine vrtnje ventilatora. Ventilator usisnog tipa i snage 160 kW ugrađen je na kraju mjerne sekcije.

Mjerna sekcija zračnog tunela ima na izlazu iz sapnice pravokutni poprečni presjek širine 2,2 m i visine 1,6 m. Bočne se stijenke tunela u smjeru strujanja zraka postupno šire, tako da širina mjerne sekcije na poziciji na kojoj se smještaju modeli građevina iznosi 2,4 m. Proširenje mjerne sekcije izvedeno je zbog kompenzacije gubitaka statičkog tlaka duž mjerne sekcije tunela. Ukupna duljina zračnog tunela (od sapnice na ulazu do difuzora na kraju) jest oko 22 m. Prvih 11 m mjerne sekcije u uzdužnom smjeru služi za generiranje graničnog sloja (8 m mjerne sekcije i 3 m ispitne sekcije gdje je u podu smještena okretna ploča koja služi za simulaciju nastujavanja na model iz različitih kutova). Detaljan opis zračnog tunela za generiranje graničnog sloja Sveučilišta u Firenci dan je u Augusti i dr. [22]. Budući da je visina ispitivanih mostova (od donjeg ruba kolnika do vrha vjetrobranske ograde) za pojmove industrijske aerodinamike relativno mala (oko 7 m na prototipu), može se pretpostaviti da je profil nastujanog vjetra na građevinu jednak u podnožju i pri vrhu objekta. Stoga u mjernoj sekciji nije potrebno simulirati atmosferski granični sloj, već je dovoljno generirati uniforman profil brzine. Cjelokupni se profil graničnog sloja modelira ako se ispitivana konstrukcija velikih dimenzija i struktura nastujanog zraka u podnožju i pri vrhu objekta bitno razlikuju, kao npr. u Kozmar [23, 24].

2.2 Mjerna oprema

Mjerenja osrednjene vrijednosti brzine na kolniku vijadukta Bukovo provedena su metodom Particle Image Velocimetry (PIV). Ovo je neinvazivna laserska optička mjerna tehnika za istraživanja i dijagnostiku u područjima mehanike fluida, turbulencije, mikromehanike fluida, procesima izgaranja i dr. Primjenjuje se u eksperimentima u zračnim tunelima za ispitivanja aerodinamike

automobila, vlakova, aviona, zgrada i drugih objekata. U vodenim se bazenima rabi za istraživanja u općoj hidrodinamici, konstrukciji trupa broda, turbostrojevima, strujanju u cjevovodu, kanalu itd. Vrijedan je alat za vrednovanje rezultata računalnih simulacija (CFD). Mjerni podaci dobiveni PIV-om uključuju brzinu, koncentraciju, temperature, veličinu čestica. Osnovni su principi rada PIV metodom dani na slici 3.



Slika 3. Osnovni principi mjerenja PIV metodom, DANTEC [21]

Dva lasera generiraju svjetlosni snop na dijelu modela na kojem se žele izmjeriti iznosi brzine (domena mjerenja). Prvi laser osvjetljava model, a kamera u istom trenutku slika promatrani dio modela i registrira trenutnu poziciju svake pojedine čestice dima u tom početnom trenutku. Vrlo brzo (60 μ s) nakon „okidanja“ prvog lasera, drugi laser osvjetljava model, kamera slika promatrani dio modela i registrira trenutne pozicije čestica dima u krajnjem trenutku. Ove dvije slike registrirane u vrlo kratkom vremenu predstavljaju jedan „frame“. Prostornim se kroskorelacijama iz ovih dviju fotografija određuje osrednjena brzina i smjer gibanja fluida za svaki djelić promatrane sekcije modela. Svaka se slika dijeli na određeni broj kontrolnih površina (kvadrata jednake veličine) i brzina se određuje pojedinačno za svaku kontrolnu površinu. Takav se postupak mjerenja ponavlja s odabranom frekvencijom uzorkovanja i u odabranom intervalu vremena. Na kraju mjerenja rezultat je određeni broj „frameova“. Konačno se provodi računanje osrednjene vrijednosti brzine i vrtložnosti za svaku kontrolnu površinu iz cjelokupnog broja izmjerenih „frameova“. U ovom je radu u svakoj pojedinoj kon-

figuraciji izmjereno približno 200 „frameova“. Konačni rezultat je skalarna mapa na kojoj su prikazane srednje vrijednosti brzine ili vrtložnosti za promatrani dio modela. Pregled razvoja PIV metode u posljednja dva desetljeća, od kad je razvijen prvi sustav, i dodatni detalji vezani uz primjenu ove metode dani su u Adrian [25].

U okviru ovog rada uporabljen je PIV mjerni sustav proizvođača Dantec tip 2100 sa sljedećim komponentama:

- a) Laseri Quantel Big Sky Laser snage 220 mJ po svakom svjetlosnom impulsu
- b) CCD kamera Kodak Megaplug s optikom Nikon od 60 mm, rezolucijom od 1 MPx i filterom frekvencija
- c) Generator dima Le Maitre
- d) PIV procesor DANTEC 2100 s programskim paketom za mjerenje, obradu i analizu podataka Flowmap 3,61.

Osrednjene su vrijednosti brzine zraka u neporemećenoj struji mjerene Prandtl-Pitotovom cijevi.

2.3 Model

Model vijadukta Bukovo izrađen je u mjerilu 1:66 sa svim bitnim detaljima. Pri odabiru mjerila modela bilo je potrebno pronaći kompromis između dva ograničavajuća faktora: stupnja začepljenosti mjerne sekcije (engl. blockage) i Reynoldsova broja (Re). Za potrebe modelskih ispitivanja u zračnom tunelu modeli se uglavnom izrađuju što je moguće veći. Time se uz provedbu eksperimenata pri maksimalnim mogućim brzinama karakterističnim za pojedini zračni tunel postižu veće vrijednosti Re broja, koje su bliže prototipnim vrijednostima u prirodi u odnosu na manji model. Vrijedno je napomenuti da se postizanjem identičnosti Re broja na modelu i prototipu osigurava potpuna dinamička sličnost strujanja zraka na modelu i prototipu. Maksimalne brzine strujanja zraka u zračnim tunelima za generiranje graničnog sloja redovito se kreću oko 30 m/s. Međutim, nije uputno premašiti kritične vrijednosti stupnja začepljenosti mjerne sekcije koje se kreću od 5 % do 6 % (npr. Hucho [26], Holmes [27], Simiu i Scanlan [28]), jer se u protivnom strujanje zraka oko modela bitno mijenja u odnosu prema strujanju u prirodi. U ovoj su se studiji autori poslužili postupkom koji je karakterističan ostalim prethodno objavljenim sličnim istraživanjima. Ukratko, model je izrađen u maksimalnoj veličini s obzirom na dopušteni stupanj začepljenosti mjerne sekcije, a eksperimenti su provedeni pri maksimalnim mogućim brzinama s obzirom na karakteristike zračnog tunela i modela. Također je bitno pripomenuti da brzine strujanja zraka, pri kojima su provedeni eksperimenti, nisu bile najveće moguće brzine koje je moguće postići u ovom zračnom tunelu. Ograničavajući su faktor tijekom provedbe eksperimenata

bile vibracije modela koje su se pojavljivale pri brzinama većim od 12 m/s. Stoga su eksperimenti provedeni pri brzinama struje zraka od oko 12 m/s. U prikazanim mjerenjima Re broj je iznosio približno 5×10^5 , čime je postignuta zadovoljavajuća dinamička sličnost sa strujanjem vjetra u prirodi, a u skladu s rezultatima prikazanim u Larose i D'Auteuil [29]. Re broj je proračunan na temelju osrednjene brzine strujanja zraka u neporemećenoj struji i duljine obaju mostova u poprečnom presjeku, okomito na smjer strujanja zraka. Općenito, autori su svjesni činjenice da nemogućnost postizanja jednakosti Re broja u prirodi i na modelu u određenoj mjeri predstavlja ograničavajući faktor eksperimentalnih ispitivanja u zračnim tunelima, a s čime se svakodnevno susreću istraživači u području eksperimentalne industrijske aerodinamike diljem svijeta (npr. Schewe i Larsen [30], Schewe [31]). Više detalja o navedenom moguće je pronaći u standardnoj literaturi iz područja industrijske aerodinamike, npr. Hucho [26], Holmes [27], Simiu i Scanlan [28].

Model je izrađen od drva, a vjetrobranske letve od metala. Konfiguracije vjetrobrana koje su predmet ispitivanja u zračnom tunelu odabrane su na temelju rezultata prethodno provedenih računalnih simulacija, Virag i dr. [32]. Odnos širine modela (poprečno na kolnik) prema duljini modela (uzdužno uz kolnik) pri svim je mjerenjima iznosio približno 1:3, čime su eliminirani utjecaji bočnih nosača modela. Mjerenja polja brzina provedena su približno na sredini vjetrobranske ograde, između dvaju stupova koji nose i učvršćuju vjetrobransku ogradu, a koji su postavljeni na prototipnoj udaljenosti 2,5 m što u mjerilu 1:66 iznosi 3,8 cm. Na istom su presjeku modela vijadukta provedena i mjerenja bez vjetrobranske ograde.

Budući da je struktura turbulentnog strujanja zraka na kolniku u zavjetrinskoj strani vjetrobrana prvenstveno uvjetovana geometrijom vjetrobrana, pomnom izradom modela moguće je postići zadovoljavajuću sličnost turbulentnog strujanja na modelu i prototipu. U prilog navedenom može poslužiti i nedavno istraživanje aerodinamičkih karakteristika Hangzhou Bay mosta (Wang i dr. [33]), gdje je postignuta vrlo dobra sličnost turbulentnog strujanja na kolniku u zavjetrini vjetrobrana prilikom usporedbe eksperimentalnih rezultata u zračnom tunelu i numeričkih simulacija uz upotrebu RVM metode (*Random Vortex Method*).

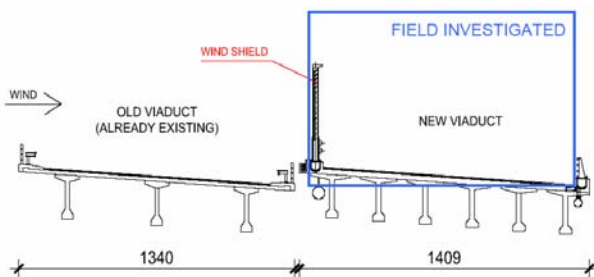
Model vijadukta Bukovo smješten je na sredini poprečnog presjeka mjerne sekcije zračnog tunela, čime su eliminirani eventualni utjecaji bočnih stijenki mjerne sekcije zračnog tunela. Ukupni je stupanj začepljenosti mjerne sekcije (uzevši u obzir model vijadukta i mjernu opremu koja se tijekom provedbe eksperimenata nalazi

la u mjernoj sekciji) iznosio od 4,5 % do 6 %, što je u skladu s prethodno predloženim vrijednostima. Dodatne detalje provedenih ispitivanja moguće je pronaći u Proćino i dr. [34], Kozmar i dr. [35]. Presjek modela vijadukta Bukovo (uključujući stari i novi most) smještenog u mjernoj sekciji zračnog tunela i konfiguracija vjetrobranskih letava prikazani su na slici 4.



Slika 4. Model vijadukta Bukovo smješten u mjernoj sekciji zračnog tunela i konfiguracija vjetrobranskih letava (dimenzije u cm)

Konstrukcija starog vijadukta koji je trenutačno u funkciji nije u mogućnosti podnijeti ugradnju vjetrobranske ograde iz statičkih razloga, pa se zaštita postojećeg vijadukta nije ni ispitivala. Ispitivana je zaštita samo novog vijadukta koji je u izgradnji, a kako je shematski prikazano na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz domene mjerenja na modelu vijadukta Bukovo (dimenzije kao na prototipu)

Vjetar struji preko staroga, nezaštićenog vijadukta na novi vijadukt koji je zaštićen vjetrobranskom ogradom. U razdobljima izloženosti ceste jakim vjetrovima planira se preusmjeravanje prometa sa starog, nezaštićenoga vijadukta na novi koji će biti zaštićen vjetrobranskom ogradom. Promet će u takvim razdobljima izloženosti autoceste jakim vjetrovima teći dvosmjerno na novom, zaštićenom vijaduktu.

Visina vjetrobranske ograde u prototipnim dimenzijama iznosi 4 m, a poroznost vjetrobranske ograde 31 % uzimajući u obzir horizontalne vjetrobranske letve i njihove nosive stupove. Općenito, smanjenje poroznosti vjetrobranske ograde rezultira smanjenjem osrednjene vrijednosti brzine i povećanjem turbulentnosti vjetra na kolniku (Kaiser [36]), pa je pri odabiru konačnog oblika

vjetrobrana nužno postići kompromis između ovih dvaju parametara budući da uvećana turbulentnost ima negativan utjecaj na stabilnost vozila. U ovom su radu prikazani rezultati pri horizontalnom kutu strujanja 0° (okomito na vjetrobransku ogradu) i vertikalnom kutu nastrojavanja 10° (odozgo prema dolje), čime se simulira slika strujanja u prirodi u skladu s konfiguracijom terena. Bitno je napomenuti da vertikalni kut strujanja vjetra na slici 5. iznosi 0° , dok su rezultati na slikama 7., 8., 9. i 10. prikazani za vertikalni kut strujanja 10° (odozgo prema dolje). U zračnom je tunelu ispitivano strujanje izrazito turbulentnog vjetra na model vijadukta jer takav tip strujanja odgovara uvjetima u prirodi. Turbulentnost zraka u mjernoj sekciji zračnog tunela generirana drvenom mrežom koja je ugrađena na početku mjerne sekcije, neposredno na izlazu iz sapnice. Pritom je intenzitet turbulencije vjetra u uzdužnom smjeru 17 %, što je izmjereno DANTEC trostrukom užarenom žicom. Potanki je opis postupka mjerenja brzine metodom užarene žice dan u Kozmar [37]. Na slici 6. prikazan je model vijadukta Bukovo u mjernoj sekciji zračnog tunela u Firenci osvijetljen laserskom zrakom PIV sustava.

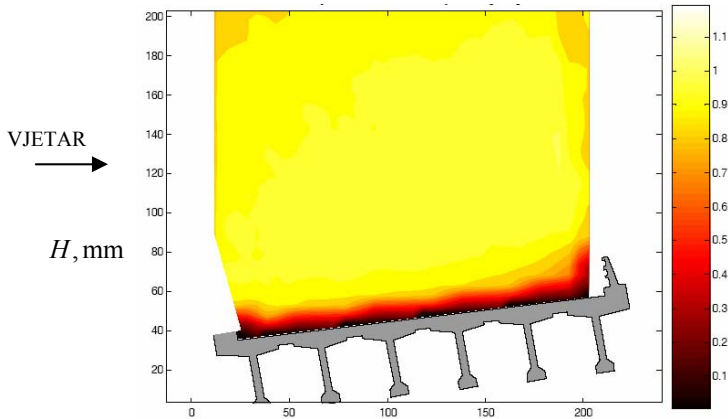


Slika 6. Model vijadukta Bukovo u mjernoj sekciji CRIACIV zračnog tunela; model je osvijetljen laserskom zrakom PIV sustava

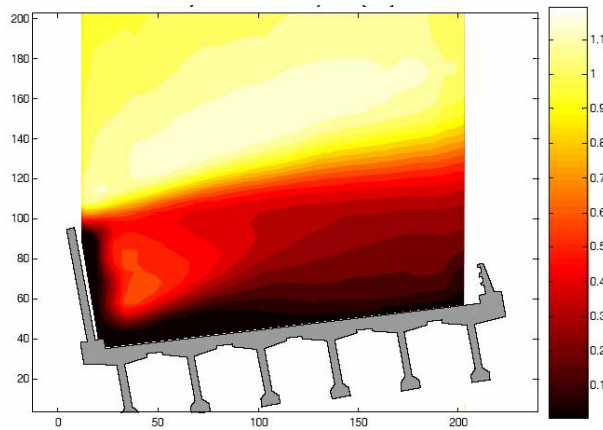
3 Rezultati

Osrednjena je vrijednost brzine u smjeru glavnog strujanja u neporemećenoj struji \bar{u}_∞ izmjerena Prandtl-Pitotom cijevi i u prikazanim konfiguracijama iznosi 11,66 m/s. Osrednjene vrijednosti brzine (\bar{u}) izmjerene PIV metodom na kolniku vijadukta Bukovo normirane

su brzinom \bar{u}_∞ i prikazane na slikama 7. i 8., pri čemu su duljinske mjere u modelskim dimenzijama.



Slika 7. Polje brzina na kolniku vijadukta Bukovo bez vjetrobranske zaštite



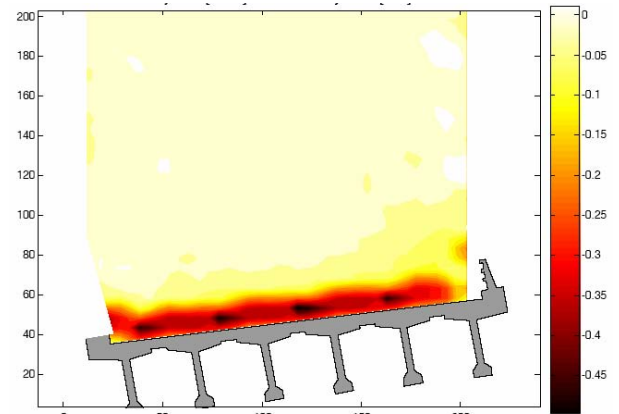
Slika 8. Polje brzina na kolniku vijadukta Bukovo uz ugrađenu vjetrobransku zaštitu

Za slučaj kada vjetrobrani nisu postavljeni na vijadukt, na privjetrenom rubu starog vijadukta dolazi do odvajanja struje zraka od kolnika, što rezultira izuzetno velikim gradijentom osrednjenih vrijednosti brzine neposredno iznad kolnika na novom vijaduktu. Već na prototipnoj visini 1 m iznad kolnika brzine su približno $0,8\bar{u}_\infty$.

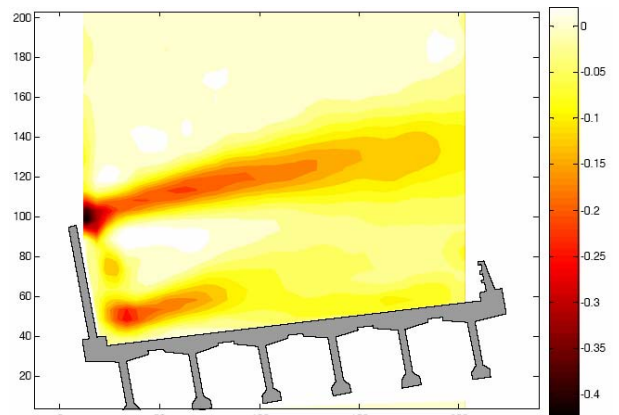
U ispitivanoj konfiguraciji s 4 m visokim vjetrobranima postavljenima na novi vijadukt, struja zraka struji preko starog vijadukta na vjetrobransku ogradu postavljenu na novom vijaduktu. Manji dio protoka vjetra struji kroz ogradu preko kolnika, dok je glavina protoka vjetra istisnuta u prostor iznad vjetrobranske ograde. Kao rezultat, osrednjene vrijednosti brzine na novom vijaduktu su znatno manje u usporedbi s konfiguracijom bez vjetrobranske ograde. U voznoj traku neposredno uz vjetrobransku ogradu, najveća brzina jest približno $0,5\bar{u}_\infty$, dok je u preostala dva vozna traka najveća zabilježena brzina oko $0,3\bar{u}_\infty$. Zapaženi su izraženi gradijenti brzi-

ne na visini 4 m u visini vjetrobranske ograde, koji su rezultat odvajanja i istisnuća struje zraka preko gornjeg ruba ograde.

Vrtložnost struje zraka (ω) iznad kolnika vijadukta Bukovo (novi vijadukt), koja opisuje iznos „cirkulacije“ ili „rotacije“ fluida, prikazana je na slikama 9. i 10.



Slika 9. Polje vrtložnosti na kolniku vijadukta Bukovo bez vjetrobranske zaštite



Slika 10. Polje vrtložnosti na kolniku vijadukta Bukovo uz ugrađenu vjetrobransku zaštitu

Na nezaštićenom vijaduktu (slika 9.) zabilježeno je područje vrlo izražene vrtložnosti (oko 0,5 rad/s) neposredno iznad kolnika do približno 1 m prototipne visine, zbog odvajanja struje zraka od kolnika. Vrtložnost u sva tri vozna traka bitno je smanjena u konfiguraciji s ugrađenom vjetrobranskom ogradom. Zabilježeni su iznosi od približno 0,1 rad/s u dva traka udaljenija od ograde, i nešto veći (oko 0,25 rad/s) neposredno iznad kolnika u traku uz vjetrobransku ogradu, moguće kao posljedica odvajanja struje zraka na strujnom rubu novog vijadukta. Zapaženo je područje jakog vrtloženja iznad sva tri vozna traka na prototipnoj visini 4 m, kao posljedica odvajanja struje zraka od gornjeg ruba vjetrobranske ograde. U voznoj traku neposredno uz ogradu 0,45 rad/s i postupno opada do 0,15 rad/s u traku najudaljenijem od ograde.

4 Zaključak

U zračnom se tunelu provode ispitivanja aerodinamičke forme cestovnih vjetrobrana radi zaštite vozila od vjetra na vijaduktima Hreljin i Bukovo, koji su dio autoceste Rijeka-Zagreb i riječke obilaznice. U ovom su radu prikazana polja osrednjenih vrijednosti brzine i vrtložnosti iznad kolnika vijadukta Bukovo u konfiguraciji bez vjetrobranske ograde i kada je na vijadukt postavljena vjetrobranska ogradna prototipne visine 4 m i poroznosti 31 %, pri horizontalnom kutu strujanja 0 % i vertikalnom kutu nastujavanja 10 %. Osrednjena je vrijednost brzine u neporemećenoj struji u smjeru glavnog strujanja izmjerena Prandtl-Pitotovom cijevi i u prikazanim konfiguracijama iznosi 11,66 m/s. Intenzitet turbulencije u neporemećenoj struji zraka jest 17 %, što je izmjereno užarenom žicom.

Gradijent osrednjenih vrijednosti brzine neposredno iznad kolnika vrlo je izražen kada na vijadukt nije postavljena zaštitna vjetrobranska ogradna, tako da već na prototipnoj visini 1 m iznad kolnika brzine dosežu $0,8 \bar{u}_\infty$. U istom je području zabilježena snažna vrtložnost (približno 0,5 rad/s) struje zraka.

Osrednjene vrijednosti na kolniku bitno su manje kada je postavljena vjetrobranska ogradna. U voznom traku neposredno uz ogradu najveća zabilježena brzina iznosi približno $0,5 \bar{u}_\infty$, dok u preostala dva vozna traka iznosi oko $0,3 \bar{u}_\infty$. Vrtložnost je znatno manja u odnosu na vijadukt bez ograde i iznosi oko 0,25 rad/s u traku neposredno uz ogradu i približno 0,1 rad/s u preostala dva traka. Također je zabilježeno područje izražene vrtložnosti na prototipnoj visini 4 m poradi odvajanja struje zraka od vrha zaštitne vjetrobranske ograde.

Zaštitna vjetrobranska ogradna prikazana u ovom radu mogla bi znatno poboljšati zaštitu vozila od vjetra na vijaduktu Bukovo u usporedbi sa situacijom kada na vijadukt nije postavljena vjetrobranska ogradna. Međutim, kod vjetrobranske ograde prototipne visine 4 m postoji mogućnost pojave nestabilnosti visokih teretnih vozila zbog vjetra, budući da bi mogli biti izloženi djelovanju vjetra u gornjem dijelu vozila koji se nalazi iznad zaštitne vjetrobranske ograde. Stoga će buduća ispitivanja biti usredotočena na daljnje smanjenje osrednjenih vrijednosti brzine i vrtložnosti na kolniku, s posebnim naglaskom na visoka teretna vozila.

ZAHVALA

Istraživanja su provedena u suradnji Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) Sveučilišta u Zagrebu, Inter-University Research Centre on Building Aerodynamics and Wind Engineering (CRIACIV) iz Firence i Inženjersko Projektnog Zavoda (IPZ) iz Zagreba. Autori zahvaljuju Zoranu Lončarecu, dipl. ing. (IPZ) i prof. dr. sc. Zdravku Viragu (FSB) na korisnim sugestijama i informacijama, kojima su pripomogli kvalitetnoj provedbi ispitivanja. Savjeti Tomice Kozmara, dipl. ing., predstavljaju vrijedan doprinos autorima tijekom pripreme ovog članka. Prvi autor također zahvaljuje zakladi Fulbright, koja mu je omogućila znanstveno-istraživački boravak na University of Notre Dame u SAD-u

LITERATURA

- [1] Bajić, A.; Peroš, B.; Vučetić, V.; Žibrat, Z.: *Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme*, Građevinar 53(8), 495-505, 2001.
- [2] Bajić, A.; Peroš, B.: *Referentna brzina vjetra – utjecaj perioda osrednjavanja*, Građevinar 53(9), 555-562, 2001.
- [3] Bajić, A.; Peroš, B.: *Meteorological basis for wind loads calculation in Croatia*, Wind and Structures 8(6), 389-405, 2005.
- [4] Bajić, A.: *Očekivani režim strujanja vjetra na autocesti Sv. Rok (jug) – Maslenica*, Građevinar 55(3), 149-158, 2003.
- [5] Peroš, B.; Boko, I.; Šimunović, T.: *Analiza djelovanja vjetra na Dubrovački most*, Građevinar 57(2), 87-94, 2005.
- [6] Chen, S.R.; Cai, C.S.: *Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92(12), 991-1024, 2004.
- [7] Sciborylski, A. J.: *Road Vehicle Aerodynamics*, Pentech Press, London, 1975.
- [8] Coleman, S.A.; Baker, C.J.: *High sided road vehicles in cross wind*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 36, 1383-1392, 1990.
- [9] Baker, C.J.: *Measures to control vehicle movement at exposed sites during windy periods*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 22 (1987), 151-161.
- [10] Baker, C.J.; Reynolds, S.: *Wind-induced accidents of road vehicles*, Accident Analysis and Prevention 24(6), 559-575, 1992.
- [11] Cai, C.S.; Chen, S.R.: *Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92(7-8), 579-607, 2004.
- [12] Suzuki, M.; Tanemoto, K.; Maeda, T.: *Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91(1-2), 209-218, 2003.
- [13] Gjetvaj, G. i dr.: *Modelsko istraživanje zaštite prometa na Masleničkom mostu od djelovanja bure*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 79 str.
- [14] Štrukelj, A.; Ciglarič, I.; Pipenbaher, M.: *Analysis of a Bridge Structure and its Wind Barrier under Wind Loads*, Structural Engineering International 4, 220-227, 2005.
- [15] Sesar, P.; Mašala-Buhin, M.; Krečak, A.: *Testing of Wind Barriers Efficiency on Motorways*, Proc. 4th Int. Conf. on Advances in Wind and Structures (AWAS'08), Choi, Chang-Koon et al. (ur.), 292-293, 2008.
- [16] Sesar, P.; Mašala-Buhin, M.; Krečak, A.: *Protecting traffic from extreme wind*, Proc. 12th Int. Conf. on Wind Engineering, Cheung, John (ur.), 2039-2046, 2007.

- [17] Gjetvaj, G.: *Prijedlog smjernica za dimenzioniranje zaštite prometa od olujnih vjetrova*, Ceste i mostovi 7-9, 41-47, 2006.
- [18] Gjetvaj, G.: *Učinkovitost vjetrobrana na cestama i mostovima*, Ceste i mostovi 1-6, 81-86, 2006.
- [19] Gjetvaj, G.: *Vjetrobrani kao elementi povećanja sigurnosti prometa na koridoru 5-C*, Saobraćajni sistemi koridora 5-C nove mogućnosti razvoja, Šefkija Čekić (ur.), Fakultet za saobraćaj i veze Sarajevo, 283-295, 2006.
- [20] Gjetvaj, G.: *Homogenization of driving conditions when incoming wind angles and intensity change significantly*, Safety and security engineering, Brebbia, C.A (ur.), WIT press, 613-621, 2005.
- [21] [Http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=820](http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=820).
- [22] Augusti, G.; Spinelli, P.; Borri, C.; Bartoli, G.; Giachi, M.; Giordano, S.: *The C.R.I.A.C.I.V. atmospheric boundary layer wind tunnel*, 9th International Conference on Wind Engineering (ICWE), New Delhi, 1995.
- [23] Kozmar, H.: *Modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu*, magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2000.
- [24] Kozmar, H.: *Experimental Simulation of the Oncoming Air Flow on Bridges*, International Conference on Bridges, Dubrovnik, 335-342, 2006.
- [25] Adrian, R.J.: *Twenty years of particle image velocimetry*, Experiments in Fluids 39, 159-169, 2005.
- [26] Hucho, W.-H.: *Aerodynamik der stumpfen Körper*, Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2002.
- [27] Holmes, J.D.: *Wind loading of structures*, Spon Press, London, 2001.
- [28] Simiu, E.; Scanlan, R.H.: *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*, Wiley, New York, 1996.
- [29] Larose, G.L.; D'Auteuil, A.: *On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94, 365-376, 2006.
- [30] Schewe, G.; Larsen, A.: *Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, 829-838, 1998.
- [31] Schewe, G.: *Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89, 1267-1289, 2001.
- [32] Virag, Z.; Krizmanić, S.; Džijan, I.; Šavar, M.; Kozmar, H.: *Studija zaštite dionica autoceste Rijeka-Zagreb od vjetra*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 38 str., 2007.
- [33] Wang, D.L.; Chen, A.R.; Zhou, Z.Y.: *Aerodynamic characters of a trans-oceanic cable-stayed bridge with wind barrier*, Proc. 12th Int. Conf. on Wind Engineering, Cheung, John (ur.), 807-814, 2007.
- [34] Procino, L.; Kozmar, H.; Bartoli, G.; Borsani, A.: *Wind Barriers On Bridges: The Effect Of Wall Porosity*, 6th International Colloquium on: Bluff Body Aerodynamics & Applications, Milano, 2008.
- [35] Kozmar, H.; Virag, Z.; Krizmanić, S.; Džijan, I.; Šavar, M.: *Eksperimentalna studija aerodinamičke forme cestovnih vjetrobrana*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 96 str., 2007.
- [36] Kaiser, H.: *Airflow at shelterbelts*, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 53(7), 1959.
- [37] Kozmar, H.; Džijan, I.; Šavar, M.: *Jednolikost modela atmosferskoga graničnoga sloja u zračnom tunelu*, Strojstvo 47(5-6), 157-167, 2005.