

# Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme

Alica Bajić, Bernardin Peroš, Višnja Vučetić, Zvonko Žibrat

## Ključne riječi

meteorologija, opterećenje vjetrom, 10-minutne brzine vjetra, referentna brzina, hrvatske norme

## Key words

meteorology, wind load, 10-minute wind velocity, reference speed, Croatian standards

## Mots clés

météorologie, charge de vent, vitesses du vent de 10 minutes, vitesse de référence, normes croates

## Ключевые слова:

метеорология, ветровая нагрузка, 10-минутные скорости ветра, референтная нагрузка, хорватские нормы

## Schlüsselworte:

Meteorologie, Eindbelastung, 10-minütlichen Windgeschwindigkeiten, referente Geschwindigkeit, kroatische Normen

A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat

Pregledni rad

## Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme

Prikazane su postojeće mogućnosti proračuna referentne (poredbene) brzine vjetra na području Republike Hrvatske s obzirom na raspoložive podatke mjerenja i složenost strujnog režima. Na osnovi podataka kontinuiranih mjerenja smjera i brzine vjetra na 21 meteorološkoj postaji, procijenjene su očekivane maksimalne desetominutne brzine vjetra. Predložena su potrebna istraživanja čiji bi rezultati omogućili izradu stručno opravdane meteorološke podloge za potrebe hrvatskih norma.

A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat

Subject review

## Wind load - a meteorological basis for Croatian standards

Present possibilities for calculating reference (comparative) wind speeds in the territory of the Republic of Croatia, taking into account available measurement information and the complexity of current patterns, are presented. Expected maximum ten-minute wind velocities are estimated based on the data obtained by continual measurement of wind speed and direction at 21 weather stations. Investigations enabling preparation of a professional and technologically justified meteorological data base for establishment of Croatian standards are proposed.

A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat

Ouvrage de synthèse

## La charge de vent - une base météorologique pour les normes croates

L'article présente les possibilités actuelles du calcul de la vitesse de référence (comparative) du vent sur le territoire de la République de Croatie, compte tenu des résultats disponibles des mesures et de la complexité du régime des courants. C'est à partir des résultats des mesures continues de la direction et de la vitesse du vent sur 21 stations météorologiques qu'ont été estimées les vitesses attendues maximales du vent pendant 10 minutes. On propose des recherches nécessaires dont les résultats permettraient d'établir des bases météorologiques techniquement justifiées pour les besoins des normes croates.

Алица Баич, Вишня Вучетич, Звонко Жибрат, Бернардин Перош

Обзорная работа

## Ветровая нагрузка - метеорологическая база для хорватских норм

В работе показаны существующие возможности расчёта референтной скорости ветра на территории Республики Хорватии, принимая во внимание стоящие в распоряжении данные измерений и сложность режима ветровых потоков. На основании данных континуированных измерений направления и скорости ветра на 21 метеорологических станциях, сделана оценка ожидаемых максимальных десятиминутных скоростей ветра. Предложены необходимые исследования, результаты которых дали бы возможность для выработки профессионально-оправданного метеорологического основания для потребностей хорватских норм.

A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat

Übersichtsarbeit

## Windbelastung – meteorologische Grundlage für kroatische Normen

Dargestellt sind die bestehenden Möglichkeiten für die Berechnung der referenten (vergleichenden) Windgeschwindigkeit im Gebiet der Republik Kroatien, mit Rücksicht auf die verfügbare Messungsgaben und die Komplexität des Strömungsregimes. Auf Grund von Angaben der kontinuierlichen Messungen der Windrichtung und -geschwindigkeit an 21 meteorologischen Stationen wurden die zu erwartenden 10-minütlichen Windgeschwindigkeiten abgeschätzt. Es sind die notwendigen Forschungen vorgeschlagen deren Ergebnisse die Ausarbeitung einer fachlich berechtigten meteorologischen Grundlage für die Erfordernisse der kroatischen Normen ermöglichen würden.

Autori: Mr. sc. **Alica Bajić**, dipl. ing. fizike, mr. sc. **Višnja Vučetić**, dipl. ing. fizike, **Zvonko Žibrat**, dipl. ing. fizike, Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb, prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

## 1 Uvod

Za projektiranje i izvođenje građevinskih objekata nužno je poznavati one meteorološke parametre koji mogu značajnije utjecati na sigurnost objekta. Djelovanje vjetra jedno je od glavnih opterećenja građevina. Stanje izrade konstrukcijskih euronorma (Eurokod 1-9) i postojeći standardi na tom području ubrzano prisiljavaju sve zemlje da izrade adekvatne podloge za svoje normativne akte. ENV 1991-2-4 – *Djelovanje na konstrukcije, opterećenje vjetrom* [12] daje uvid u to koje brzine vjetra čine meteorološku podlogu za izradu norma, ali ne definiira metode proračuna tih brzina. Poznavanje osnovnih značajki strujnog režima nekog područja, a time i izmjerenih vrijednosti najvećih brzina i njihove reprezentativnosti, područje je meteorologije. Stoga je uključivanje meteorologa, tj. multidisciplinarno istraživanje ove problematike nužan osnovni uvjet za izradu nacionalnih norma koje bi zadovoljile znanstvene i stručne principe i na najbolji mogući način obuhvatile specifičnosti Hrvatske.

Položaj Hrvatske u blizini alpskog masiva na sjeverozapadu, Dinarida duž jadranske obale i Panonske nizine u sjeveroistočnom dijelu zemlje uzrok je vrlo složenom strujnom režimu. Specifične značajke strujnog režima u pojedinim dijelovima Hrvatske, a posebno njezinu obalnom dijelu, čine potrebu za poznavanjem vremenske i prostorne promjenjivosti brzine i smjera vjetra još značajnijom. Naime, vjetrovi koji se pojavljuju na našoj obali mogu dosežati brzine veće od 50 m/s i znatno su ovisni o lokalnim značajkama okolnog terena. Njihova je karakteristika uz to i velika mahovitost i turbulentnost. Praksa da se rabe propisi u kojima se vjetar definira kao statičko opterećenje u proračunu konstrukcija, s meteorološkog gledišta potpuno je neutemeljena.

Prema ENV 1991-2-4 osnovni vjetrovni parametar pri proračunu djelovanja vjetra na konstrukcije jest referentna (poredbena) brzina vjetra  $V_{ref}$  definirana kao najveća 10-minutna srednja brzina na visini 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II koja se može očekivati jednom u 50 godina.

Cilj je ovoga rada da osim osnovnih razmatranja o djelovanju vjetra na konstrukcije upozori na postojeće mogućnosti proračuna referentne brzine vjetra na području Hrvatske s obzirom na raspoložive podatke mjerenja i složenost strujnog režima na području Hrvatske. Ujedno je cilj pokazati u kojoj su mjeri raspoloživi podaci dostatni za stručno opravdanu meteorološku podlogu za potrebe hrvatskih norma.

## 2 Osnovna razmatranja o djelovanju vjetra na konstrukcije

Strujanje zraka koji se kreće brzinom  $V$  izaziva silu  $q$  po jedinici površine, pri čemu je  $q$  (dinamički ili zaustavni tlak) definiran sa

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2. \quad (1)$$

Za zatvoreno strujanje zraka ukupan tlak konstantan je u svim točkama, što se izražava Bernoullijevom jednadžbom

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2. \quad (2)$$

U jednadžbama (1) i (2) su:  $p_1$  i  $p_2$  statički tlakovi u dvije točke strujanja zraka,  $\rho$  je gustoća zraka, a  $V_1$  i  $V_2$  su odgovarajuće brzine zraka. Kada se konstrukcija nalazi u strujanju zraka, na strani dolazećeg zraka brzina zraka se zaustavlja, povećava se prema bočnim stranama i izaziva vrtloge na suprotnoj strani. Tlak zraka na konstrukciju je pozitivan na strani prema vjetru, a negativan (podtlak) na ostalim stranama konstrukcije.

U svim je slučajevima sila vjetra proporcionalna s kvadratom brzine vjetra tako da je za danu površinu konstrukcije

$$\text{sila vjetra} = C \times V^2 \quad (3)$$

gdje je  $C$  koeficijent proporcionalnosti koji se naziva koeficijentom oblika. Određivanje veličine koeficijenta  $C$  obavlja se pokusima u aerotunelu na modelima stvarnih objekata. Povijesno gledano, počelo se s jednostavnijim oblicima i rešetkastim konstrukcijama, dok danas postoji korisna "biblioteka" faktora oblika za razne oblike i tipove konstrukcija [4, 12] i dr. Za poluaerodinamičke oblike, kao što su cilindri, koeficijent oblika  $C$  nije konstantan za sve brzine vjetra, već je ovisan o bezdimenzionalnoj veličini koja se zove Reynoldsov broj ( $Re$ ) i koja predstavlja odnos inercijalnih i viskoznih sila vjetra. Kod tijela izraženog aerodinamičkog oblika, kao što su avioni i rakete, dominantne sile vjetra su gotovo potpuno viskoznog karaktera (takva tijela nisu predmet ovih razmatranja). U graditeljstvu su dominantne inercijalne sile vjetra a ne viskozne, tako da se vrijednosti Reynoldsova broja nalaze u granicama  $10^3$  do  $10^8$ .

Određivanje brzine vjetra  $V$  znatno je teže nego određivanje koeficijenta oblika, pa je neophodno da se promatra kontinuirana promjena brzine  $V$  na pojedinim lokacijama. Vrijednosti vršnih i srednjih satnih brzina vjetra rabile su se godinama u određivanju statičkih sila vjetra (sadašnji propisi). Međutim, višegodišnja istraživanja režima strujanja vjetra u Republici Hrvatskoj pokazala su da je broj lokacija s mjerenjima smjera i brzine vjetra i periodom osrednjavanja od 1 sata nedovoljan za poznavanje svih značajki strujanja. To je slučaj u orografski složenim područjima kao što je središnji dio Hrvatske, priobalje, otoci [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] i dr.

Ove spoznaje su i povod za izradu novih hrvatskih norma koje bi se temeljile na vrijednostima brzina vjetra osrednjenih u 10-minutnom ili manjem intervalu, a što

je i preporuka europske prednorme (ENV 1991-2-4) i Svjetske meteorološke organizacije (WMO).

Osim ovih standardnih mjerenja potrebno je za konstrukcije osjetljive na djelovanje vjetra specijalnim mjerenjima istraživati i strujanje vjetra u sekundnim intervalima kako bi se egzaktnije definirale njegove dinamičke značajke s aspekta pobude konstrukcije.

Zbog dinamičkog efekta prirodnog strujanja zraka konstrukcija može oscilirati i u ustaljenom zračnom strujanju, i to u slučaju:

- odvajanja vrtloga na zadnjoj strani tijela koje nema aerodinamički oblik;
- samoodržavajuće nestabilnosti izazvane nestabilnom silom vjetra ili momentom;
- sprege dvaju oblika oscilacija od kojih je svaki za sebe stabilan.

Sve ove pojave su funkcija karakteristika konstrukcije, mase, oblika, krutosti i prigušenja, u čijoj ovisnosti se određuje odziv konstrukcije.

U općem slučaju može se napisati:

$$Pomaci / naprezanja / deformacije konstrukcije = \text{pobuđujuća sila} \times \text{odziv konstrukcije.}$$

U proračunu se pobuđujuće sile i odziv konstrukcije analiziraju odvojeno, a zatim se analizira interakcijsko djelovanje.

Sa stajališta prirode strujanja vjetra i odziva konstrukcije razlikujemo stacionarno i nestacionarno strujanje. Realno strujanje vjetra jest nestacionarno (slučaj bure) i posljedica je turbulentnog strujnog polja oko konstrukcije.

Turbulentni udari vjetra prisilna su pobuda slučajne prirode u pravcu vjetra zbog koje konstrukcija oscilira. Energija pobude se u statističkom smislu definira preko spektra energije, što omogućava određivanje vrijednosti pobude za vlastite frekvencije konstrukcije. Karakteristike odziva konstrukcije su nepromjenjive za danu konstrukciju, tako da se, kombinirajući sve pobude, dolazi do graničnih deformacija. Utjecaji turbulencije vjetra se zbrajaju sa statičkim deformacijama u pravcu djelovanja vjetra, dok ostali utjecaji oscilacija mogu biti pod nekim kutem u odnosu na pravac vjetra. U slučaju da se događa više vrsta oscilacija kao kod kružnih stupova sa zategama, utjecaji se zbrajaju vektorski.

Vidimo da se proračun djelovanja vjetra na konstrukcije ne može promatrati jednoznačno i da je bitno definirati kriterije o podjeli konstrukcija s obzirom na njihovu krutost (osjetljivost na djelovanje vjetra). Isto tako za egzaktan proračun konstrukcija osjetljivih na djelovanje vjetra bitno je imati i odgovarajuće meteorološke podloge o vjetrovnom režimu na pojedinoj lokaciji.

### 3 Proračun djelovanja vjetra na konstrukcije prema preporukama ENV 1991-2-4

#### 3.1 Izbor postupka za proračun

Opterećenja vjetrom mogu se odrediti na dva načina ovisno o krutosti konstrukcije: pojednostavljeno i točno.

*Pojednostavljeni postupak* - vrijedi za one konstrukcije koje po izmjerama nisu podložne titranju ili za konstrukcije srednje osjetljivosti na titranje uz uvrštenje dinamičkog koeficijenta  $C_d$ .

Postupak se može primijeniti za:

- građevine i dimnjake niže od 200 m i
- cestovne i željezničke mostove čiji je najveći raspon manji od 200 m (uz uvjet da je dinamički koeficijent  $C_d < 1,2$  za titranje u smjeru vjetra).

Vrijednosti dinamičkog koeficijenta  $C_d$  ovise o dimenzijama i materijalu građevine.

*Točan postupak* - primjenjuje se na konstrukcije koje su osjetljive na vjetar (podložne titranju) i kod kojih je dinamički koeficijent  $C_d > 1,2$ .

Proračun djelovanja (opterećenja) vjetra na konstrukcije primjenom točnog postupka je u svakom slučaju vjerojatniji i na strani veće sigurnosti, što posebno vrijedi za središnji dio Hrvatske, priobalje i otoke.

#### 3.2 Vjetrovni parametri

##### 3.2.1 Srednja brzina vjetra

Za srednju brzinu vjetra vrijedi izraz

$$V_m(Z) = C_r(Z) \cdot C_t(Z) \cdot V_{ref} \quad (4)$$

gdje je:

$C_r(Z)$  - koeficijent hrapavosti (ovisi o visini iznad tla i hrapavosti terena ovisno o smjeru vjetra);

$C_t(Z)$  - topografski koeficijent (ovisi o topografskim karakteristikama okolnog terena);

$V_{ref}$  - poredbena (referentna) brzina vjetra koja je definirana kao 10-minutna srednja brzina vjetra izmjerena na visini približno 10 m iznad tla, uz uzimanje u obzir vjerojatnosti odstupanja za razdoblje od 50 godina (vijek trajanja konstrukcije). Ova veličina koju još definiraju koeficijenti smjera vjetra, koeficijent ovisan o godišnjem dobu i koeficijent nadmorske visine dobije se iz meteoroloških podloga na nacionalnoj razini.

Koeficijenti  $C_r(Z)$  i  $C_t(Z)$  čine koeficijent položaja  $C_e(Z)$  koji osim učinaka hrapavosti terena i topografije uzima u obzir i učinke visine iznad tla kod srednje brzi-

ne vjetra te utjecaj (stupanj) turbulentnog strujanja. Dan je izrazom

$$C_e(Z) = C_r^2(Z) \cdot C_t^2(Z) \cdot (1+2gI_v(z)) \quad (5)$$

gdje je:

$g$  - vršni faktor,  $I_v(Z)$  - stupanj turbulentnog strujanja.

### 3.2.2 Poredbeni tlak vjetra

To je dinamički ili zaustavni tlak koji proizlazi iz srednje brzine vjetra:

$$q_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \rho V_{\text{ref}}^2, \quad \rho - \text{gustoća zraka.} \quad (6)$$

### 3.2.3 Tlak vjetra na površinu

Pretpostavlja dovoljno krute površine kod kojih se mogu zanemariti njihove rezonantne vibracije uzrokovane vjetrom.

Razlikujemo vanjski, unutarnji i rezultantni tlak.

*Vanjski tlak* - djeluje na vanjsku površinu konstrukcije

$$W_e = q_{\text{ref}} \cdot C_e(Z_e) \cdot C_{pe} \quad (7)$$

gdje je:

$C_{pe}$  - koeficijent vanjskog tlaka (koeficijent oblika) ovisi o obliku i veličini opterećene plohe.

*Unutarnji tlak* - djeluje na unutarnje površine konstrukcije

$$W_i = q_{\text{ref}} \cdot C_e(Z_e) \cdot C_{pi} \quad (8)$$

gdje je:

$C_{pi}$  - koeficijent unutarnjeg tlaka funkcija je omjera otvora kod zgrada.

*Rezultantni tlak* - je razlika tlakova vjetra na svaku površinu uzimajući u obzir i njihov predznak:

(+) - tlak je usmjeren prema površini (pozitivni tlak),

(-) - sišuće djelovanje vjetra (negativni tlak).

### 3.2.4 Sile vjetra zbog tlaka i sile trenja vjetra

*Sila vjetra zbog tlaka* - djelovanje je vjetra na konstrukciju ili konstrukcijske elemente, a može se odrediti na dva načina, ovisno o njihovoj krutosti, i to:

- kao srednja vrijednost rezultantnih sila  $F_w$  ( $C_d > 1,2$ ),
- kao sila koja proizlazi iz zbroja tlakova na plohe konstrukcija ili konstrukcijskih elemenata koji nisu osjetljivi na dinamičku pobudu ( $C_d < 1,2$ ).

Rezultantna sila  $F_w$  određuje se prema izrazu:

$$F_w = q_{\text{ref}} \cdot C_e(Z_e) \cdot C_d \cdot C_f \cdot A_{\text{ref}} \quad (9)$$

gdje je:

$C_f$  - koeficijent sile – koeficijent rezultantnog tlaka;

$A_{\text{ref}}$  - poredbena ploština za  $C_f$  (projicirana ploha pročelja izložena vjetru).

*Sila trenja* - djelovanje je vjetra na konstrukcije ili elemente duž velikih krovnih površina, a izražava se

$$F_{fr} = q_{\text{ref}} \cdot C_e(Z_e) \cdot C_{fr} \cdot A_{fr} \quad (10)$$

gdje je:

$C_{fr}$  - koeficijent trenja,

$A_{fr}$  - površina plohe uzduž koje vjetar puše.

## 4 Meteorološke podloge za određivanje karakterističnog opterećenja vjetrom

Analizirat će se 4 cjeline s dobivenim rezultatima istraživanja:

- raspoloživim podacima mjerenja smjera i brzine vjetra,
- izmjerenih vrijednosti najvećih brzina vjetra na području Hrvatske,
- proračunanih referentnih brzina vjetra,
- ograničenja postignutih rezultata (zaključna diskusija).

### 4.1 Raspoloživi podaci mjerenja smjera i brzine vjetra u Hrvatskoj

Da bi se pravilno ocijenilo djelovanje vjetra na konstrukcije nužno je da podaci mjerenja brzine i smjera vjetra koji se primjenjuje pritom zadovoljavaju sljedeće uvjete:

- da su izmjereni instrumentima koji zadovoljavaju propise Svjetske meteorološke organizacije i Državnog hidrometeorološkog zavoda, te kao rezultat daju 10-minutne uprosječene vrijednosti brzine vjetra,
- da je niz izmjerenih podataka na svakoj od lokacija potpun, homogen i dug najmanje 10 godina,
- da je prostorna raspodjela lokacija mjerenja takva da omogućava uvid u sve raznolikosti strujnog režima nekog područja.

Osvrt na svaki od ovih zahtjeva koji slijedi ukazat će na stanje u Hrvatskoj.

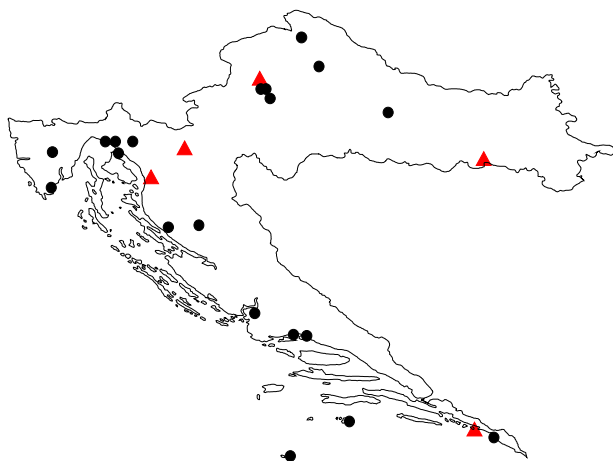
#### 4.1.1 Mjerni instrumenti

Mjerenja smjera i brzine vjetra provode se uglavnom u okviru rada mreže postaja Državnoga hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Anemografi (mjerni sustavi za mjerenje smjera i brzine vjetra) postavljani su pri uspostavi novih ili na već postojeće glavne meteorološke postaje poštujući najviše što je moguće preporuke Svjetske meteorološke organizacije (WMO). Preporuka je WMO-a

da se anemografi postave na 10 m visine nad tlom. Međutim, područje bez prepreka vrlo je rijetko na raspolaganju za postavljanje anemografskog stupa. Stoga se često moraju iskoristiti lokacije postaja za koje se može dobiti lokacijska dozvola i na kojima je moguće angažirati pouzdanog motritelja, pri čemu se nastoji što više zadovoljiti zahtjeve WMO-a.

Jedan dio anemografa, koji su radili ili rade u razdoblju kraćem od 5 godina, vlasništvo su institucija izvan meteorološke službe koje su imale hitne i specifične potrebe za mjerenim podacima vjetra. Anemografi koji nisu u mreži postaja DHMZ-a, no njihovo posluživanje od uspostave do verifikacije podataka obavlja DHMZ, morali su za novu uspostavu zadovoljavati propise i norme WMO-a te dokumente Državnoga hidrometeorološkog zavoda [13].

Prije druge polovine devedesetih godina na velikoj većini meteoroloških postaja mjerenje smjera i brzine vjetra provodilo se Fuessovim anemografima. Podaci kojima raspolažemo na tim postajama su srednje satne brzine i prevladavajući smjer vjetra te najveći udari vjetra u svakom satu - brzina i smjer (slika 1.).



Slika 1. Položaj meteoroloških postaja na zemljovidu Hrvatske na kojima se nalaze anemografi s mogućnošću satnog osrednjavanja brzine vjetra. Trokutom su označene postaje na kojima je promijenjen anemograf i sada postoje 10-minutno osrednjavani podaci

Početkom devedesetih godina u osnovnu se mrežu meteoroloških postaja uključuju postupno i anemografi s mogućnošću sekundnog uzorkovanja. Posebno je na tzv. "investitorskim" postajama uspostavljano mjerenje smjera i brzine vjetra koje omogućava dobivanje osrednjenih brzina i u intervalima manjim od jednog sata. U skladu s postojećim euronormama upravo su ti podaci nužni za proračun referentne brzine vjetra kao podloge za proračun opterećenja konstrukcija vjetrom.

#### 4.1.2 Razdoblja s podacima mjerenja

Raspoloživost podataka mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske, na žalost, nije zadovoljavajuća. Naime, na samo 24 meteorološke postaje raspolažemo s dugogodišnjim kontinuiranim mjerenjima smjera i brzine vjetra (slika 1.). Međutim, na tim se postajama nalaze anemografi koji kao rezultat daju satno osrednjene vrijednosti brzine vjetra i prevladavajući smjer te najveće udare vjetra u pripadnom satu. Kao što je već napomenuto, mjerni instrumenti koji kao razdoblje osrednjavanja imaju 10 minuta počeli su se u mreži mjernih postaja Državnoga hidrometeorološkog zavoda upotrebljavati početkom devedesetih godina. Takvim mjerenjima brzine i smjera vjetra u trajanju od najmanje 10 godina ne raspolažemo. Međutim, na 21 postaji u Hrvatskoj niz 10-minutnih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra dug je više od 3 godine (tablica 1. i slika 2.). Na nekim se od lokacija može uočiti veliki broj nedostajućih podataka (NP). U tom se smislu izdvajaju lokacije Puntijarka, Gotalovo, Maslenički most i vrh Učke. Stoga rezultati analize koji slijede za te postaje nisu potpuno pouzdani.

Svi raspoloživi podaci mjerenja smjera i brzine vjetra na navedene 21 postaje (zaključno s 1999.) poslužili su kao osnova za našu analizu.

Iako niz 10-minutnih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra kojim raspolažemo nije dovoljno dug za cjelovitu analizu strujnog režima i sasvim pouzdanu procjenu referentne brzine kao podloge za ocjenu opterećenja vjetrom, analiza na osnovi raspoloživih podataka pokazala je osnovne značajke očekivanih brzina vjetra na području Hrvatske.

#### 4.1.3 Prostorna pokrivenost mjerenjima smjera i brzine vjetra

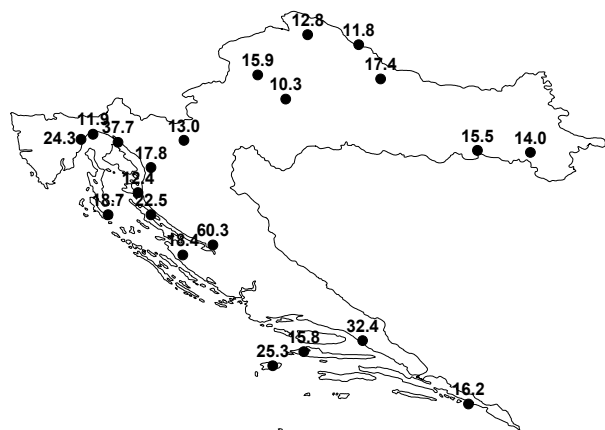
Strujanje zraka nad nekim područjem odraz je primarne cirkulacije koja se uspostavlja globalnom raspodjelom tlaka zraka, značajnom za topli i hladni dio godine, odnosno četiri godišnja doba. Međutim, promjene tlaka zraka makrorazmjera i u kraćim vremenskim razdobljima generiraju sekundarnu cirkulaciju. To su pokretni cirkulacijski sustavi koji uzrokuju lokalne vjetrove različitih karakteristika ovisno o reljefu tla, svojstvima podloge i zračnih masa. Isto tako postoje cirkulacije *mezo* i lokalnih razmjera koje se ne vide na sinoptičkim kartama. One su posljedica periodičke termičke promjene zbog lokanih značajki terena. Stoga su prizemni karakteristični vjetrovi rezultat makrostrujanja toplog i hladnog zraka koji se u najnižim slojevima troposfere modificiraju različitim utjecajima.

Tako položaj priobalja i otoka, te orografska složenost jadranskog područja uvjetuje složenu cirkulaciju atmos-

fere ne samo pri tlu, nego i na visini. Uz termički uvjetovanu obalnu cirkulaciju i cirkulaciju obronka, veliki utjecaj na strujanje, osobito na njegovu promjenu s visinom, ima i blizina i položaj planinskoga kopnenog zaleđa koji u određenim vremenskim uvjetima može pogodovati pojavi vremenskih situacija karakteriziranih pojavom pojačanog vjetra velikoga horizontalnog i vertikalnog smicanja, turbulencije te znatnih uzlaznih i silaznih gibanja zraka.

Dakle, vjetrene prilike na području Hrvatske određene su zemljopisnim položajem, razdiobom baričkih sustava opće cirkulacije, utjecajem mora i kopnenog zaleđa, dobom dana i godine i dr. Svakako da su pojedini lokaliteti pod utjecajem i drugih čimbenika kao što su izloženost, konkavnost i konveksnost reljefa, nadmorska visina i sl.

Ovako kompleksna situacija pokazuje da je, ako se želi dobiti potpun uvid u strujni režim na području Hrvatske, nužno raspolagati podacima mjerenja smjera i brzine vjetra na velikom broju lokacija. Naime, smjer i brzina vjetra iznimno su lokalno uvjetovane veličine i izmjereni podatak na nekoj od lokacija je reprezentativan samo za tu lokaciju i neposredno uz nju. To je posebno izraženo u orografski složenom području kao što je priobalje i otoci Hrvatske. Upravo se na tom području i uočava najveći nedostatak izmjerenih podataka smjera i brzine vjetra (slika 2.). Na potezu između Zadra i Makarske, te Makarske i Dubrovnika ne postoji niti jedna lokacija s podacima mjerenja smjera i brzine vjetra osrednjenim u intervalu od 10 minuta.



Slika 2. Položaj meteoroloških postaja na kojima se nalaze anemografi s mogućnošću 10-minutnog osrednjavanja brzine vjetra i očekivane referentne najveće 10-minutne brzine vjetra za povratno razdoblje 50 godina prema Gumbelovoj razdiobi ( $V_{G_{ref10min}}$ )

Takva prostorna raspodjela lokacija s mjerenim podacima u orografski izuzetno složenom području ne omogućava stručno opravdani kartografski prikaz, odnosno prostorno zoniranje područja Hrvatske s obzirom na

proračunatu referentnu brzinu vjetra, a time i izradu pouzdanih meteoroloških podloga za izradu nacionalnih normativnih dokumenata.

Ipak proračuni referentne brzine na svakoj od analiziranih lokacija pokazuju opće značajke prostorne raznolikosti ove veličine.

#### 4.2 Najveće izmjerene brzine vjetra na području Hrvatske

Zahtjevi za meteorološkim podlogama za opterećenje vjetrom na pojedinačne građevine i konstrukcije s kojima se susrećemo u meteorološkoj praksi pokazuju da se u građevinskoj praksi za procjenu opterećenja vjetrom veoma često rabi niz podataka godišnjih izmjerenih najvećih udara vjetra i na osnovi toga procijenjeni očekivani udar u povratnom razdoblju od 50 godina. Najveći je udar, međutim, trenutna vrijednost brzine vjetra i ne odražava u pravoj mjeri utjecaj vjetra na konstrukciju. Naime, sa stajališta prirode vjetra i odziva konstrukcije razlikujemo stacionarno i nestacionarno strujanje. Realno strujanje je najčešće nestacionarno (posebno u slučaju mahovitih i turbulentnih vjetrova kao što je bura). Međutim, određivanje intervala osrednjavanja brzine, koji u najboljoj mjeri reprezentira nestacionarnost strujanja, je složeno i ne ovisi samo o prirodi strujanja, već i o vrsti konstrukcije na koju strujanje djeluje. Detaljna diskusija ovog problema dana je u radu koji slijedi gdje se upozorava na značenje odabira intervala osrednjavanja brzine vjetra za ocjenu opterećenja na osnovi analize mahovitosti (odnos prosječnih i trenutnih brzina vjetra) karakterističnih vjetrova na Jadranu. Međutim, kako postojeći ENV-1991-2-4 definira najveću srednju 10-minutnu vrijednost brzine vjetra kao ulazni podatak za procjenu opterećenja vjetrom, ovdje smo se ograničili na uporabu upravo tih podataka za proračun referentnih brzina.

Zabilježene vrijednosti najvećih srednjih 10-minutnih brzina te udara vjetra za 21 mikroM anemografsku postaju prikazane su u tablici 1. Iako je pri usporedbi podataka s više postaja nužno voditi računa o nejednakosti razdoblja iz kojih podaci potječu, ipak se mogu uočiti različitosti kopnenog i priobalnog dijela Hrvatske. U kontinentalnom dijelu Hrvatske raspon  $v_{10min}$  kreće se od 9,7 m/s u Oborovu do 22,0 m/s na Bilogori, a  $v_{max}$  od 16,4 m/s do 33,5 m/s. Smjer vjetra je na kopnenom dijelu Hrvatske u trenucima najvećih brzina vjetra najčešće W-NW-N. Naime, na ovim se područjima velike brzine vjetra bilježe uz prolaze frontalnih sustava najčešće sa sjeverozapada. Za razliku od toga, vjetar najvećih brzina na priobalju i otocima gotovo je isključivo NE-

NNE smjera (bura) ili SSE-SE (jugo) [1, 18]. Na priobalju najniže vrijednosti brzine vjetra zabilježene su u Opatiji ( $v_{10\min} = 13,8$  m/s i  $v_{\max} = 18,5$  m/s), a najveće na Masleničkom mostu ( $v_{10\min} = 43,5$  m/s i  $v_{\max} = 69,0$  m/s). Najveće brzine vjetra na Masleničkom mostu apsolutno su i najveće brzine vjetra koje su uopće ikada izmjerene u Hrvatskoj. Apsolutni maksimalni udar vjetra od 69,0 m/s izmjeren je 21. prosinca 1998. godine iz NNE smjera (bura). Međutim, potrebno je također naglasiti da su izuzetno velike brzine vjetra izmjerene i na Krčkom mostu ( $v_{10\min} = 41,0$  m/s i  $v_{\max} = 51,0$  m/s) te u Makarskoj ( $v_{10\min} = 32,8$  m/s i  $v_{\max} = 59,0$  m/s). Tako velike brzine vjetra posljedica su specifičnog položaja anemografa na spomenute tri lokacije koje su otvorene prodorima bure iz prijevoja u planinskom zaleđu. Prema klasičnim mjerenjima (satno osrednjavanje), najveći udari vjetra veći od 45 m/s zabilježeni su na Palagruži (56,9 m/s), Martinšćici pokraj Rijeke (50,0 m/s), Split-Marjanu (48,5 m/s), Senju (48,0 m/s) i Karlobagu (47,2 m/s).

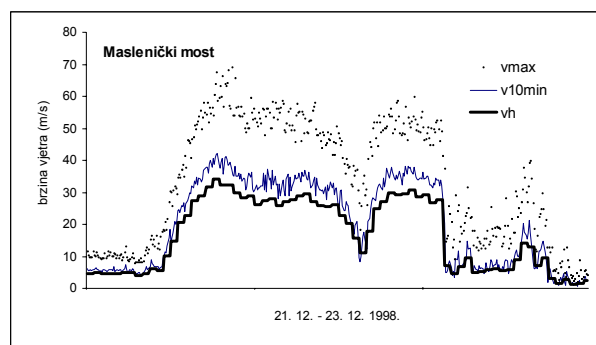
Tablica 1. Apsolutni ( $v_{\max}$ , m/s) najveći udari vjetra i najveće srednje 10-minutne brzine vjetra ( $v_{10\min}$ , m/s) te njihove razlike ( $\Delta = v_{\max} - v_{10\min}$ ) za postaje s 10-minutnim osrednjavanjem brzine vjetra

Br.	Postaja	Nadm. visina [m n.m.]	Visina anemografa [m]	Razdoblje	$v_{\max}$	$v_{10\min}$	$\Delta$
1	Gradište	97	10	1996.-1999.	23,4	14,7	8,7
2	Slav. Brod	107	12	1995.-1999.	26,8	15,1	11,7
3	Bilogora	262	15	1995.-1999.	33,5	22,0	11,5
4	HE Čakovec	170	14	1995.-1999.	22,7	13,9	8,8
5	Gotalovo*	122	10	1989.-1993.	21,3	12,0	9,3
6	Puntijarka*	988	28	1995.-1999.	34,8	16,6	18,2
7	Oborovo	101	12	1995.-1999.	16,4	9,7	7,7
8	Ogulin	328	10	1992.-1995.	26,2	13,4	12,8
9	Opatija	5	15	1996.-1999.	18,5	13,8	5,7
10	Vrh Učke*	1372	12	1995.-1999.	44,8	23,7	21,1
11	Most Krk	57	3	1997.-1999.	51,0	41,0	10,0
12	Senj	26	10	1995.-1998.	32,6	17,2	15,4
13	Mali Lošinj	24	13	1995.-1999.	31,9	18,7	13,2
14	Rab	53	10	1997.-1999.	26,9	14,0	12,9
15	Novalja	20	10	1994.-1999.	39,9	24,0	15,9
16	Masl. most*	90	3	1995.-1999.	69,0	43,5	25,5
17	Zadar	5	13	1995.-1999.	27,6	17,6	10,0
18	Hvar	20	15	1996.-1999.	43,8	27,4	16,4
19	Hum-Vis	587	10,5	1994.-1999.	38,8	26,3	12,5
20	Makarska	52	11	1995.-1999.	59,0	32,8	26,2
21	Dubrovnik	52	10	1995.-1999.	29,7	17,2	12,5

\* postaje na kojima broj nedostajućih podataka prelazi 20%

Bura, kao izrazito mahovit vjetar, nužno utječe na konstrukcije bitno različito od stalnih vjetrova koji se pojavljuju u kontinentalnom području Hrvatske. Stoga je izuzetno značajno koji se podatak u smislu intervala osrednjavanja primjenjuje pri proračunu opterećenja konstrukcija vjetrom na području otoka i priobalja [2, 8].

Primjer vremenske situacije s olujnom burom na Masleničkom mostu dan na slici 3. pokazuje u kojoj se mjeri kod vjetra tipa bure mogu razlikovati srednje satne brzine vjetra od srednjih 10-minutnih i najvećih udara. Odnos najvećih 10-minutnih brzina vjetra i najvećih udara predmet je rada koji slijedi i ovdje se tom problematikom stoga nećemo posebno baviti.



Slika 3. Vremenski hod srednje 10 minutne ( $v_{10\min}$ ), srednje satne ( $v_h$ ) brzine vjetra i najvećih udara ( $v_{\max}$ ) na Masleničkom mostu u razdoblju od 21. do 23. prosinca 1998. godine

Zajednička obilježja mjesečnih vrijednosti najvećih brzina vjetra s različitih postaja mogu se uočiti na razdobljima relativnih čestina mjesečnih najvećih srednjih 10-minutnih brzina i mjesečnih najvećih udara vjetra. U kontinentalnom dijelu Hrvatske mjesečne su najveće srednje 10-minutne brzine najčešće između 6 m/s i 12 m/s, a mjesečni najveći udari vjetra između 10 m/s i 20 m/s. Na priobalnim postajama gdje je reljef tla vrlo razvijen, a time i položaj samih postaja znatnije različit, i razdiobe relativnih čestina brzine vjetra su različitije. Na većini postaja ne postoji jedan izraženiji maksimum nego je s podjednakom relativnom čestinom zastupljeno i nekoliko razreda brzine vjetra. To se još više ističe pri mjesečnim najvećim udarima vjetra.

Na kraju analize izmjerenih najvećih 10-minutnih brzina vjetra na području Hrvatske nužno je ponovno naglasiti da bi rezultati analize bili znatno pouzdaniji da se raspolagalo nizom podataka dugim najmanje 10 godina.

### 4.3 Procjena referentne brzine vjetra

Definicija referentne brzine  $V_{\text{ref}}$  kao najveće 10-minutne srednje brzine vjetra na visini 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II koja se može očekivati jednom u 50 godina uvjetuje primjenu statističkih metoda proračuna ekstrema. Za statistički pouzdanu ocjenu razdiobe ekstremnih vrijednosti, kao što su najveće godišnje brzine vjetra, nužno je raspolagati dugim nizom podataka (u slučaju vjetra najmanje 10 godina). Međutim, najčešće se u praksi susrećemo s postojanjem niza podataka ekstremnih vrijednosti u znatno kraćem razdoblju. Takva je

situacija i s raspoloživim podacima srednjih 10-minutnih vrijednosti brzine vjetra na postajama na području Hrvatske. S problemom nedovoljno dugog niza podataka mjerenja brzine i smjera vjetra susretali su se mnogi autori kao prijerice, Sneyers, Vandiepenbeeck, Gomes, Vichery i Ahmed, [19, 20, 21]. Osnovna je razlika u podacima koji su upotrijebljeni kao ulazni za primjenu teorije ekstrema. Stoga je i ovdje ispitana ovisnost rezultata procjene najvećih brzina o nizu ulaznih podataka, i to za sljedeće podatke:

- Umjesto ekstremnih godišnjih brzina vjetra upotrijebljene su najveće mjesečne vrijednosti najvećih 10-minutnih brzina.
- Budući da je poznato da se najveće brzine vjetra na području Hrvatske najčešće pojavljuju tijekom hladnog dijela godine, kao niz podataka upotrijebljeni je skup mjesečnih najvećih 10-minutnih brzina za mjesec studeni-travanj.
- Jedna od metoda koja se navodi u radu [20] Sneyersa i Vandiepenbeecka jest proračun očekivanih ekstrema na osnovi srednjih 10-minutnih brzina koje prelaze određeni prag. Princip rada te metode je sljedeći: ako pretpostavimo da najveće godišnje vrijednosti čine mali postotak od čitave populacije i ako znamo da je maksimalna vrijednost ujedno i najveća među velikima, funkcija razdiobe najvećih vrijednosti može se dobiti na osnovi funkcije razdiobe velikih vrijednosti iz relativnog kratkog niza podataka. Način na koji se određuje koje su vrijednosti velike ovisi o svojstvima čitavog skupa podataka, tj. strujnom režimu na promatranj lokaciji. Poznavajući režim strujanja na postajama s podacima kontinuiranih mjerenja smjera i brzine vjetra, te imajući na umu statističke zahtjeve na primjenu teorije ekstrema, kao ulazni podaci (uzorak) iskorištene su mjesečne najveće vrijednosti srednjih 10-minutnih brzina vjetra koje prelaze donji kvartil (ako se mjesečne najveće vrijednosti brzine poredaju po veličini, donji kvartil je ona vrijednost koja se nalazi na 25% udaljenosti od najmanje mjesečne vrijednosti).

Na osnovi tako odabranih uzoraka za procjenu očekivanih ekstrema primijenjena je klasična generalizirana teorija ekstrema opisana u radovima [14, 16, 17]. Generaliziranu razdiobu ekstremnih vrijednosti meteoroloških podataka prvi je put uporabio Jenkinson. On je dao opći oblik troparametarske razdiobe ekstrema koji zadovoljava postulat stabilnosti

$$P(x) = \exp[-e^{-y(x)}] \quad (11)$$

gdje je  $P(x)$  vjerojatnost da je godišnji ekstrem najviše jednak  $x$ , a  $y(x)$  je reducirana varijanta:

$$y = -\ln [-\ln 1/P(x)]. \quad (12)$$

Jenkinsonovo opće rješenje postulata stabilnosti (Frechet, 1927.) ima oblik:

$$x = x_0 + \alpha[(1-e^{-ky})/k]. \quad (13)$$

Veličina  $x_0$  je vrijednost koja se može očekivati jednom godišnje uz  $y = 0$ ,  $\alpha$  je nagib  $x$ ,  $y$  krivulje u točki  $x = x_0$  i  $y = 0$  i  $k$  je parametar zakrivljenosti.

Opće rješenje uključuje sva tri tipa Fisher Tippetova (1928.) granična slučaja:

- za  $k > 0$  krivulja (13) se asimptotski približava vrijednosti  $x_{\max} = x_0 + \alpha/k$ ,
- za  $k = 0$  krivulja (13) ima oblik pravca  $x = x_0 + \alpha y$  i teži u beskonačnost,
- a za  $k < 0$  krivulja (13) nema gornje granice, a donja asimptota iznosi  $x_{\min} = x_0 - \alpha/k$ .

Povratno razdoblje  $T(x)$  definirano je kao srednji vremenski razmak koji proteče između dva premašaja vrijednosti  $x$ . Veza između procijenjenog ekstrema  $x$  i pripadnog povratnog razdoblja  $T$  dana je izrazom:

$$1/T = 1 - P(x). \quad (14)$$

Za potrebe ovoga rada upotrijebljen je program za izračunavanje parametara troparametarske Jenkinsonove razdiobe te očekivanih najvećih vrijednosti za povratno razdoblje od 50 godina koji je sastavni dio izvješća Faraga i Katza [14] u seriji publikacija koje izdaje WMO u okviru "Svjetskog klimatskog programa – primjena". Procijenjeni parametri izračunani su metodom najvećih vjerojatnosti.

U tablici 2. navedeni su rezultati proračuna navedenim metodama za 4 postaje odabrane na osnovi potpunosti niza mjerenih podataka i položaja u različitim dijelovima Hrvatske koristeći se A-C skupovima ulaznih podataka.

Tablica 2. Proračunane očekivane najveće srednje 10-minutne brzine za povratno razdoblje od 50 godina prema Jenkinsonovoj metodi na osnovi korištenih skupova ulaznih podataka A ( $V_{A10\min}$ ), B ( $V_{B10\min}$ ) i C ( $V_{C10\min}$ )

Postaja	$V_{A10\min}$	$V_{B10\min}$	$V_{C10\min}$
Gradište	13.5 m/s	13.7 m/s	13.7 m/s
Ogulin	12.6 m/s	12.3 m/s	15.5 m/s
Novalja	22.3 m/s	23.5 m/s	24.6 m/s
Hum na Visu	24.8 m/s	22.6 m/s	25.6 m/s

Poznavajući režim strujanja na postajama s podacima kontinuiranih mjerenja smjera i brzine vjetra, te imajući na umu pretpostavke koje zahtijeva primjena teorije ekstrema (izabrana funkcija razdiobe ekstrema je dobro prilagođena stvarnim podacima), procjenu očekivanih najvećih 10-minutnih brzina vjetra koje čine meteorološki ekstremi



lošku podlogu za ocjenu opterećenja konstrukcija koja slijedi zasnivali smo na podacima C.

Da bi se dobile usporedive referentne brzine za svaku od lokacija bilo je potrebno ove podatke korigirati na način dan u euronormama (ENV-1991-2-4) na visinu od 10 m i teren hrapavosti II (poljoprivredno zemljište s kućama i drvećem).

Meteorološke postaje s mjerenjima smjera i brzine vjetra nalaze se u raznim topografskim uvjetima, a anemografi se nalaze na raznim visinama. Vrlo mali broj postaja zadovoljava kriterij smještaja na terenu hrapavosti II s visinom anemografa 10 m. Većina postaja smještena je na brežuljkastom terenu i gradskom području. Redukcija podataka brzine vjetra na visinu 10 m najčešće se provodi logaritamskim ili ekspanencijalnim zakonom za profil brzine vjetra. U tehničkim se primjenama najčešće rabi ekspanencijalni zakon koji ima oblik:

$$V_{z2} = V_{z1}(z_2/z_1)^\alpha \quad (15)$$

gdje je  $\alpha$  eksponent koji ovisi o hrapavosti podloge, brzini vjetra, termičkoj stratifikaciji i turbulenciji atmosfere u sloju u kojem se razmatra promjena brzine vjetra s visinom.

Iako se ovaj izraz redovito rabi u praksi, stvarna promjena brzine vjetra (a posebno najvećih vrijednosti) nedovoljno je poznata i u svijetu, a posebno kod nas. Upravo ove godine, prvi put u Hrvatskoj, na Dubrovačkom mostu mjereno je profil vjetra po visini u tri točke 10, 50 i 140 m.

Primjena teorije ekstrema na skup podataka 10-minutnih brzina vjetra i najvećih udara korigiranih na visinu 10 m iznad tla i teren hrapavosti II dala je najveće srednje 10-minutne brzine vjetra i najveće udare vjetra što se mogu očekivati u povratnom razdoblju od 50 godina navedene u tablici 3.

Kako je procijenjeni parametar  $k$  Jenkinsonove razdiobe na nekim od postaja manji od 0, na tim su postajama proračunate očekivane vrijednosti za 50 godišnje povratno razdoblje nerealno velike. Takav je slučaj s očekivanim najvećim 10-minutnim srednjim brzinama vjetra i najvećim udarima na postajama: Most Krk, Hvar i Makarska. Uz to se izdvajaju posebno velike vrijednosti očekivanih brzina vjetra dobivene za lokacije mostova, što je dijelom posljedica korekcije na visinu od 10 m. Naime, anemografi su na mostovima smješteni na visini od 3 m, pa korekcija na visinu od 10 m daje znatno veće vrijednosti. U kojoj se mjeri promjena brzine vjetra s visinom u slučaju vjetrova koji pušu na području priobalja i otoka doista ponaša prema ekspanencijalnom zakonu potrebno bi bilo dodatno istražiti i time potvrditi pouzdanost ovako dobivenih podataka.

Tablica 3. Proračunate očekivane najveće srednje 10-minutne brzine vjetra ( $VJ_{10\min}$  – nekorigirane i  $VJ_{ref10\min}$  – korigirane; izražene u m/s) i najveći udari vjetra ( $VJ_{\max}$  – nekorigirane i  $VJ_{ref\max}$  – korigirane; izražene u m/s) za povratno razdoblje od 50 godina prema Jenkinsonovoj, te  $VG_{ref10\min}$  i  $VG_{ref\max}$  prema Gumbelovoj razdiobi.  $DK_{10\min}$  (m/s) - donji kvartil, tj. prag brzine koji prelaze ulazni podaci koji čine uzorak za proračun očekivanih ekstrema

Postaja	$DK_{10\min}$	$VJ_{10\min}$	$VJ_{ref10\min}$	$VJ_{\max}$	$VJ_{ref\max}$	$VG_{ref10\min}$	$VG_{ref\max}$
Gradište	8.2	13.7	13.8	24.7	24.7	14.0	22.5
Slavonski Brod	10.5	18.5	17.8	26.9	26.3	15.5	26.7
Bilogora	10.4	20.4	19.3	32.8	31.0	17.4	30.3
HE Čakovec	7.4	14.1	13.3	24.8	23.7	12.8	21.9
Gotalovo	10.4	13.0	13.1	21.9	21.9	11.8	22.2
Puntijarka	9.3	18.2	15.6	33.3	29.0	15.9	27.9
Oborovo	5.1	9.8	9.9	16.9	17.1	10.3	17.3
Ogulin	6.4	15.5	15.5	30.3	30.3	13.0	26.2
Opatija	6.5	12.9	12.1	18.6	17.6	11.9	20.1
Vrh Učke*	12.2	23.9	23.3	44.9	43.8	24.3	41.9
Most Krk*	14.9	37.3	44.1	77.0	91.1	37.7	61.5
Senj	10.7	18.3	18.3	36.0	36.0	17.8	34.7
Rab	6.7	13.2	13.1	27.8	26.6	12.4	24.5
Mali Lošinj	9.6	18.7	18.7	31.6	31.6	18.7	31.6
Novalja*	11.7	24.6	24.6	41.8	41.8	22.5	40.4
Maslenički most*	15.3	48.2	57.0	75.5	89.5	60.3	84.8
Zadar	9.8	17.5	16.8	27.0	26.0	18.4	27.0
Hum-Vis	15.9	25.6	25.5	42.0	41.5	25.3	35.8
Hvar	7.4	27.0	26.1	42.2	39.8	15.8	29.0
Makarska*	14.5	39.5	38.6	78.6	76.9	32.4	56.1
Dubrovnik	9.1	18.5	18.5	27.8	27.8	16.2	27.6

\* postaje na kojima broj nedostajućih podataka prelazi 20%

Tablica 4. Zone različitih vrijednosti referentnih brzina vjetra i postaje koje su im pridružene.  $VJ_{ref10\min}$  – očekivane najveće 10-minutne brzine vjetra korigirane na visinu 10 m i tlo hrapavosti II,  $VJ_{ref\max}$  – očekivani maksimalni udari vjetra korigirani na 10 m visine i tlo hrapavosti II.

Kateg.	$VJ_{ref10\min}$	$VJ_{ref\max}$	Postaje
A	10-15 m/s	< 25 m/s	Gotalovo, Oborovo, Čakovec, Gradište, Opatija
B	15-20 m/s	25-30 m/s	Slavonski Brod, Bilogora, Puntijarka, Ogulin, Rab, Mali Lošinj, Zadar, Dubrovnik
C	15-25 m/s	35-45 m/s	Novalja, Senj, Vrh Učke
D	25-30 m/s	35-45 m/s	Hum na Visu, Hvar
E	> 30 m/s	> 45 m/s	Makarska, Most Krk, Maslenički most

Da bi se na osnovi dobivenih rezultata odredile zajedničke značajke pojedinih lokacija, definirali smo nekoliko zo-

na (tablica 4.). Promatrajući dane rezultate uočava se da se u unutrašnjosti Hrvatske može očekivati da maksimalna srednja 10- minutna brzina ne bude veća od 20 m/s. Situacija na otocima i priobalju je složenija. Ovdje su procijenjene najveće 10-minutne brzine na najvećem dijelu otoka i priobalja 15-25 m/s. Izuzetak čine lokacije koje svojim specifičnim položajem pokazuju mogućnost najvećih 10-minutnih brzina vjetra većih od 35 m/s.

## 5 Zaključak

Složenost strujnog režima na području Hrvatske uzrokuje i veliku raznolikost u procijenjenim referentnim brzinama vjetra. Procjena je izvršena u skladu s preporukama za izradu europskih normi. Rezultati procjene očekivanih 10-minutnih brzina i najvećih udara prikazani u ovom radu, međutim, ne smiju se smatrati završnim korakom u izradi meteorološke podloge za hrvatske norme – opterećenje vjetrom. Razloga za to jest nekoliko:

a) Prostorna pokrivenost Hrvatske mjerenjima smjera i brzine vjetra je na nekim područjima nedovoljna (otoci, priobalje i planinsko zaleđe).

Ovakva prostorna raspodjela lokacija s mjerenim podacima ne omogućava stručno opravdani kartografski prikaz, odnosno prostorno zoniranje područja Hrvatske s obzirom na proračunanu referentnu brzinu vjetra. Primjenom podataka mjerenja smjera i brzine vjetra na postajama sa satnim osrednjavanjem brzine vjetra prostorna bi se pokrivenost povećala. Međutim, pri tom je neophodno istražiti odnos brzina vjetra osrednjenih u različitim intervalima. Način na koji je to moguće učiniti i rezultati dobiveni na osnovi podataka mjerenja na Novalji dani su u radu koji slijedi.

b) Dobiveni rezultati ne razlučuju smjer vjetra (očekuje se da bi analiza koja bi se odnosila na svaki od smjerova pojedinačno pokazala znatnija odstupanja od navedenih podataka za neke smjerove kao što su smjer juga i bure)

c) Metode procjene očekivanih maksimuma svakim danom se usavršavaju i pojavljuju se nove (naročito za slučaj kratkog niza podataka) pa su na tom području potrebna dodatna istraživanja kako bi se odredila ona koja je najadekvatnija za vjetrove prilike koje vladaju na području Hrvatske.

d) Određivanje najadekvatnijeg intervala osrednjavanja brzine vjetra za procjenu očekivanih brzina u slučajevima izrazito mahovitog i turbulentnog vjetra kao što je bura također je područje koje traži dodatna istraživanja. Da bi se ovaj problem mogao ispitati, nužno je raspolagati podacima mjerenja smjera i brzine vjetra i u intervalima kraćim od 10 minuta. Jedinstveni skup podataka koji omogućuje istraživanja ove problematike dobiven je na području Tugare gdje su na tri lokacije uspostavljena sekundna mjerenja u trajanju od 2 mjeseca u sklopu rada na znanstveno-istraživačkom projektu "Dinamičko djelovanje vjetra na konstrukcije". Publiciranje rezultata tih istraživanja slijedit će uskoro.

e) Za proračun visokih konstrukcija nužno je poznavati i vertikalnu promjenu brzine i smjera vjetra s visinom. Na području Hrvatske do sada nismo raspolagali takvim podacima koji bi nam omogućili da pokažemo opravdanost uporabe postojećih metoda u svrhu procjene promjene vjetra s visinom. Zato će podaci navedenih mjerenja na pilonu Dubrovačkog mosta biti dragocjeni za proračun visokih i vitkih konstrukcija.

Na kraju je posebno važno istaknuti da na nekim područjima zbog izuzetne složenosti orografije nije sasvim jednostavno procijeniti očekivane najveće brzine vjetra pa je stručno znanje meteorologa neophodno. Na žalost, multidisciplinarni pristup u istraživanjima ove problema i primjeni rezultata nije dovoljno prisutan. Vjerujemo da će ovaj rad biti jedan od značajnijih koraka u tom smjeru.

### Zahvala

U ovom radu prikazan je dio rezultata istraživanja znanstveno-istraživačkoga projekta *Dinamičko opterećenje konstrukcija vjetrom* (083134) što ga je sufinanciralo Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske i Telekomunikacijski centar u Splitu. Također su korišteni rezultati studije *Meteorološke podloge za hrvatske norme – opterećenje snijegom, ekstremne temperature zraka i opterećenje vjetrom* izrađene prema narudžbi IGH Zagreb.

## LITERATURA

- [1] Bajić, A.: *Severe bora on the northern Adriatic*. Part I: Statistical analysis, *Rasprave (Papers)* 24, 1.-9. 1989.
- [2] Bajić A.; Glasnović D.: *Impact of severe Adriatic Bora on traffic*, Zbornik radova 4th European Conference on Application of Meteorology na CD, Norrköping, Sweden, (13.-17. September 1999.).
- [3] Poje, D.: *Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u RH*, *Građevinar* 37 (1985), 1, 7.-14.
- [4] Sachs, P.: *Wind Forces in Engineering*, Pergamon Press, Oxford, 1978.
- [5] Peroš, B.: *Modelling of the Bora effects upon the lower layer*, *Engineering modelling* 7 (1994) 3-4, 81.-95.
- [6] Peroš, B.: *Sigurnost konstrukcija dominantno opterećenih vjetrom*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 1995.

- [7] Peroš, B.: *Constructional Steel Design for Structures with a Dominant Bora Load*, Journal of constructional steel research, 46 (1998), 1-3, 321.-322.
- [8] Cividini, B.; Peroš, B.; Žibrat, Z.; Bajić, A.: *Važnost postojanja mjerenja smjera i brzine vjetra na lokaciji građevinskog objekta – primjer Masleničkog mosta*, Četvrti opći sabor hrvatskih građevinskih konstruktora, Brijunski otoci 11.6. – 13.6. 1998.
- [9] Peroš, B.; Boko, I.: *Reliability of steel bridges exposed to the bora wind action*. International Conference on Steel Structures of the 2000s, Istanbul, 2000., 51.-56.
- [10] Peroš, B.; Boko, I.: *Investigations of the effects of the Bora wind load upon transmission line pylons*, 3. Međunarodni kongres Hrvatskog društva za mehaniku, Zbornik radova str. 587.-594., rujanj, 28.-30., 2000.
- [11] Peroš, B.; Boko, I.: *Sigurnost čeličnog dimnjaka ovisno o lokalnom djelovanju vjetra*, Peti opći sabor HDGK, Zbornik radova str. 657.-662., Brijunski otoci, travanj, 26.-28., 2001.
- [12] ENV 1991-2-4.: *Basic of design and action on structure – Actions on structures – Wind loads*, 1995., 153 str.
- [13] DHMZ: *Tehnički zahtjevi, "Tehnički zahtjevi za mikroprocesorske anemografe i automatske meteorološke sustave u osnovnoj mreži postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda"*, 1996., 75 str.
- [14] Farago, T.; Katz, R. W.: *Extremes and Design Values in Climatology*, WMO/TD-NO. 386, WCAP-14 (1990) 46 str.
- [15] Gumbel, E. J.: *Statistics of extremes*. Columbia Univ. Press, New York 1958.
- [16] Jenkinson, A. F.: *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements*. Quart. J. R. Met. Soc. 87 (1955) 158.-171.
- [17] Jenkinson, A. F.: *Statistics of extremes, Estimation of Maximum Floods*, WMO, Technical Note No. 98 (1969) Chapter 5.
- [18] Vučetić, V.: *Severe Bora on Mid-Adriatic*, Hrvatski meteorološki časopis, Vol. 28 (1993) 19.-36.
- [19] Ahmed, S. I.: *On estimating extreme wind speeds from short-period data*, Meteorological Applications 2 (1995) 127.-130.
- [20] Sneyers, R.; Vandiepenbeeck, M.: *On the use of large values for the determination of the distribution of maximum values*, Arch. Met. Geoph. Biocl. Ser. B (1983) 32, 279.-286.
- [21] Gomes, L.; Vichery, B.J.: *Extreme wind speeds in mixed climates*, J. Ind. Aerod. (1978) 2, 331.-344.