

Podloge za nove hrvatske norme za opterećenje vjetrom

Bernardin Peroš, Ivica Boko, Tihomir Šimunović, David Kuzmanić

Ključne riječi

hrvatske norme,
opterećenje vjetrom,
eurokod,
nacionalni dodatak,
konstrukcija,
pouzdanost

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović, D. Kuzmanić

Prethodno priopćenje

Podloge za nove hrvatske norme za opterećenje vjetrom

U radu su prikazana terenska istraživanja režima strujanja vjetra na temelju profilnih mjerenja na lokacijama Splita i Dubrovnika u cilju definiranja nacionalnog dodatka za novu hrvatsku normu o opterećenju vjetrom. Rezultati istraživanja su potvrdili potrebu modificiranja vrijednosti koeficijenta izloženosti vjetru $c_e(z)$ za obalno područje u odnosu na europsku normu. Osim hrapavosti i orografije terena uzeti su u obzir i učinci nadmorske visine i turbulentnog strujanja vjetra.

Key words

Croatian standards,
wind load,
Eurocode,
national annex,
structure,
reliability

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović, D. Kuzmanić

Preliminary note

Support data for new Croatian wind-load standards

Field studies of wind flow regimes, based on profile measurements at appropriate Split and Dubrovnik localities, and aimed at defining the National Annex to the new Croatian wind load standard, are presented. The results obtained confirm that the wind susceptibility coefficient $c_e(z)$ for coastal area should differ from the corresponding European standard. In addition to the unevenness and orography of terrain, the studies take into account the effects of altitude and turbulent wind flow.

Mots clés

normes croates,
charge de vent,
Eurocode,
annexe nationale,
structure,
fiabilité

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović, D. Kuzmanić

Note préliminaire

Données de base pour les nouvelles normes croates relatives à la charge de vent

Les études de terrain des régimes de vent, basées sur mesure de profils aux localités appropriées de Split et Dubrovnik, et visées à définir l'Annexe Nationale à la nouvelle norme croate de la charge de vent, sont présentées. Les résultats obtenus confirment que le coefficient de susceptibilité au vent $c_e(z)$ pour les zones côtières ne devrait pas correspondre au standard européen. En plus de l'inégalité et l'orographie du terrain, les études prennent en considération les effets de l'altitude et du flux turbulent de vent.

Ключевые слова

хорватские нормы,
ветровая нагрузка,
еврокод,
национальное
добавление,
конструкция,
надёжность

Б. Перош, И. Бок, Т. Шимунович, Д. Кузманич

Предварительное сообщение

Основания для новых хорватских норм по ветровой нагрузке

В работе показаны полевые испытания режима тока ветра на основании профильных измерений на локациях Сплита и Дубровника с целью определения национального добавления для новой хорватской нормы о ветровой нагрузке. Результаты исследования подтвердили необходимость модифицирования значения коэффициента подверженности ветру $c_e(z)$ для прибрежной территории по отношению к европейским нормам. Кроме неровности и орографии территории во внимание взяты и влияния высоты над уровнем моря и турбулентного тока ветра.

Schlüsselworte:

kroatische Normen,
Windbelastung,
Eurokode,
Nationalanhang,
Konstruktion,
Zuverlässigkeit

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović, D. Kuzmanić

Vorherige Mitteilung

Unterlagen für die neuen kroatischen Normen für Windbelastung

Im Artikel sind Geländeuntersuchungen des Windströmungsregimes dargestellt, auf Grund von Profilmessungen an Örtlichkeiten von Split und Dubrovnik mit dem Ziel den Nationalanhang für die neue kroatische Norm für Windbelastung zu definieren. Die Untersuchungsergebnisse bestätigten die Notwendigkeit des Modifizierens des Beiwerts für die Windausgesetztheit $c_e(z)$ für das Küstengebiet im Verhältnis zur europäischen Norm. Neben der Geländerauheit und -orographie nahm man auch die Effekte der Höhe über dem Meeresspiegel und der turbulenten Windströmung in Betracht.

Autori: Prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Ivica Boko**, dipl. ing. građ.; **Tihomir Šimunović**, dipl. ing. građ.; **David Kuzmanić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu Građevinsko - arhitektonski fakultet

1 Uvod

Djelovanje vjetra uz potresno djelovanje čini dominantno horizontalno djelovanje kojima su izložene građevine u svom vijeku trajanja. Posebno je značenje ovih djelovanja što su promjenjiva u vremenu, a po intenzitetu variraju i ovise o meteorološkim i seizmološkim karakteristikama pojedinog područja te se ne mogu unificirati.

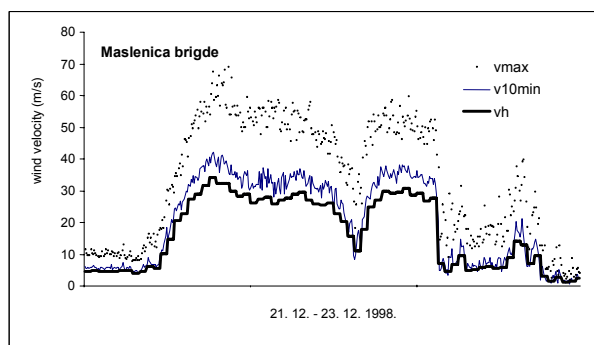
Prihvaćanjem europskih norma za projektiranje konstrukcija, Hrvatska je prihvatila i načelo da u pojedine norme ugradi nacionalne specifičnosti koje se ponajprije odnose na prirodne pojave (vjetar, potres, snijeg, temperatura itd.), tj. da izradi posebne dodatke za pojedinu normu s definiranim nacionalnim parametrima.

Istraživanje fenomena djelovanja vjetra na konstrukcije zasniva se na više znanstvenoinženjerskih disciplina kao što su dinamika konstrukcija, mehanika fluida i aeroelastičnost.

Općenito se može reći da djelovanje vjetra i odgovarajuće ponašanje konstrukcije predstavlja stohastički interaktivni sustav u kojem ponašanje konstrukcije ovisi o strujanju vjetra. S druge strane i samo strujanje vjetra ovisi o ponašanju konstrukcije.

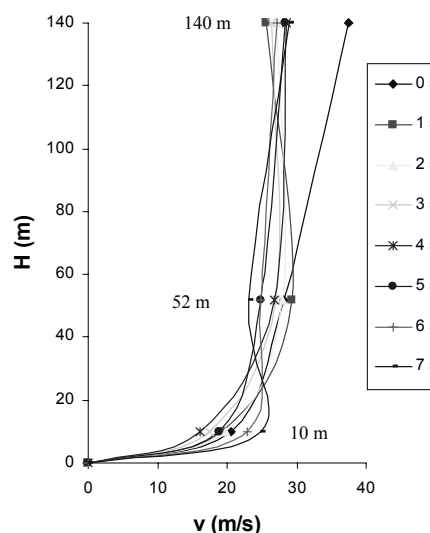
Hrvatsko priobalje je poznato kao područje povremeno izrazito nestabilnog strujanja zraka, s dominantnim vjetrovima iz smjera NE (bura) i SE (jugo), te je očito da 10-minutno osrednjavanje nije pogodno za detaljnije izučavanje ovih pojava, što se osobito odnosi na buru. Taj vjetar u priobalju doseže brzine i do 70 m/s te jako ovisi o lokalnim karakteristikama terena, reljefu obale i zaleđa, otoka, blizini obalne linije, a podložan je i utjecaju kompleksne termičke cirkulacije na većim visinama (slika 1.).

Ovdje se dolazi do zaključka da takva prirodna pojava u priobalju zahtijeva istraživanja smjerova i brzina na velikom broju lokacija, s periodom osrednjavanja od najdulje 10 minuta, te da se posebnim mjerenjima moraju obuhvatiti brzine i smjerovi po visini s mnogo većom



Slika 1. Vremenski zapis srednje satne, 10-minutne i 1-sekundne brzine vjetra (m/s) na lokaciji Masleničkoga mosta 21. – 23. prosinca 1998.

frekvencijom uzorkovanja. Prva takva profilna mjerenja u Hrvatskoj obavljena su na Dubrovačkom mostu 2001. godine, i to na visini 10, 52 i 140 m iznad srednjeg nivoa mora u jednom profilu (na pilonu) i na 52 m iznad mora na drugoj lokaciji na mostu udaljenom oko 300 m od prve postave. Pri tome su analizirani profili vjetra na temelju mjerenih vrijednosti u određenim vremenskim razmacima (slika 2.a).



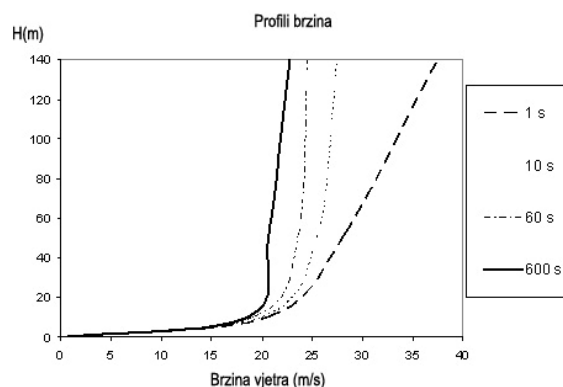
Slika 2. a) Promjena profila brzine vjetra u sekundnim razmacima

Također je analizirana vrijednost eksponencijalnog koeficijenta α (slika 2.b), koji dobro aproksimira profil vjetra po visini prema izrazu:

$$v_{(h)} = v_{(10m)} \cdot \left(\frac{h}{h_{(10m)}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

gdje je:

- $v_{(h)}$ (m/s) - brzina vjetra na visini h
- $v_{(10m)}$ (m/s) - brzina vjetra na visini 10 m iznad terena
- h (m) - visina iznad terena
- $h_{(10m)}$ (m) - visina 10 m iznad terena.



Slika 2. b) Profili vjetra s odgovarajućim vrijednostima eksponenta profila vjetra α

Hrvatska je 2005. u okviru prednorme „HRN ENV 1991-2-4:2005 Djelovanja na konstrukcije - Opterećenje vjetrom“ definirala „Nacionalni dokument za primjenu“ - NAD [24]. Ovaj je dokument rezultat dugogodišnjih istraživanja i spoznaja više autora u ovom području [1], [2], [3], [4], [5], [8], [12], [14], [18], [21] i drugi.

Prijašnja istraživanja djelovanja vjetra na nekoliko priobalnih lokacija [1], [2], [12], [16] i [17] pokazala su određena odstupanja od standardnih europskih vrijednosti prema EN 1991-2-4:1995 i potvrđuju vrijednosti faktora izloženosti $c_e(z)$ ¹ koje su bile predložene u „Nacionalnom dokumentu za primjenu“ - HRN ENV 1991-2-4:2005.

Glavna je zadaća ovog rada daljnje istraživanje stvarnih vrijednosti faktora izloženosti vjetru $c_e(z)$ na priobalnom području Republike Hrvatske, koji ovisi o hrapavosti terena, orografiji terena, učinku iznad terena kod srednje brzine vjetra i utjecaju (stupnju) turbulentnog strujanja vjetra. U radu su uspoređene vrijednosti faktora $c_e(z)$ dane prema EN 1991-1-4:2005 i vrijednosti dobivene eksperimentalnim istraživanjima na lokacijama Splita i Dubrovnika, te su predložene vrijednosti za faktore izloženosti vjetru $c_e(z)$ radi izrade Nacionalnog dodatka za HRN EN 1991-1-4 – opterećenje vjetrom.

2 Nove norme

Prema EN 1991-1-4:2005, sile vjetra na konstrukciju proizlaze iz tlaka vjetra i sila trenja vjetra na površinu građevine. Sile vjetra zbog tlaka na površinu građevine određuju se na 2 načina:

- proračunom sila vjetra s pomoću koeficijenta sila
- proračunom sila vjetra s pomoću tlakova vjetra na površine.

Proračun sila vjetra s pomoću koeficijenta sila

Sila djelovanja vjetra F_w na konstrukciju ili konstrukcijski element može se odrediti izravno jednadžbom:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (2)$$

ili vektorskim zbrojem svih pojedinačnih djelovanja na konstrukcijske elemente jednadžbom:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{elementi}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (3)$$

gdje je:

$c_s c_d$ - faktor konstrukcije (faktor veličine i dinamički faktor)

¹ Faktor izloženosti $c_e(z)$ u normi HRN ENV 1991-2-3:2005 naziva se koeficijent položaja

c_f - koeficijent sile za konstrukciju ili konstrukcijski element

$q_p(z_e)$ - vršni koeficijent tlaka brzine vjetra na referentnoj visini z_e

A_{ref} - usporedna (referentna) oploština konstrukcije ili konstrukcijskog elementa.

Proračun sila vjetra pomoću tlakova vjetra na površine

Sila djelovanja vjetra F_w na konstrukciju ili konstrukcijski element može se odrediti vektorskim zbrojem sila $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ i F_{fr} proračunanih iz vanjskih i unutarnjih tlakova vjetra i trenja vjetra usporedo na vanjske površine jednadžbama:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{površine}} w_e \cdot A_{ref} \quad (4)$$

$$F_{w,i} = \sum_{\text{površine}} w_i \cdot A_{ref} \quad (5)$$

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (6)$$

gdje je:

w_e - vanjski tlak pojedinačne površine na visini z_e

w_i - unutarnji tlak pojedinačne površine na visini z_i

A_{ref} - usporedna (referentna) ploština pojedinačne plohe

c_{fr} - koeficijent trenja

A_{fr} - ploština vanjske plohe usporedno s djelovanjem vjetra.

Sile trenja djeluju u smjeru djelovanja vjetra usporedno s vanjskim površinama, a mogu se zanemariti kada je usporedna ploština za trenje manja ili jednaka četverostrukoj cjelokupnoj ploštini svih vanjskih ploha okomitih na smjer vjetra (s privjetrene ili zavjetrene strane).

Tlak vjetra na površine

Tlak vjetra koji djeluje na vanjske površine određuje se jednadžbom:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (7)$$

gdje je:

c_{pe} - koeficijent oblika vanjskog tlaka

z_e - usporedna (referentna) visina vanjskog tlaka.

Također, tlak koji djeluje na unutarnje površine određuje se jednadžbom:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (8)$$

gdje je:

c_{pi} - koeficijent oblika unutarnjeg tlaka

z_i - usporedna (referentna) visina unutarnjeg tlaka.

Brzina vjetra

Brzina vjetra sastoji se od dviju komponenata – prosječne komponente i promjenljive komponente.

Prosječna komponenta brzine vjetra definirana je prema jednadžbi:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (9)$$

gdje je:

$v_m(z)$ - prosječna brzina vjetra na visini z

$c_r(z)$ - koeficijent hrapavosti terena

$c_o(z)$ - koeficijent orografije

v_b - osnovna brzina vjetra, definirana kao funkcija smjera i godišnjeg doba na visini od 10 m iznad terena II. kategorije hrapavosti.

Osnovna brzina vjetra definirana je jednadžbom:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (10)$$

gdje je:

c_{dir} - faktor smjera vjetra

c_{season} - faktor ovisan o godišnjem dobu

$v_{b,0}$ - temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, definirana kao karakteristična 10 – minutna prosječna brzina vjetra na visini 10 m iznad terena II. kategorije hrapavosti.

Tamo gdje utjecaj nadmorske visine na osnovnu brzinu vjetra v_b nije uzet u određenoj temeljnoj vrijednosti $v_{b,0}$, nacionalnim dodatkom može se dati postupak za njezino uzimanje u obzir. Također, nacionalnim dodatkom mogu se odrediti vrijednosti faktora $c_r(z)$, $c_o(z)$, c_{dir} , c_{season} , kao i zemljopisne karte za proračun $v_m(z)$.

Faktorom hrapavosti terena $c_r(z)$ uzima se u obzir promjenu prosječne brzine vjetra na mjestu građevine zbog visine iznad tla i hrapavosti zemljišta s privjetrene strane građevine u promatranom smjeru vjetra. Vrijednost faktora hrapavosti određuje se na temelju logaritamske raspodjele brzine vjetra po visini (profilu), a definirana je jednadžbama (11) i (12) koje vrijede ako je privjetrena udaljenost dovoljno duga da stabilizira profil brzine vjetra:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (11)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ za } z \leq z_{min} \quad (12)$$

gdje je:

z_0 - visina hrapave površine

k_r - faktor terena ovisan o visini hrapave površine z_0 , a određuje se prema izrazu:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (13)$$

gdje je:

$z_{0,II}$ - 0,05 visina hrapave površine terena II. kategorije tablica 4.1 EN 1991-1-4:2005

z_{min} - najmanja visina prema tablici 4.1 EN 1991-1-4:2005

z_{max} - uzima se 200 m ako drukčije nije definirano nacionalnim dodatkom.

Faktor orografije uzima u obzir povećanje brzine zbog utjecaja brežuljaka, litica i sl., a uzima se u obzir gdje se zbog orografije brzina vjetra povećava više od 5 %. Faktor orografije definiran je jednadžbom:

$$c_o(z) = \frac{v_m}{v_{mf}} \quad (14)$$

gdje je:

v_m - prosječna brzina vjetra na visini z od uzvisine

v_{mf} - prosječna brzina vjetra na visini z iznad ravnog terena.

Promjenjiva komponenta brzine vjetra određuje se uz pomoć intenziteta turbulencije $I_v(z)$ na visini z , koji je definiran kao standardna devijacija turbulencije σ_v , podijeljena s prosječnom brzinom vjetra na visini z . Promjenjiva komponenta brzine vjetra ima prosječnu vrijednost 0 i standardnu devijaciju σ_v koja je definirana jednadžbom:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (15)$$

gdje je:

k_r - faktor terena

k_I - faktor turbulencije.

Intenzitet turbulencije na visini z definiran je jednadžbama:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (16)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ za } z \leq z_{min} \quad (17)$$

Vršni tlak zbog brzine vjetra

Vršni tlak izazvan brzinom vjetra $q_p(z)$ na visini z uključuje prosječne i kratkotrajne promjene brzine vjetra. Ovaj se tlak može definirati nacionalnim dodatkom, a preporučena vrijednost prema normi EN 1991-1-4:2005 određena je jednadžbom:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (18)$$

gdje je:

$c_e(z)$ - faktor izloženosti

q_b - osnovni tlak zbog brzine vjetra.

Nadalje, faktor izloženosti $c_e(z)$ može se definirati jednadžbom:

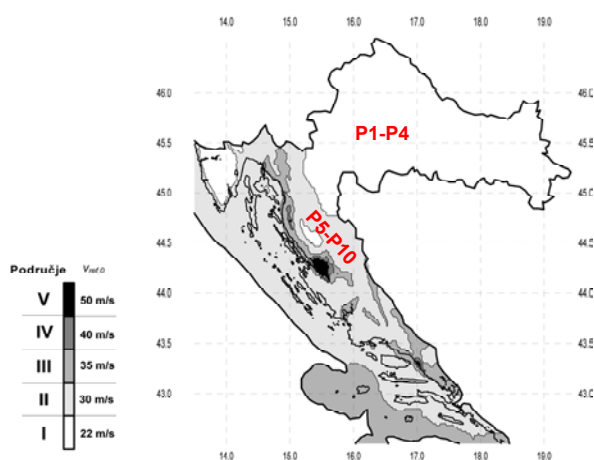
$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (19)$$

uz

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (20)$$

Vidimo da $c_e(z)$ definira vjetrove prilike na području Hrvatske određene zemljopisnim položajem, razdiobom baričkih sustava opće cirkulacije, utjecajem mora i kopnenog zaleđa, dobom dana i godine i dr. Svakako su pojedini lokaliteti pod utjecajem i drugih čimbenika kao što su izloženost, konkavnost i konveksnost reljefa, nadmorska visina i slično.

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 te određivanje vrijednosti $c_e(z)$. Ove spoznaje i promišljanja bili su povod da se izrade nove podloge za nacionalni dodatak za buduću normu HRN EN 1991-1-4, pa se za faktor izloženosti $c_e(z)$ predlažu različite vri-



Slika 3. Zemljovid područja opterećenja vjetrom

jednosti za pojedina područja Hrvatske u odnosu na vrijednosti koje se nalaze u europskoj normi (slika 3.):

Za regije P1-P4 (kontinentalno područje) intenzitet turbulencije $I_v(z)$ računa se prema izrazu

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

uz preporučenu vrijednost $k_1 = 1,0$ (EN 1991-1-4:2005).

Za regije P5 - P10 (priobalno područje - područja II., III., IV. i V. brzina vjetra) intenzitet turbulencije $I_v(z)$ prema [24] izračunava se izrazom:

$$I_v(z) = \sigma_v / v_m(z,t) \quad (21)$$

gdje su: σ_v - standardna devijacija turbulentne komponentne brzine na visini z iznad tla ($v'(z,t) = v(z,t) - v_m(z,t)$; $v'(z,t)$ - turbulentna komponentna brzine vjetra); $v_m(z,t)$ - prosječna brzina vjetra; $v(z,t)$ - trenutna brzina vjetra koja na visini od 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II u srednjem povratnom razdoblju od 50 godina odgovara vrijednostima $v_{ref,x}$ iskazanim u tablici 1. [24].

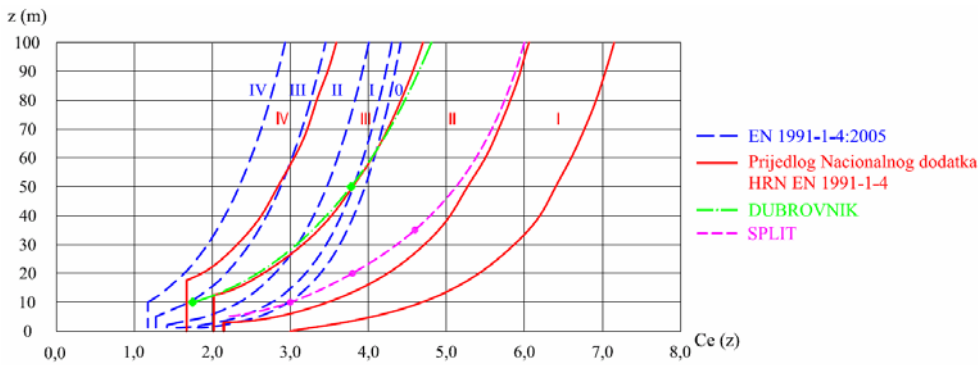
Tablica 1. Vrijednosti usporedne i trenutne brzine vjetra na području republike Hrvatske

Područje	$v_{ref,0}$ (m/s)	$v_{ref,x}$ (m/s)
I	22	35
II	30	45
III	35	55
IV	40	65
V	50	75

3 Rezultati istraživanja faktora izloženosti $c_e(z)$ za priobalno područje republike hrvatske

Na slici 4. dana je usporedba faktora izloženosti $c_e(z)$ prema preporukama norme EN 1991-1-4:2005; vrijednosti faktora izloženosti $c_e(z)$, dobivene na temelju mjerenja profila vjetra, u priobalnom području Hrvatske na lokaciji Dubrovnika i Konjskog kod Splita te prijedloga nacionalnog dodatka budućoj normi HRN EN 1991-1-4.

Rezultati istraživanja faktora izloženosti $c_e(z)$ pokazuju, da za priobalno područje Hrvatske vrijednosti koje su dane u normi EN 1991-1-4:2005 ne odgovaraju režimu vjetra mjenom na terenu i da je potrebno izraditi korekcije u nacionalnom dodatku. Ovu činjenicu potvrdila su i istraživanja na lokacijama Dubrovnika i Splita gdje se vidi da se vrijednosti $c_e(z)$ ovisno o visini z iznad terena za pojedine kategorije terena (Dubrovnik III., Split II.) znatno razlikuju od vrijednosti (veće su) koje preporučuje norma EN 1991-1-4:2005 (slika 4.). Ova je tvrdnja osnažena i analizom stupnja pouzdanosti koja je prove-



Slika 4. Faktor izloženosti vjetru $c_e(z)$ u ovisnosti o visini z iznad zemljišta i kategorijama zemljišta I. – IV.

dena za 40 m visok čelični antenski stup pokretnih telekomunikacija u Konjskom (Split) – slika 5.

Naime, na ovom se stupu provode profilna mjerenja režima strujanja vjetra (znanstveni projekt autora) na tri visine (10, 20 i 35 m), pa smo bili u mogućnosti i odrediti stvarni faktor izloženosti vjetru $c_e(z)$.

Vrijednosti na slici 4. nedvojbeno upozoravaju na potrebu daljnjih istraživanja faktora izloženosti $c_e(z)$ na hrvatskom obalnom području u okviru profilnih mjerenja vjetra

na više lokacija radi donošenja nacionalnog dodatka za buduću normu HRN EN 1991-1-4 – opterećenje vjetrom.

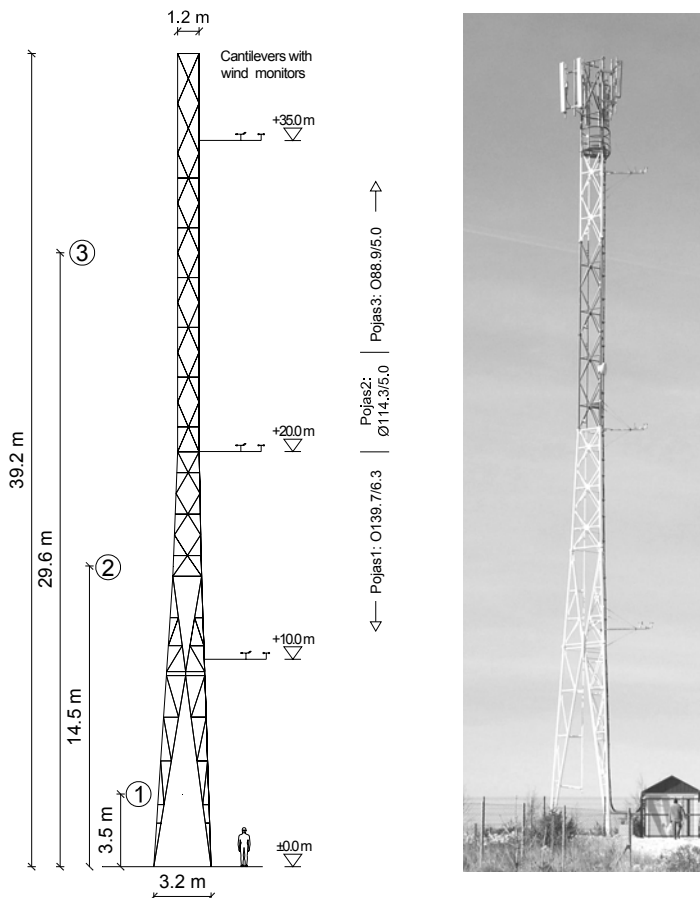
4 Primjer: analiza stupnja pouzdanosti čeličnog antenskog stupa visine 40 m ovisno o različitosti faktora izloženosti vjetru $c_e(z)$

Slijedom navedenih različitosti o vjerenim parametrima analizirat ćemo stupanj pouzdanosti predmetnog stupa (slika 5.), i to za vjerenne parametre prema normi EN 1991-1-4:2005 i vjerenne parametre koji su dobiveni mjerenjem na lokaciji stupa, a koji se relativno dobro podudaraju s predloženim nacionalnim dodatkom za Republiku Hrvatsku.

Djelovanje vjetra na konstrukciju stupa ujedno i dominantno opterećenje stupa odredit će se prema izrazu za globalnu silu vjetra F_W izraz (4).

Za proračun interakcijskog djelovanja vjetra i konstrukcije stupa, te za određivanje indeksa pouzdanosti β za različitost vjerenih parametara, uporabljen je programski paket STRUREL [22]. Ovdje se linearizacijom funkcije graničnog stanja u najvjerojatnijoj točki otkazivanja konstrukcije stupa daje procjena vjerojatnosti otkazivanja konstrukcije:

$$p = P[G(x) \leq 0] = P[G(T(U)) \leq 0] = P[H(U) \leq 0] \sim \Phi(-\beta) \quad (22)$$



Slika 5. a) Geometrijski podaci čeličnog antenskog stupa, (Split)

b) Fotografija stupa na terenu Konjsko



gdje je: $G(x)$ – funkcija graničnog stanja, $T(U)$, $H(U)$ – transformirane funkcije graničnog stanja u standardnom normalnom prostoru; $\Phi(\cdot)$ standardna normalna razdioba, a β indeks pouzdanosti.

Rezultati proračuna

Proračun stupnja pouzdanosti čeličnoga antenskog stupa pokretnih komunikacija visine 40 m (slika 5.) proveden je primjenom probabilističke metode FORM (First Order Reliability Method – metoda pouzdanosti prvoga reda), gdje su u jednadžbi graničnog stanja vrijednosti otpornosti konstrukcije stupa i djelovanja vjetra na konstrukciju izražene kao slučajne varijable (tablica 2.).

Tablica 2. Osnovne varijable i rezultati modalne analize

Osnovne varijable [X]				
Varijabla	Nominalna vrijednost	Koeficijent varijacije	Raspodjela	
X_1	240 N/mm ²	0,10	Weibull	granica popuštanja čelika
X_2	26,4 m ²	0,05	normalna	površina p.p.
X_3	84,3 cm ³	0,05	normalna	moment otpora p.p.
$X_{4,1}$	2,33, 2,78, 3,17 kN/m ²	0,15; 0,16; 0,19	Gumbel	opt. vjetrom $F_{WEN1991-1-4:2005}$
$X_{4,2}$	3,00, 3,8, 4,6 kN/m ²	0,26; 0,28; 0,29	Gumbel	opt. vjetrom $F_{WISTRAŽIVANJA}$
Utvrđeni parametri [K]				
$K_1=L$ $K_2=E$	sustavna duljina elementa modul elastičnosti čelika	$K_3=7850 \text{ kg/m}^3$ $K_4=1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/C}^0$	gustoća čelika temperaturno širenje čelika	
Modalna analiza				
Broj oblika oscilacije		Frekvencija (Hz)		Period (s)
1		1,612		0,620
2		4,296		0,233
3		5,277		0,190

Za prostorni štapni model stupa u tablici 3. dane su vrijednosti indeksa pouzdanosti β za granično stanje nosivosti u karakterističnim čvorovima stupa 1 (3,5 m iznad tla), 2 (14,5 m iznad tla) i 3 (29,6 m iznad tla) ovisno o variranim vjetrovim parametrima (faktor izloženosti $c_e(z)$).

Tablica 3. Vrijednosti indeksa pouzdanosti β –granično stanje nosivosti

Točke na konstrukciji	$F_{WEN1991-1-4}$	$F_{WISTRAŽIVANJA}$
redni broj	β	β
1	2,32	0,83
2	1,61	0,19
3	8,56	8,11

Iz rezultata provedenih istraživanja u radu je vidljivo da su dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti β manje od

normirane vrijednosti ($\beta_{norm} = 3,8$) za pojedine kritične presjeke stupa, i to prema normi EN 1991-1-4:2005, a poglavito prema provedenim istraživanjima na terenu.

5 Zaključak

Provedena su terenska mjerenja vjetrovih parametara (profilna mjerenja) na dvije karakteristične lokacije u priobalnom dijelu Hrvatske gdje je dominantan vjetar bura karakterističan po lokalnoj mahovitosti, turbulenciji i snažnim udarima. Rezultati istraživanja potvrdili su pretpostavku o potrebi modificiranja karakteristika faktora izloženosti vjetru $c_e(z)$ kako je to i određeno

„Nacionalnim dokumentom za primjenu“ u HRN ENV 1991-2-4:2005. Ova su istraživanja izvršena radi izrade podloga za nacionalni dodatak za buduću normu HRN EN 1991-1.

Proračun indeksa pouzdanosti β za čeličnu konstrukciju PROMATRANOG stupa također je potvrdio opravdanost izrade nove hrvatske norme za opterećenje vjetrom usklađene s EN 1991-1-uz odgovarajući nacionalni dodatak.

Napomena: Istraživanja prikazana u ovom članku provode se u okviru znanstvenog projekta „Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika zbog ekstremnih djelovanja“ (083-0821466-1465, voditelj projekta prof.dr.sc. Bernardin Peroš) koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa. Potporu istraživanju daje i T-Mobile Hrvatska d.o.o.

LITERATURA

- [1] Bajić, A.; Peroš, B.: *Meteorological basis for wind loads calculation in Croatia*, Wind and Structures, Vol. 8, 2005, pp. 389 – 406.
- [2] Bajić, A.; Peroš, B.: *Referentna brzina vjetra – utjecaj perioda osrednjavanja*, Građevinar, Vol. 53, 2001, pp. 555 – 562.
- [3] Bajić, A.; Peroš, B.; Vučetić V.; Žilbrat, Z.: *Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme*, Građevinar, Vol. 53, (2001) 8, pp. 495 – 506.
- [4] Bajić, A.: *The strongest bora event during Alpex – sop*, Papers, Zagreb, 1988, Vol. 21, pp. 1 – 13.
- [5] Ballio, G. et al.: *Probabilistic analysis of Italian extreme winds: Reference velocity and return criteria*, Wind and Structures, Vol. 2, 1999, pp. 51 – 68.
- [6] Holmes, J. D.; Moriarty, W. W.: *Application of the generalized Pareto distribution to extreme value analysis in wind engineering*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 83., 1999, pp. 1 – 10.
- [7] Jenkinson, A. F.: *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements*, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 87, 1955, pp. 158 – 171.
- [8] Koračin, D.: *Spectral analysis of Bura wind gust factor at Rijeka airport*, Zbornik meteoroloških i hidroloških radova, Vol. 8, 1982, pp. 55 – 62.
- [9] Li, Y.; Kareem, A.: *ARMA Systems in Wind Engineering*, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 5, 1990, No. 2, pp. 50 - 59.
- [10] Peroš, B.; Boko, I.: *Reliability of steel bridges exposed to the Bora wind action*, International Conference on Steel Structures of the 2000s, Istanbul, 2000, pp. 51 – 56.
- [11] Peroš, B.; Boko, I.; Šimunović T.: *Actual Wind Load and the Comparison of the Results With the Wind Tunnel Tests Upon the Dubrovnik Bridge*, The Third International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seul, Korea, 2004.
- [12] Peroš, B.; Boko, I.; Šimunović T.: *Analiza djelovanja vjetra na Dubrovački most*, Građevinar, Vol.57, (2005) 2, pp. 87 - 94.
- [13] Peroš, B.: *Constructional steel design for structures with a dominant wind Bora load*, J. Constructional Steel Research, Vol. 46, 1998, Paper Number 146.
- [14] Peroš, B.: *Modelling of the Bora effects upon the lower layer*, International Journal for Engineering Modelling, vol.7, 1994, No. 3-4, pp. 81-95.
- [15] Peroš, B.: *Reliability of Structures with a Dominant Wind Load*, Zagreb, Ph. D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 1995.
- [16] Peroš, B.; Šimunović, T.; Boko I.; Kuzmanić, D.: *New Croatian Standards for Wind Loads*, 12th International Conference on Wind Engineering, Cairns, Australia, 2007.
- [17] Peroš, B.; Šimunović, T.; Boko, I.: *Modelling of the Dynamic Action of the Bora Wind Upon High Slender Structures*, Response of Structures to Extreme Loading, Toronto, Canada, 2003
- [18] Petkovšek, Z.: *Upper Boundary of the Bora as Stationary Frontal Surface*, Meteorological and Atmospheric, Physics 43, 1990, pp. 197-202.
- [19] EN 1991-1-4, Actions on structures, Wind actions, European Committee for Standardization, Bruxelles, January 2004.
- [20] Simiu, E.; Heckert, N. A.: *Extreme wind distribution tails: a 'peak – over – threshold' approach*, J. Struct. Eng, Vol. 122, 1996, pp. 539 – 547.
- [21] Smith, B.: *Aerial Observations of the Croatian Bora*, Collection Meteorological and Hydrologic Works, Conference proceedings, Opatija, 1984, pp. 127-129.
- [22] STRUREL - A structural Reliability Analysis Program, 1995.
- [23] Šavor, Z.; Radić, J.; Mandić, A.: *Neke usporedbe hrvatskih i europskih norma za djelovanja*, Građevinar, Vol.58, 2006, pp. 641 - 648.
- [24] Hrvatska prednorma HRN ENV 1991-2-4:2005 hr, Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije -2-4. dio: Djelovanja na konstrukcije – Opterećenje vjetrom (ENV 1991-2-4:1995), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, listopad 2005.