

Djelovanje vjetra na mostove prema europskoj normi

Mehmed Čaušević, Ivica Špalj, Elvis Žic

Ključne riječi

*djelovanje vjetra,
Eurokod 1,
most,
vrtložno djelovanje,
aerodinamička stabilnost,
vertikalne oscilacije*

Key words

*wind action,
Eurocode 1,
bridge,
turbulent action,
aerodynamic stability,
vertical oscillations*

Mots clés

*action de vent,
Eurocode 1,
pont,
action turbulente,
stabilité aérodynamique,
oscillations verticales*

Ключевые слова

*действие ветра,
Еврокод 1, мост,
турбулентное действие,
аэродинамическая
устойчивость,
вертикальные
осцилляции*

Schlüsselworte

*Windwirkung,
Eurokode 1,
Brücke,
Wirbelwirkung,
aerodynamische
Stabilität,
Vertikalschwingungen*

M. Čaušević, I. Špalj, E. Žic

Pregledni rad

Djelovanje vjetra na mostove prema europskoj normi

Uz kratak opis djelovanja vjetra na konstrukcije prema Eurokodu 1 posebno se opisuje to djelovanje na mostove. Prikazane su pojave vrtložnog djelovanja i pojam aerodinamičke stabilnosti poprečnih presjeka mostova. Primjerima je pokazano kako su ublažene amplitude vertikalnih oscilacija mostova Storebaelt i Osteroy ugradnjom usmjeravajućih krilaca na izloženoj i neizloženoj strani poprečnog presjeka. Autori oviom radom žele upozoriti projektante na fenomene aerodinamike mostova.

M. Čaušević, I. Špalj, E. Žic

Subject review

Wind action on bridges according to the European standard

After a brief description of wind action on structures based on Eurocode 1, a more detailed account of wind action on bridges is given. Possible occurrences of turbulent action, and the notion of aerodynamic cross-sectional stability of bridges, are described. It is shown on practical examples how vertical oscillation amplitudes were reduced on Storebaelt and Osteroy bridges by installation of directional wings on both the exposed and unexposed parts of cross section. By means of this paper, the authors wish to draw the attention of designers to the phenomena of bridge aerodynamics.

M. Čaušević, I. Špalj, E. Žic

Ouvrage de synthèse

Action de vent sur ponts selon la norme européenne

Après une description brève de l'action de vent sur les structures selon l'Eurocode 1, un aperçu plus détaillé est donné de l'action de vent sur les ponts. Les cas d'apparition possible de l'action turbulente, et la notion de stabilité transversale des ponts, sont décrits. Les exemples pratiques sont utilisés pour montrer comment les amplitudes d'oscillation verticale ont été réduites sur les ponts de Storebaelt et Osteroy et cela par installation des ailes directionnelles sur les parties visibles et invisibles du profil en travers. Par voie du présent ouvrage, les auteurs désirent attirer l'attention des ingénieurs d'études sur les phénomènes relatifs à l'aérodynamique des ponts.

M. Чаушевич, И. Шпаль, Е. Жич

Обзорная работа

Действие ветра на мосты согласно европейской норме

Наряду с кратким описанием действия ветра по Еврокоду 1 особо описывается то действие на мосты. Показаны явления турбулентного действия и понятия аэродинамической устойчивости поперечных сечений мостов. Примерами показано, как смягчены амплитуды вертикальных осцилляций мостов Storebaelt и Osteroy при помощи монтирования направляющих крыльшек на подвергнутой и неподвергнутой действию ветра стороны поперечного сечения. Авторы желают предупредить проектантов на феномены аэродинамики мостов.

M. Čaušević, I. Špalj, E. Žic

Übersichtsarbeit

Windwirkung auf Brücken nach der europäischen Norm

Neben kurzer Beschreibung der Windwirkung auf Konstruktionen nach Eurokode 1 beschreibt man diese Wirkung besonders für Brücken. Dargestellt sind Erscheinungen der Wirbelwirkung und der Begriff der aerodynamischen Stabilität der Brückenquerschnitte. Mit Beispielen zeigt man wie die Amplituden der Vertikalschwingungen der Brücken Storebaelt und Osteroy besänftigt wurden durch Einbau kleiner Flügel an der ausgesetzten und der nicht ausgesetzten Seite des Querschnitts. Die Autoren wünschen mit diesem Beitrag die Entwurfsverfasser auf die Phänomene der Brückenaerodynamik aufmerksam machen.

Autori: Prof. dr. sc. **Mehmed Čaušević**, dipl. ing. grad.; **Ivica Špalj**, dipl. ing. grad.; **Elvis Žic**, dipl. ing. grad.,
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V. C. Emina 5, Rijeka

1 Općenito

Rušenje visećeg mosta Tacoma Narrows 7. studenog 1940. godine pokazala je da i pri relativno malim brzinama vjetar može imati katastrofalan učinak na most. Most Tacoma Narrows se urušio pri brzini vjetra od 68 km/h, a samom urušavanju prethodilo je 70-minutno prisilno oscilatorno gibanje kolničke konstrukcije, tijekom kojeg su krajevi poprečnog presjeka dobili velike rotacijske pomake i do 45° prema horizontali [10].

Danas, 67 godina nakon tog rušenja, razvojem zračnih tunela za ispitivanje modela konstrukcija i računalnih simulacija, dobro je poznato djelovanje vjetra na mostove i ostale konstrukcije.

U ovom ćemo radu izložiti temeljne pojmove i odredbe europske norme za djelovanja vjetra EN 1991-1-4:2005, a nakon toga objasniti pojmove vrtložnog odvajanja i aerodinamičke stabilnosti poprečnih presjeka mostova. U 4. dijelu ovog rada na primjerima mostova Storebaelt u Danskoj i Osteroy u Norveškoj pokazat ćemo kako je riješen problem povećanih amplituda vertikalnih oscilacija kolničkih konstrukcija tih dvaju mostova.

2 Europska norma za djelovanja vjetra [1]

U dodatku E europske norme za djelovanje vjetrom EN 1991-1-4:2005 [1] opisani su pojmovi vrtložnog odvajanja i aerodinamičke stabilnosti poprečnih presjeka mostova. Definirani su kritična brzina vrtložnog odvajanja, uzbudna sila koja djeluje na presjek pri vrtložnom odvajanju, koeficijent aerodinamičke uzbudne sile i prikazan je proračun najveće amplitude oscilacija. Da bi ti pojmovi bili razumljiviji, prvo ćemo ukratko dati pregled najvažnijih dijelova europske norme za djelovanja vjetra [1], a na kraju, u ovome 2. poglavlju, obraditi i dodatak E te norme.

2.1 Brzina vjetra i tlak izazvan brzinom vjetra

Brzina vjetra i tlak izazvan brzinom vjetra sastoje se od dviju komponenata – prosječne komponente i promjenljive komponente.

Prosječna komponenta brzine vjetra

Prosječna komponenta brzine vjetra definirana je prema jednadžbi:

$$v_m(z) = v_b \cdot c_r(z) \cdot c_o(z) \quad (1)$$

gdje je:

- $v_m(z)$ - prosječna brzina vjetra na visini z
- v_b - osnovna brzina vjetra
- $c_r(z)$ - koeficijent hrapavosti terena
- $c_o(z)$ - koeficijent orografije.

Osnovna je brzina vjetra definirana kao funkcija temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetra, smjera vjetra i godišnjeg doba, a definirana je jednadžbom:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} \quad (2)$$

gdje je:

- v_b - osnovna brzina vjetra na visini od 10 m iznad terena II. kategorije hrapavosti
- $v_{b,0}$ - temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, a to je karakteristična 10 – minutna prosječna brzina vjetra na visini 10 m iznad terena II. kategorije hrapavosti
- c_{dir} - koeficijent smjera vjetra
- c_{season} - koeficijent ovisan o godišnjem dobu.

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

Koeficijent hrapavosti terena $c_r(z)$ uzima 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 koeficijenta hrapavosti određuje se na temelju logaritamske raspodjele brzine vjetra po visini (profilu), a definirana je jednadžbama (3) i (4) koje vrijede ako je privjetrena udaljenost dovoljno duga da stabilizira profil brzine vjetra.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{za } z \leq z_{min} \quad (4)$$

gdje je:

- k_r - koeficijent terena ovisan o visini hrapave površine: $k_r = 0,19(z_0 / z_{0,II})^{0,07}$

z_0 - visina hrapave površine

$z_{0,II}$ - visina hrapave površine terena II. kategorije

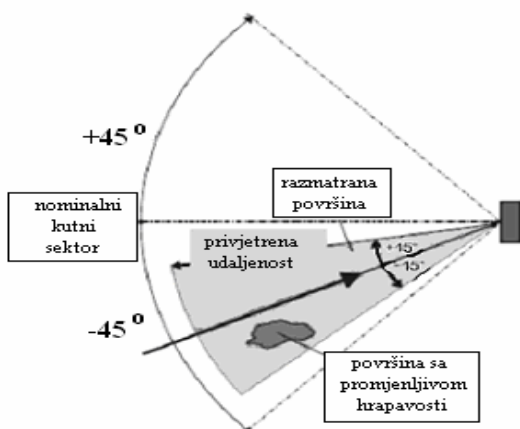
z_{min} - najmanja visina prema tablici 1.

z_{max} - uzima se 200 m ako nije drugačije određeno nacionalnim dodatkom.

Hrapavost terena za dani smjer vjetra ovisi o hrapavosti tla i udaljenosti s jednolikom hrapavosti terena u kutnom isječku oko smjera vjetra. Mala područja s promjenljivom hrapavosti mogu se zanemariti. Način određivanja hrapavosti prikazan je na slici 1.

Tablica 1. Kategorije terena

KATEGORIJA TERENA		z_0 [m]	z_{min} [m]
0.	More ili priobalna područja izložena otvorenom moru	0,003	1
I.	Jezera ili ravna i horizontalna područja sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II.	Područja s niskom vegetacijom poput trave i izdvojenih prepreka (drveće, kuće) s razmacima od najmanje 20 visina prepreka	0,05	2
III.	Područje s jednolikim pokrovom vegetacije, zgrade ili izdvojene prepreke s razmacima od najviše 20 visina prepreka (šume, predgrađa, sela)	0,3	5
IV.	Područja u kojima je najmanje 15 % površine izgrađeno i čija prosječna visina zgrada prelazi 15 metara	1,0	10



Slika 1. Ocjenjivanje hrapavosti terena

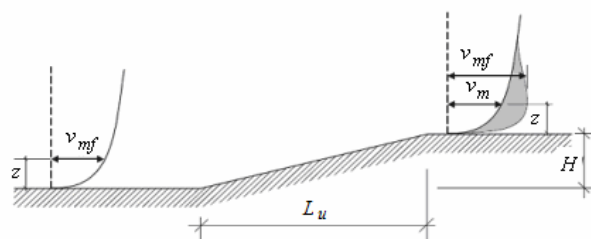
Koeficijent orografije $c_0(z)$ predstavlja povećanje brzine zbog utjecaja brežuljaka, stijena itd., a uzima se u obzir tamo gdje se zbog orografije brzina vjetra povećava više od 5 %. Učinci orografije mogu se zanemariti kada je prosječan nagib privjetrenog zemljišta manji od 3°. Duljina L_u privjetrenog zemljišta jednaka je deseterostruko vrijednosti visine izdvojene prepreke (slika 2.).

Koeficijent orografije definiran je jednadžbom:

$$c_0(z) = \frac{v_m}{v_{mf}} \quad (5)$$

gdje je:

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



Slika 2. Ilustracija povećanja brzine vjetra zbog orografije

Promjenljiva komponenta brzine vjetra

Promjenljiva komponenta brzine vjetra predstavljena je intenzitetom turbulencije $I_v(z)$, koji je definiran kao standardna devijacija turbulencije podijeljena s prosječnom brzinom vjetra. Turbulentna komponenta brzine vjetra ima prosječnu vrijednost jednaku 0 i standardnu devijaciju σ_v , određenu jednadžbom:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (6)$$

gdje je:

- k_r - koeficijent terena
- v_b - osnovna brzina vjetra
- k_I - koeficijent turbulencije.

Određivanje vrijednosti intenziteta turbulencije definirano je jednadžbama:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \quad \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{za } z \leq z_{min} \quad (8)$$

2.2 Vršni tlak izazvan brzinom vjetra

Vršni tlak izazvan brzinom vjetra $q_p(z)$ na visini z uključuje prosječne i kratkotrajne promjene u brzini vjetra. Pravila za određivanje tlaka vjetra mogu biti dana nacionalnim dodatkom, a preporučena je vrijednost određena jednadžbom:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) \quad (9)$$

Ova se jednadžba može napisati i ovako:

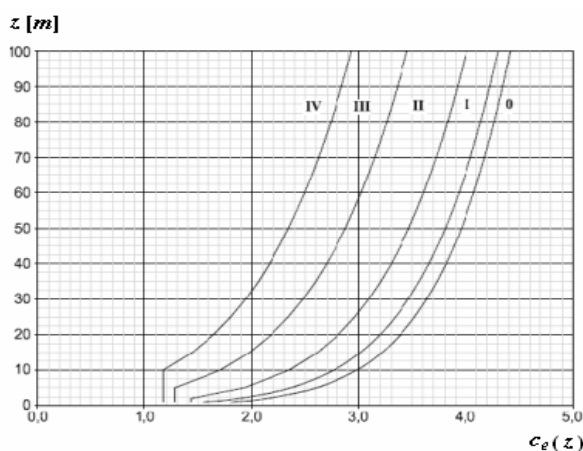
$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (10)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad (11)$$

gdje je:

- $q_p(z)$ - vršni tlak izazvan brzinom vjetra
- $I_v(z)$ - intenzitet turbulencije
- q_b - osnovni tlak izazvan brzinom vjetra
- ρ - gustoća zraka ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)
- $c_e(z)$ - koeficijent izloženosti.

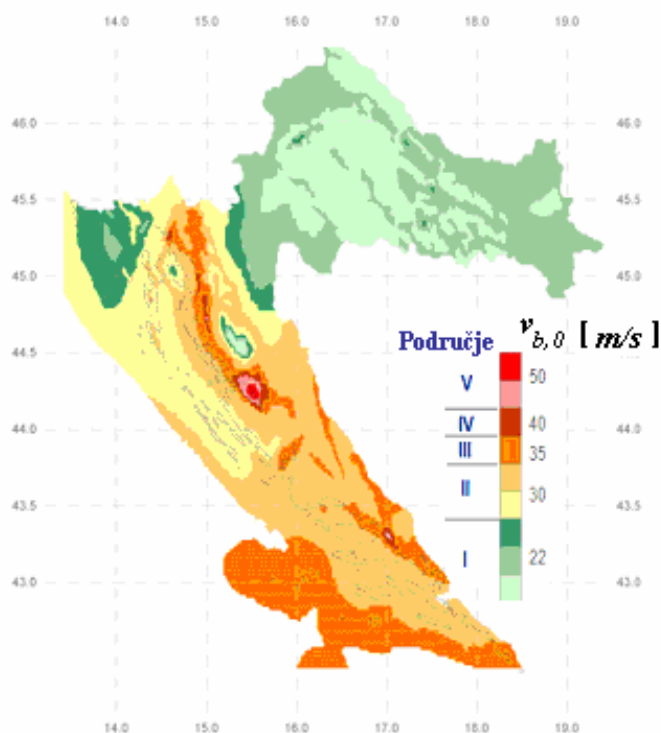
Za ravne terene gdje je $c_0(z) = 1$, koeficijent izloženosti dan je prema slici 3., kao funkcija kategorije terena (tablica 1.) i visine iznad terena.



Slika 3. Vrijednosti koeficijenta izloženosti $c_e(z)$ za $c_0(z) = 1$ i $k_1 = 1$ prema kategorijama terena

Nacionalnim dodatkom za primjenu norme ENV 1991-2-4:1995 koja je prihvaćena kao hrvatska norma HRN ENV 1991-2-4:2005 dan je zemljovid područja opterećenja vjetrom i temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetra $v_{b,0}$ prema slici 4. i tablici 2.

Zbog lakše upotrebe zemljovida Republika je Hrvatska podijeljena na 10 područja, a svakom pripada određeno područje ili područja opterećenja vjetrom.

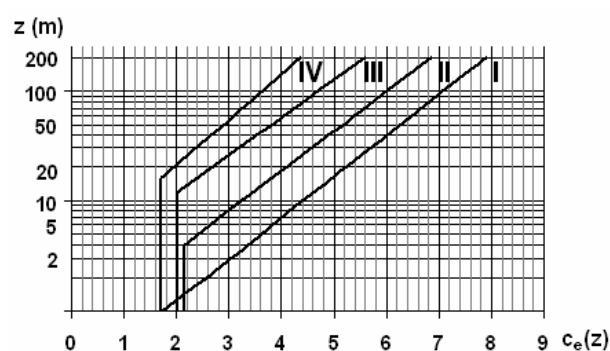


Slika 4. Zemljovid područja opterećenja vjetrom i temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetra ($v_{b,0}$) za RH

Tablica 2. Područja opterećenja vjetrom u odnosu na osnovnu usporednu $v_{b,0}$ brzinu vjetra i trenutačnu $v_{ref,x}$ brzinu vjetra

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

Koeficijent položaja $c_e(z)$ u ovisnosti z iznad terena i kategorije terena I. do IV. za $c_t = 1$ područja P_5 do P_{10} prikazan je na slici 5.



Slika 5. Koeficijent položaja $c_e(z)$ u ovisnosti o visini z iznad terena i kategorijama terena I. do IV. za $c_t = 1$ za područja P_5 do P_{10}

Plak vjetra na površine

Plak vjetra koji djeluje na vanjske površine određuje se jednadžbom:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (12)$$

gdje je:

- w_e - tlak vjetra na vanjske površine
- $q_p(z_e)$ - vršni tlak izazvan brzinom vjetra
- z_e - usporedna visina za vanjski tlak
- c_{pe} - koeficijent tlaka za vanjski tlak.

Plak vjetra koji djeluje na unutrašnje površine određuje se jednadžbom:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (13)$$

gdje je:

- w_i - tlak vjetra na unutrašnje površine
- $q_p(z_i)$ - vršni tlak izazvan brzinom vjetra
- z_i - usporedna visina za unutrašnji tlak
- c_{pi} - koeficijent tlaka za unutrašnji tlak.

Rezultantni tlak vjetra na bilo koji konstrukcijski element jest razlika tlakova (12) i (13) na svaku površinu uzimajući u obzir njihov predznak. Tlak je pozitivan ako djeluje prema površini, a negativan ako djeluje od površine (usisno djelovanje).

2.3 Sile vjetra

Sile vjetra na konstrukciju ili konstrukcijske elemente moraju se odrediti uzimajući u obzir i vanjske i unutrašnje tlakove vjetra. Određivanje sila je moguće na dva načina:

- (1) Proračun s pomoću koeficijenta sila
- (2) Proračun sila s pomoću tlakova na površine

Proračun sila vjetra pomoću koeficijenata sila

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

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (14)$$

ili vektorskim zbrojem svih pojedinačnih djelovanja na konstrukcijske elemente jednadžbom:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{elementi}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (15)$$

gdje je:

- $c_s c_d$ - faktor konstrukcije (faktor veličine i dinamički faktor)
- c_f - koeficijent sile za konstrukciju
- $q_p(z_e)$ - vršni tlak izazvan brzinom vjetra
- A_{ref} - usporedna ploština konstrukcije ili konstrukcijskog elementa.

Proračun sila vjetra pomoću tlakova vjetra na površine

Sila vjetra F_w koja djeluje na konstrukciju ili konstrukcijski element može se odrediti vektorskim zbrojem sila $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ i F_{fr} , proračunanih iz vanjskih i unutrašnjih tlakova i trenja vjetra usporedno vanjskim površinama jednadžbama:

$$\text{vanjske sile: } F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{površine}} w_e \cdot A_{ref} \quad (16)$$

$$\text{unutrašnje sile: } F_{w,i} = \sum_{\text{površine}} w_i \cdot A_{ref} \quad (17)$$

$$\text{sile trenja: } F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} \quad (18)$$

gdje je:

- w_e - vanjski tlak pojedinačne površine na visini z_e
- w_i - unutrašnji tlak pojedinačne površine na visini z_i
- A_{ref} - usporedna ploština pojedinačnih ploha

c_{fr} - koeficijent trenja

A_{fr} - usporedna ploština na kojoj se ostvaruje trenje.

Sile trenja djeluju u smjeru djelovanja vjetra usporedno 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).

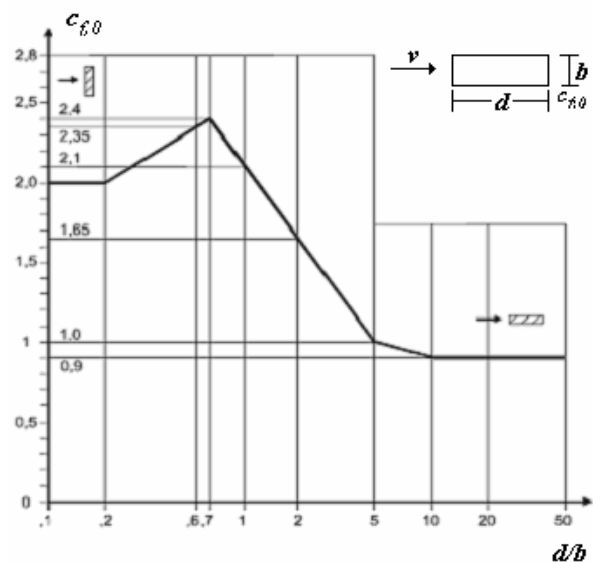
Koeficijenti sile za pravokutne poprečne presjeke

Koeficijent sile daje ukupni učinak vjetra na konstrukciju ili elemente konstrukcije, a ako nije drukčije određeno uključuje i trenje. Koeficijent sile za elemente pravokutnoga poprečnog presjeka, kada vjetar puše okomito na lice presjeka, određuje se prema jednadžbi:

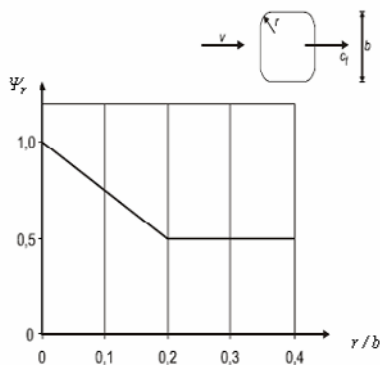
$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (19)$$

gdje je:

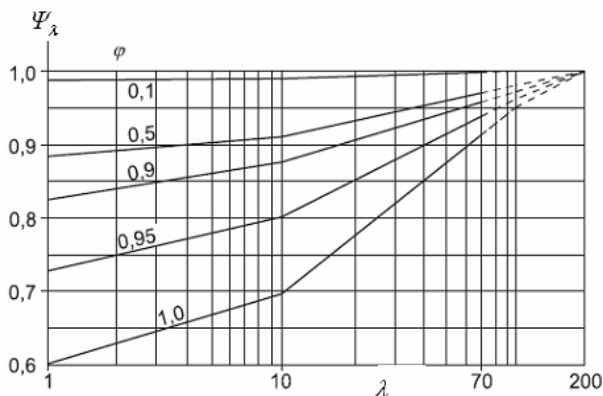
- $c_{f,0}$ - koeficijent sile za pravokutni poprečni presjek s oštrim rubovima, bez slobodnog protoka kroz presjek (slika 6.)
- Ψ_r - redukcijski faktor za kvadratne poprečne presjeke sa zaobljenim rubovima, ovisi o Reynoldsovu broju (slika 7.)
- Ψ_λ - faktor rubnih efekata za elemente sa slobodnim protokom, uključuje reducirani otpor konstrukcije zbog toka vjetra oko rubova presjeka, funkcija je stupnja vitkosti λ (slika 8.)
- λ - vitkost, ovisi o dimenzijama konstrukcija i poziciji konstrukcije.



Slika 6. Koeficijent sile $c_{f,0}$ za pravokutne poprečne presjeke, bez slobodnog protoka



Slika 7. Redukcijski faktor Ψ_r za kvadratne poprečne presjeka sa zaobljenim rubovima



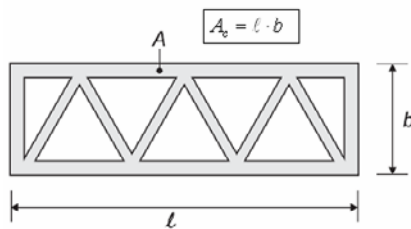
Slika 8. Indikativne vrijednosti faktora rubnih efekata kao funkcije stupnja ispunjenosti ϕ i vitkosti λ

Stupanj ispunjenosti definiran je na sljedeći način:

$$\phi = A / A_c \quad (20)$$

A - zbroj projiciranih ploština elemenata rešetke

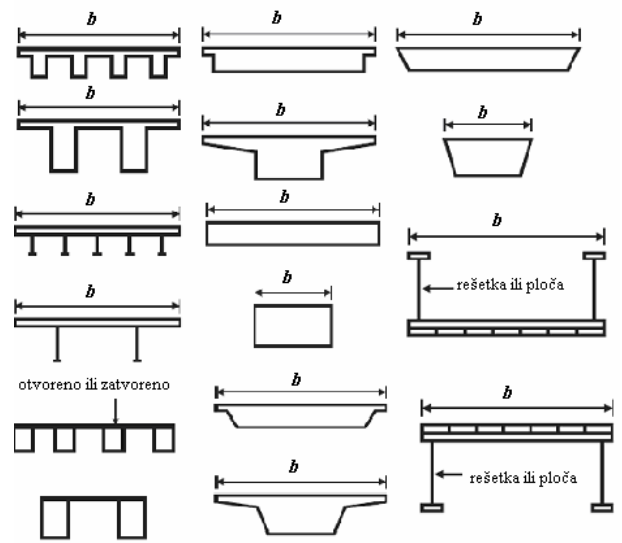
A_c - ukupna ploština (slika 9.)



Slika 9. Definicija stupnja ispunjenosti

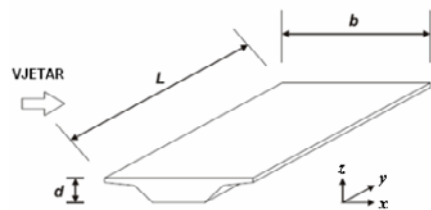
2.4 Sile vjetra na mostove

Poglavlje 2.4 odnosi se samo na mostove s konstantnom visinom i poprečnim presjecima prikazanim na slici 10., s jednom kolničkom konstrukcijom, s jednim ili više raspona. Povrh toga u ovom je poglavlju usvojeno da se za širinu poprečnog presjeka mosta rabi simbol b , a za visinu poprečnog presjeka simbol d , za razliku od prethodnog poglavlja što je u skladu s [1].



Slika 10. Uobičajeni poprečni presjeci mostova

Sile vjetra na most predstavljene su komponentama u x , y , z smjeru prema slici 11.



Slika 11. Smjerovi sile vjetra na most

Sila vjetra u smjeru x

Ako se ustanovi da postupak s dinamičkim odzivom nije potreban (nacionalni dodatak može za to dati kriterije), tada se sila u smjeru x proračuna prema jednadžbi (21), a za faktor konstrukcije se uzima $c_s c_d = 1$.

$$F_W = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \quad (21)$$

gdje je:

F_W - sila vjetra

ρ - gustoća zraka

v_b - osnovna brzina vjetra

A_{ref} - usporedna ploština (okomita na smjer vjetra

$$A_{ref} = d_{tot} \cdot L, \text{ detaljna pravila izložena u [1])}$$

C - faktor opterećenja vjetrom dan je jednadžbom (22):

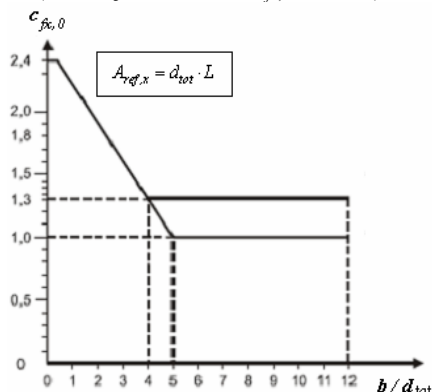
$$C = c_e \cdot c_{f,x} \quad (22)$$

c_e - koeficijent izloženosti

$c_{f,x}$ - koeficijent sile za smjer x dan jednadžbom:

$$c_{f,x} = c_{f,x,0}$$

$c_{fz,0}$ - koeficijent sile bez slobodnog protoka na krajevima (uobičajeni mostovi $c_{fz,0} = 1,3$ (slika 12.).



Slika 12. Koeficijenti sile $c_{fz,0}$

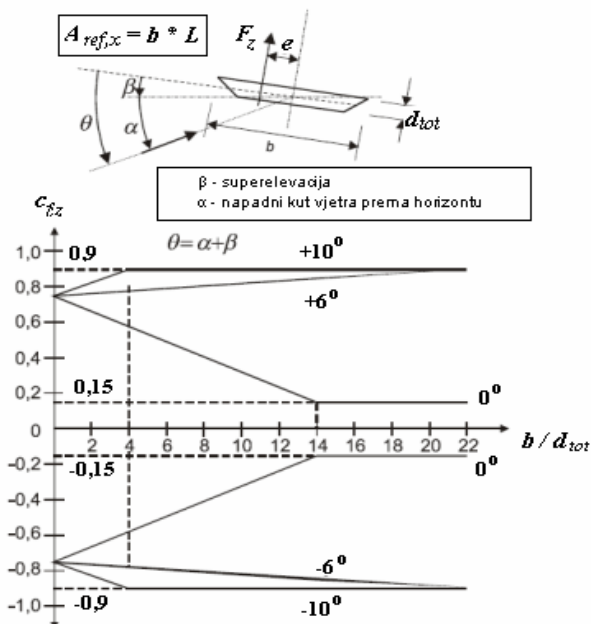
Sila vjetra u smjeru y

Ako je potrebno može se računati i sa silama u smjeru y, a preporučene vrijednosti sila jesu:

- punostijeni mostovi, 25 % sile vjetra u smjeru x
- rešetkasti mostovi, 50 % sile vjetra u smjeru x

Sila vjetra u smjeru z

Potrebno je odrediti koeficijent za odizanje i tlak c_{fz} (koeficijent uzgona), a c_{fz} se ne smije upotrijebiti za proračun vertikalnih vibracija mosta. U nedostatku mjerenja u zračnom tunelu, preporučena je vrijednost: $c_{fz} = \pm 0,9$ Ta vrijednost uzima u obzir utjecaj poprečnog nagiba mos



Slika 13. Koeficijent sile c_{fz}

ta, nagiba terena i promjenu kuta smjera vjetra i konstrukcije mosta zbog turbulencije. Kao nadomjestak c_{fz} se može uzeti i prema slici 13.

2.5 Dodatak E: Vrtložno odvajanje i aerodinamičke nestabilnosti

Kada se vrtlozi naizmjenično odvajaju od rubova poprečnog presjeka mosta dolazi do povećanja promjenljivog opterećenja poprečno na smjer vjetra. Kada se frekvencija vrtložnog odvajanja poklopi s vlastitom frekvencijom konstrukcije mogu nastati oscilacije povećanim amplitudama. Taj je uvjet ispunjen kada je brzina vjetra jednaka kritičnoj brzini vjetra pri kojoj nastaje vrtložno odvajanje. Čestom pojavom kritične brzine vjetra može doći i do zamora materijala.

Učinak vrtložnog odvajanja potrebno je ispitati ako je omjer najveće prema najmanjoj dimenziji poprečnog presjeka veći od 6.

Kritična brzina za savijajući oblik oscilacija "i" definira se kao brzina vjetra pri kojoj je frekvencija vrtložnog odvajanja jednaka vlastitoj frekvenciji konstrukcije ili konstrukcijskog elementa, a određena je jednadžbom:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} \tag{23}$$

gdje je:

- $v_{crit,i}$ - kritična brzina vjetra za i - ti vlastiti oblik oscilacija
- $n_{i,y}$ - vlastita frekvencija i - tog vlastitog oblika oscilacija poprečno na smjer vjetra, [Hz]
- b - mjerodavna visina poprečnog presjeka (razmak točaka odvajanja vrtloga), [m]
- St - Strouhalov broj prema tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti Strouhalova broja

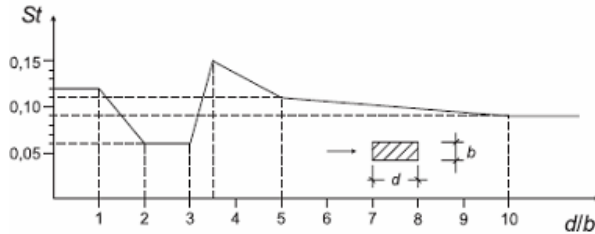
POPREČNI PRESJEK		St
	Za sve vrijednosti Re	0,18
	$0,5 \leq d/b \leq 10$	vidi sliku 14
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	0,11
	$d/b = 1,5$	0,10
	$d/b = 2$	0,14
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	0,13
	$d/b = 2$	0,08
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	0,16
	$d/b = 2$	0,12
Linearna interpolacija	$d/b = 1,3$	0,11
	$d/b = 2,0$	0,07
Ekstrapolacija Strouhalova broja kao funkcije d/b nije dopuštena		

Vrtložno odvajanje ne može nastati ako je ispunjen uvjet prema jednadžbom:

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m \quad (24)$$

gdje je:

v_m - prosječna brzina vjetra.



Slika 14. Strouhalov broj za oštrobridne pravokutne poprečne presjeke

Djelovanje izazvano vrtložnim odvajanjem proizlazi iz inercijalnih sila po jedinici duljine i poprečno je na smjer vjetra (na mjestu "s" konstrukcije), a definirano je jednadžbom.

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (25)$$

gdje je:

$F_w(s)$ - sila koja djeluje na konstrukciju kao posljedica vrtložnog odvajanja

$m(s)$ - oscilirajuća masa konstrukcije po jedinici duljine

$n_{i,y}$ - vlastita frekvencija konstrukcije

$\Phi_{i,y}(s)$ - normirani oblik konstrukcije na mjestu najvećeg pomaka

$y_{F,max}$ - najveći pomak točke gdje je $\Phi_{i,y}(s) = 1$.

Najveći pomak konstrukcije proračuna se jednadžbom (26) koja u sebi uključuje učinke hrapavosti i turbulenciju, i rabi se za uobičajene klimatske prilike.

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (26)$$

gdje je:

K - faktor oblika oscilacija

K_w - faktor proračunske duljine utjecaja

c_{lat} - aerodinamički koeficijent uzbudne sile

Sc - Scrutonov broj, njime je predstavljena osjetljivost na oscilacije, a ovisi o prigušenju konstrukcije i omjeru mase konstrukcije prema masi fluida:

$$Sc = \frac{2\delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} \quad (27)$$

gdje je:

δ_s - konstrukcijsko prigušenje izraženo logaritamskim dekrementom

b - mjerodavna dimenzija poprečnog presjeka (visina prema tablici 3.)

$m_{i,e}$ - ekvivalentna masa po jedinici duljine za i - ti oblik oscilacija

ρ - gustoća zraka, $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

Aerodinamički koeficijent uzbudne sile

Vrijednost koeficijenta aerodinamičke uzbudne sile c_{lat} uzima se prema tablici 4., dok se osnovna vrijednost aerodinamičkog koeficijenta uzbudne sile $c_{lat,0}$ uzima prema tablici 5., gdje je

$v_{m,Lj}$ vrijednost prosječne brzine vjetra u središtu proračunske duljine djelovanja.

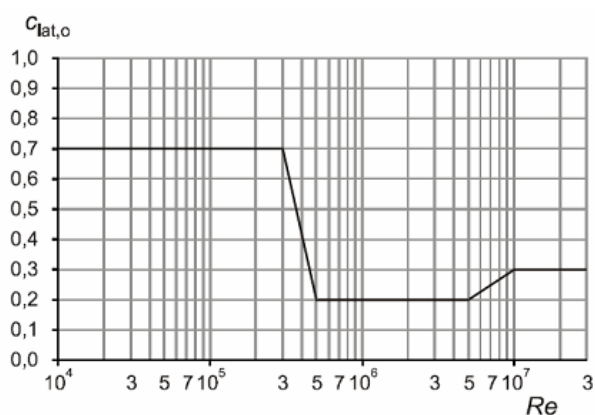
Tablica 4. Koeficijent aerodinamičke uzbudne sile

Stupanj kritične brzine vjetra	c_{lat}
$v_{crit,i} / v_{m,Lj} \leq 0,83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0,83 \leq v_{crit,i} / v_{m,Lj} \leq 1,25$	$c_{lat} = \left(3 - 2,4 \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \right) c_{lat,0}$
$1,25 \leq v_{crit,i} / v_{m,Lj}$	$c_{lat} = 0$

Tablica 5. Osnovne vrijednosti koeficijenta aerodinamičke uzbudne sile

POPREČNI PRESJEK	$c_{lat,0}$	
Za sve vrijednosti Re	vidi 13	
$0,5 \leq d/b \leq 10$	1,1	
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	0,8
	$d/b = 1,5$	1,2
	$d/b = 2$	0,3
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	1,6
	$d/b = 2$	2,3
Linearna interpolacija	$d/b = 1$	1,4
	$d/b = 2$	1,1
Linearna interpolacija	$d/b = 1,3$	0,8
	$d/b = 2$	1,0

Ekstrapolacija za lateralni koef. pobudne sile kao funkcije d/b nije dopuštena

Slika 15. Vrijednosti $c_{lat,0}$ u ovisnosti o Re

Vrijednosti faktora oblika oscilacija K i koeficijenta proračunske duljine utjecaja K_w dane su jednadžbama:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int |\Phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \cdot \sum_{j=1}^m \int |\Phi_{i,y}^2(s)| ds} \quad (28)$$

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int |\Phi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int |\Phi_{i,y}(s)| ds} \leq 0,6 \quad (29)$$

gdje je:

$\Phi_{i,y}$ - normirani i – ti oblik osciliranja

L_j - duljina djelovanja postavlja se u područje najvećeg pomaka, a ovisi od $y_{F,max}$

l_j - duljina između dviju nultih točaka oblika oscilacija

n - broj područja gdje vrtložno odvajanje nastaje istodobno

m - broj "trbuha oscilacija" za dani $\Phi_{i,y}$.

Da bi se shvatile odredbe konstrukcijskog eurokoda [1] izložene u prethodnim poglavljima, u nastavku ćemo detaljno obrazložiti neke najvažnije pojmove.

3 Aerodinamičke vibracije mostova

Aerodinamičke vibracije mostova, kao i aerodinamička stabilnost poprečnih presjeka valjkastih tijela najviše su vezani uz aeronautiku, a u građevinarstvu su ovi pojmovi važni pri projektiranju vitkih konstrukcija i pri izboru oblika poprečnih presjeka mostova velikih raspona.

Sva djelovanja na konstrukciju zbog vjetra uglavnom su rezultat ovih aerodinamičkih uzbuđa [2]:

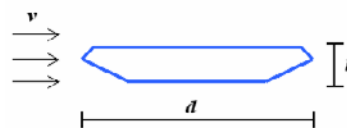
1. Uzbuda zbog odvajanja vrtloga, kod koje poradi naizmjeničnog formiranja i odvajanja vrtloga na zavjet-

renom dijelu poprečnog presjeka konstrukcije nastaju harmonijske sile, koje djeluju na konstrukciju u smjeru okomitom na pravac vjetra, s frekvencijom koja je proporcionalna brzini vjetra.

2. Samouzbudne vibracije koje nastaju zbog nestabilnih karakteristika konstrukcije. Konstrukcija stvara vlastitu nestabilnost vibriranjem vlastitom frekvencijom, a vibracije se zaustavljaju jedino povećanjem prigušenja ili ograničavanjem vrijednosti sile koja uzrokuje nestabilnost.
3. Stohastička uzbuda zbog turbulencije ili odvajanja vrtloga, kada stohastička uzbuđna sila vjetra primorava konstrukciju na vibriranje jednom od njezinih vlastitih frekvencija. Takva je uzbuda zbog turbulencije u smjeru vjetra, a poradi odvajanja vrtloga okomita na smjer vjetra.

3.1 Vrtložno odvajanje (eng. vortex shedding)

Vrtlozi se pojavljuju u vremenski promjenljivim strujanjima, npr. kada se strujanje oko tijela ubrzava. Nastanak vrtloga opisat ćemo na primjeru trapezoidnoga zatvorenog poprečnog presjeka mosta prema slici 16.:



Slika 16. Trapezoidni poprečni presjek

Karakter strujanja zraka oko presjeka ovisi o Reynoldsovu broju koji karakterizira lamilarno, prijelazno ili turbulentno strujanje, a definiran je jednadžbom:

$$Re = \frac{v \cdot b}{\nu} = \frac{v \cdot b \cdot \rho}{\mu} \quad (30)$$

gdje je:

v - brzina vjetra

b - visina poprečnog presjeka

ν - koeficijent kinematičke viskoznosti zraka

μ - koeficijent dinamičke viskoznosti zraka [$Pa \cdot s$]

ρ - gustoća zraka.

Pri malim brzinama vjetra (malene vrijednosti Re) strujnice lako prate oblik poprečnog presjeka mosta, a kako se brzina strujanja povećava sve im je teže pratiti konturu poprečnog presjeka. Razdvajanje struje zraka na prednjoj strani poprečnog presjeka u točki 1. i formiranje graničnog sloja u kojem se formiraju manji vrtlozi prikazano je na slici 17.



Slika 17. Prikaz toka zračnih struja

Povećanjem brzine strujanja dolazi do pojave vrtloženja sitnih djelića fluida (zraka) na zavjetrenoj strani poprečnog presjeka, a razlog tome je što je tlak na zavjetrenoj strani veći od tlaka na privjetrenoj strani presjeka, što se vidi iz Bernoullijeve jednadžbe za aerodinamički tok:

$$p_s + \rho \frac{v^2}{2} = p_t (\text{const.}) \quad (31)$$

gdje je:

p_s - statički tla

p_t - ukupni tlak

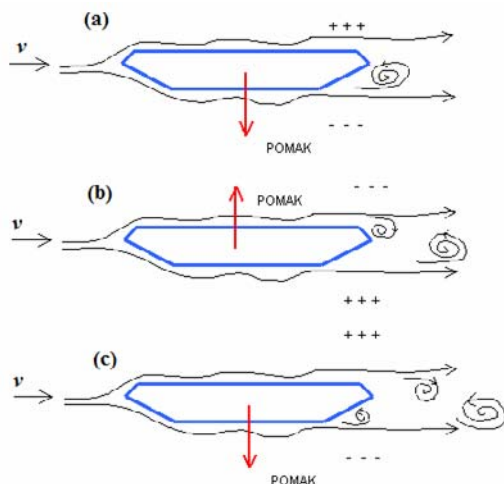
$\rho \cdot v^2 / 2$ - dinamički tlak.

Djelci zraka koji se kreću prema zavjetrenoj strani poprečnog presjeka gube kinetičku energiju pri vrtnji pa ne mogu probiti područje višeg tlaka i vraćaju se prema natrag u područje nižeg tlaka i tako nastaje vrtlog. Dolaskom novih djelića s privjetrene strane (prednjega graničnog sloja) vrtlog se povećava (slika 18.).



Slika 18. Formiranje velikog vrtloga u donjem dijelu poprečnog presjeka

U dodirnoj površini struje zraka i vrtloga djeluje trenje te struja teži odvući vrtlog. Onog trenutka kada gradijent tlaka toliko oslabi da se više ne može oduprijeti djelovanju trenja vrtlog se odvaja i ostavlja prostor za nastanak vrtloga suprotnog smjera vrtnje na gornjoj strani poprečnog presjeka. Cikličkim odvajanjem vrtloga formira se Kàrmànova vrtložna staza (slika 19.).



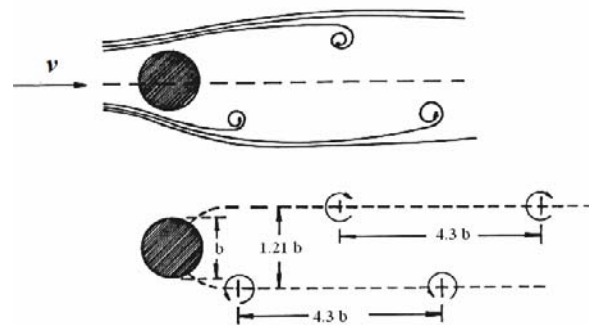
Slika 19. (a) odvajanje vrtloga u donjem dijelu, (b) nastanak vrtloga u gornjem dijelu, (c) Kàrmànova vrtložna staza

Oscilatorna sila koja nastaje kao posljedica odvajanja vrtloga postala je razumljiva promatranjem brzine toka

u području u kojem se vrtlozi spajaju s vanjskim slobodnim strujanjem. U tom je području lokalna brzina vjetra veća od brzine vanjskog strujanja iz razloga što se zbrajaju brzina slobodnog strujanja i tangencijalna brzina vrtloga i tako zbog valjanosti Bernoullijeve jednadžbe (31) formiraju područje lokalno nižeg tlaka. Ta područja dovode do stvaranja sile uzgona i pomaka poprečnog presjeka mosta u označenim smjerovima prema slici 19.

Kàrmànova vrtložna staza

Odvajanjem vrtloga na zavjetrenoj strani poprečnog presjeka formira se Kàrmànova vrtložna staza. Vrtlozi se naizmjenično pravilno odvajaju i suprotnog su smjera vrtnje (slika 20.).



Slika 20. Kàrmànova vrtložna staza

Frekvencija pri kojoj se vrtlozi odvajaju određuje se jednadžbom:

$$f \approx 0,20 \cdot \frac{v}{b} \left(1 - \frac{20}{\text{Re}} \right) \quad (32)$$

Vrtlozima je pridružena bočna harmonijska sila koja se naziva Kàrmànovom silom, a vrijednost te sile dana je jednadžbom:

$$F_K = F_0 \cdot \sin \omega_K t \quad (33)$$

gdje je:

F_K - Kàrmànova sila

ω_K - kružna frekvencija Kàrmànovove sile dana je jednadžbom:

$$\omega_K = 2\pi \frac{St \cdot v}{b} \quad (34)$$

St - Strouhalov broj

v - brzina vjetra

b - razmak točaka odvajanja vrtloga

F_0 - amplituda Kàrmànovove sile, dana jednadžbom:

$$F_0 = C_L \cdot q_b \cdot A_{ref} \quad (35)$$

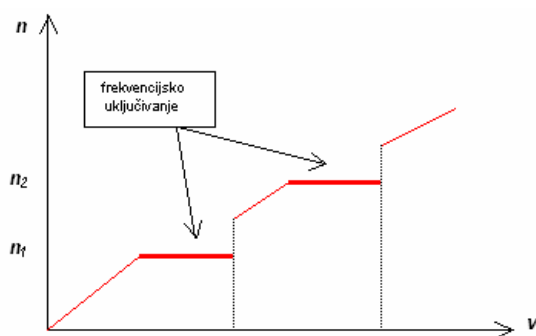
C_L - koeficijent uzgona

q_b - osnovni tlak izazvan brzinom vjetra

A_{ref} - usporedna ploština.

Takve oscilacije mogu stvoriti neželjene posljedice ako se frekvencija vrtložnog odvajanja poklopi s nekom od vlastitih frekvencija konstrukcije. Brzina vjetra pri kojoj se to događa naziva se kritičnom brzinom vjetra $v_{crit,i}$.

Za $v = v_{crit,i}$ tijelo oscilira pri relativno malim brzinama vjetra i unatoč malim aerodinamičkim silama, ali uz vlastitu sposobnost ograničavanja amplituda oscilacija. Ta se pojava naziva frekvencijsko uključivanje [3] (engl. *lock-in phenomenon*) (slika 21.).

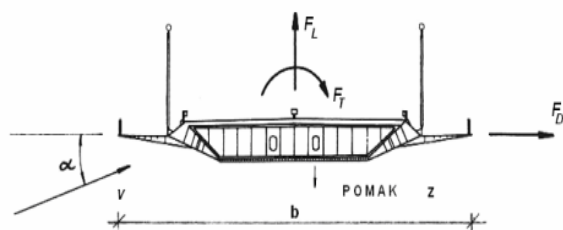


Slika 21. Frekvencijsko uključivanje

Povećanjem brzine vjetra pojava frekvencijskog uključivanja nestaje, a amplitude oscilacija se smanjuju.

3.2 Aerodinamička stabilnost poprečnog presjeka [3]

Kao rezultat djelovanja vjetra na poprečni presjek mosta prema slici 22. djeluju sljedeće aerodinamičke sile:



Slika 22. Aerodinamičke sile

$$F_D \text{ sila otpora, } F_D = C_D \cdot q_b \cdot A_{ref,x} \quad (36)$$

$$F_L \text{ sila uzgona, } F_L = C_L \cdot q_b \cdot A_{ref,z} \quad (37)$$

$$F_T \text{ moment torzije, } F_T = C_T \cdot q_b \cdot A \cdot b \quad (38)$$

gdje je :

C_D, C_L, C_T - koeficijenti otpora, uzgona i torzije ovise o obliku poprečnog presjeka i kuta djelovanja vjetra α

q_b - osnovni tlak izazvan brzinom vjetra

A - ploština poprečnog presjeka

$A_{ref,x}, A_{ref,z}$ - sporedne ploštine za smjer sila

F_D i F_L .

Za vertikalno gibanje tijekom vibracija usvojit će se oznaka z (gibanje prema dolje je pozitivno). Kut djelovanja vjetra α na poprečni presjek određen je jednadžbom:

$$\alpha \cong \alpha^* + \frac{dz/dt}{v} = \alpha^* + \Delta\alpha \quad (39)$$

gdje je:

α^* - kut djelovanja vjetra kada je dz/dt zanemarivo mala vrijednost

dz/dt - vertikalna brzina poprečnog presjeka.

Analizom promjene vrijednosti kuta α na vrijednost sile uzgona dolazi se do tri slučaja:

$$dC_L / d\alpha > 0$$

Povećanje sile uzgona u trenutku pozitivnog pomaka poprečnog presjeka posljedica su pojačane vibracije.

$$dC_L / d\alpha < 0$$

Povećanje sile uzgona u trenutku negativnog pomaka poprečnog presjeka posljedica su vibracije velikim amplitudama, presjek se definira kao aerodinamički nestabilan.

$$dC_L / d\alpha = 0$$

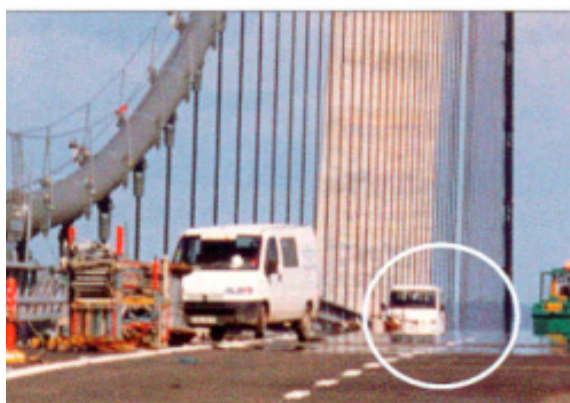
Poželjno stanje kojem se teži pri ispitivanju u zračnim tunelima, promjena sile uzgona ne ovisi o pomaku mosta.

4 Primjeri

4.1 Viseći most Storebaelt (Danska) [5]

Most Storebaelt nalazi se u Danskoj i premošćuje tjesnac Storebaelt. Most ima glavni srednji raspon od 1624 m i dva pristupna raspona po 535 m, a nosi četiri prometna traka. Širina poprečnog presjeka nosača je 31 m, a visina mu je 4 m. Most je pušten u promet 1998. godine. Tijekom završne faze izgradnje uočene su amplitude vertikalnih oscilacija rasponske konstrukcije mosta od 0,3 – 0,5 m pri relativno malim brzinama vjetra od približno 5 – 10 m/s. Oscilacije, unatoč suprotnim očekivanjima, nisu nestajale ni nakon dovršetka mosta. Na slici 23. je prikazano parkirano vozilo (u krugu), snimljeno sa čvrste točke, te se mogu uočiti razmjeri amplitude oscilacija mosta tijekom završne faze njegove izgradnje.

Uzrok oscilacija bilo je vrtložno odvajanje, a to je potvrđeno primjenom programa za promatranje i analizu vjetra radi utvrđivanja uzroka i veličine oscilacija [6].



Slika 23. Parkirano vozilo (u krugu) na mostu Storebaelt snimljeno sa čvrste točke

Za most Storebaelt je interesantno da se zbog malih vlastitih frekvencija mosta nekoliko vertikalnih oblika oscilacija prouzročeni savijanjem može uzбудiti vrtložnim odvajanjem (3., 5. i 6. oblik oscilacija mosta), što je prikazano u tablici 6.

Tablica 6. Izmjerene vlastite vrijednosti i najveće amplitude na mostu Storebaelt

Slika 26.	Prikaz djelovanja usmjeravajućeg "kričca"	Slika 26.
3	0,130	0,26 0,32
5	0,209	0,23 0,18 0,29 0,14 0,30
6	0,242	0,20 0,22 0,19

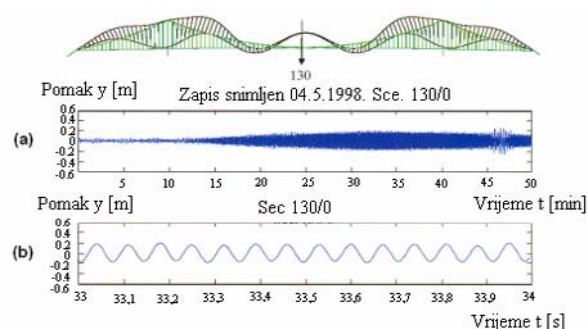
Vrijednosti bezdimenzijskih brzina vjetra (engl. *non-dimensional wind speed*) $v/n \cdot d$ (tablica 7.) za ove su oblike bliske jedna drugoj i podudaraju se s vrijednosti-

ma frekvencijskog uključivanja utvrđenim ispitivanjima u zračnom tunelu (slike 21. i 27.).

Tablica 7. Vrijednosti bezdimenzijskih brzina

Oblik	Bezdimenzijska brzina $v/n \cdot d$
3	1,5
	1,2
5	1,3
	1,0
	1,4
	1,2
	1,0
6	1,2
	1,2
	1,0

Na slici 24. posebno je prikazan dijagram pomaka za 6. oblik dobiven u sredini raspona mosta za vrijeme od 50 min i 1 min. Na dijagramu je vidljivo da se vrijednost maksimalne amplitude kreće oko 0,2 m.



Slika 24. Dijagrami vertikalnih pomaka za 6. oblik, u sredini raspona u ovisnosti od vremena: (a) vrijeme od 50 min, (b) vrijeme od 1 min

Objašnjenje uzbuđene vrtložnim odvajanjem može se potkrijepiti i simulacijama toka. Na slici 25. prikazana je promjena koeficijenta sile uzgona C_L tijekom vremena pri frekvencijskom uključivanju, s pripadajućim smjerovima strujanja, za trapezoidni poprečni presjek nosača pristupnih raspona mosta. Poprečna je sila (izražena kao bezdimenzijski koeficijent uzgona) pozitivna u smjeru prema gore. Zavisnost od vremena i oblici strujanja simulirani su primjenom diskretnog modela vrtloga [7]. Primijećeno je odizanje blisko periodičkom, s bezdimenzijskim periodom osciliranja oko 2, za dani geometrijski oblik presjeka (slika 25.).

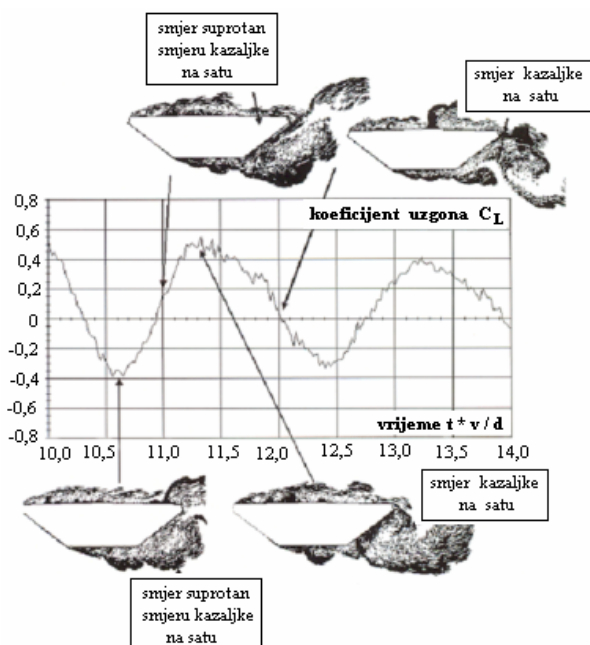
Opis slike 25.:

$t \cdot v/d = 10,6$ veliki je vrtlog sa smjerom suprotnim od kazaljke na satu prislonjen na donju nagnutu plohu presjeka. Vrtlog stvara usisavanje i vuče presjek prema dolje te tako stvara negativnu poprečnu silu.

$t \cdot v/d = 11,0$ vrtlog se odvaja od poprečnog presjeka i odmiče niz vjetar djelovanjem vanjskoga glavnog stru-

janja, pa se u tom procesu usisavaju dijelovi fluida s gornjeg poprečnog sloja u području vrtložnog traga. Tim djelovanjem s gornje strane presjeka počinje stvaranje vrtloga koji će biti u smjeru kazaljke na satu.

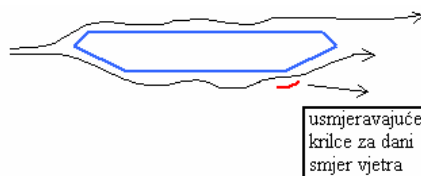
$t \cdot v/d = 11,5$ lokalno je odizanje na svom maksimumu, gornji vrtlog je potpuno razvijen. Ovaj se promjenljivi oblik vrtloženja nastavlja s određenim promjenama veličine, što se ogleda u vremenskoj ovisnosti odizanja.



Slika 25. Vremenska zavisnost koeficijenta uzgona C_L i pripadajućih smjerova strujanja pri naznačenim vrijednostima bezdimenzijskog vremena $t \cdot v/d$

Analize mosta primjenom metode konačnih elemenata su pokazale da oscilacije s povećanim vertikalnim amplitudama nisu kritične s konstrukcijskog stajališta, nego sa strane sigurnosti prometa i u javnosti poimanja mosta kao nesigurnog, pa se stoga pristupilo ublažavanju tih amplituda. Prva je serija ispitivanja u zračnom tunelu utvrdila postojanje vrtlozima uzrokovanih oscilacija, na temelju čega je predloženo, a zatim i ispitano, ublažavanje vrijednosti amplituda vertikalnih oscilacija primjenom usmjeravajućih krilaca (slika 26.).

Radi smanjenja amplituda oscilacija nosača izazvanih djelovanjem vrtloga ispod kolničke ploče, u točki loma donje horizontalne plohe presjeka na strani niz vjetar montirano je "krilce" (engl. *guide vane*) za usmjeravanje strujanja. Svrha krilca je sprječavanje odvajanja zračnog toka i s tim u svezi sprječavanja ritmičkog formiranja velikih vrtloga u neposrednoj blizini vanjskih stranica nosača, tako što se skreće tok ispod presjeka prema gore (slika 26.). Učinkovitost krilaca ispitana je na modelima u zračnom tunelu.



Slika 26. Prikaz djelovanja usmjeravajućeg „krilca“

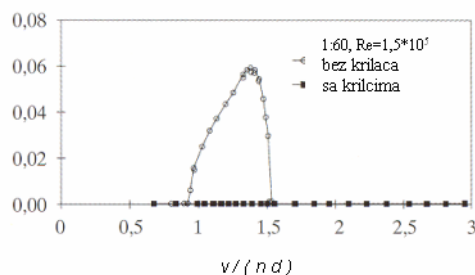
MODEL 1

Mjerilo modela je 1:80, što odgovara Reynoldsovu broju, temeljenom na širini presjeka, reda veličine 45.000. Ispitivanjem nije dokazana učinkovitost usmjeravajućih krilaca. Naknadno je utvrđeno da je razlog tome učinak mjerila jer pri ovim Reynoldsovima granični sloj vrtloženja potpuno obavija usmjeravajuća krilca, priječeći tako strujanje kroz razmak od 0,0075 m (veličina odgovarajuća veličini modela) između krilaca i presjeka nosača mosta.

MODEL 2

Mjerilo modela je 1:60, što odgovara Reynoldsovu broju, temeljenom na širini presjeka, reda veličine 150.000. Ovaj je model pokazao učinkovitost krilaca, s time da je krilce niz vjetar odgovarajuće djelovalo samo uz prisutnost i krilca uz vjetar, što proturječi teoriji da vrtlozi iz područja uz presjek uzrokuju oscilacije pri frekvencijskom uključivanju. Pripadajući dijagram odgovora modela poprečnog presjeka s ugrađenim krilcima i bez njih prikazan je na slici 27.

Korijen od sume kvadrata pomaka podijeljen s visinom presjeka

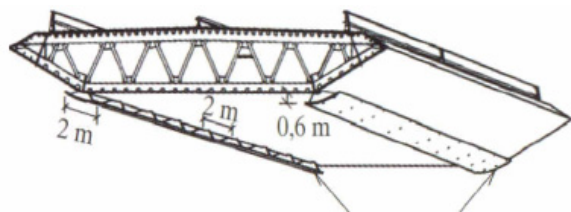


Slika 27. Odziv na vrtložno odvajanje s krilcima i bez njih za usmjeravanje strujanja, model 1:60

MODEL 3

Mjerilo modela je 1:30, što odgovara Reynoldsovu broju, temeljenom na širini presjeka, reda veličine 500.000. Ispitivanja na ovom modelu su pokazala da je pri ispitivanju na MODELU 2 (mjerilo 1:60) granični sloj strujanja težio odvajanju na donjoj točki spoja stranica poprečnog presjeka uz vjetar, zbog nastojanja krilca uz vjetar da usmjerava strujanje oko donjeg kuta. Pri ispitivanju na modelu 1:30 to se nije dogodilo, a time je potvrđeno da je potreba postojanja krilaca uz vjetar uzrokovana utjecajem mjerila [8]. Ispitivanjima na MODELU 3 potvrđeno je da je postignut učinak koji je prikazan na slici 26.

Oblik krilca za usmjeravanje strujanja sastoji se od zakrivljene čelične ploče debljine 6 mm i duljine tetive 2 m, udaljene 0,6 m od trupa nosača mosta. Krilca su pričvršćena za trup mosta 8 mm čeličnim profilima na razmacima od svakih 2 m uzduž mosta s obje donje strane poprečnog presjeka mosta (slika 28.).



Slika 28. Raspored krilaca za usmjeravanje strujanja zraka

Zahtijevana duljina pokrivanja raspona krilcima za usmjeravanje strujanja bila je najveća za 5. oblik oscilacija i iznosila je 2000 m, ali je iz praktičnih razloga samo glavni raspon od 1400 m pokriven usmjeravajućim krilcima, što je u potpunosti zadovoljavalo zahtjeve proizašle iz analize 3. i 6. oblika.

Od ugradnje usmjeravajućih krilaca 1998. godine, nisu zabilježene vrtložnim odvajanjem uzbuđene povećane amplitude vertikalnih oscilacija ovog mosta.

4.2 Viseći most Osteroy (Norveška) [5]

Iskustva stečena na mostu "Storebaelt" poslužila su i za eliminiranje povećanih vertikalnih amplituda oscilacija na mostu "Osteroy" raspona 595 m (slika 29.). Most "Osteroy" ima čelični trapezoidni poprečni presjek širok 13,6 m, visok 2,5 m, a nosi dvotračnu cestu i pješačke staze. Nakon izgradnje mosta i puštanja u promet, pokazalo se je da se na mostu pojavljuju povećane vertikalne amplitude oscilacija slično kao na mostu "Storebaelt", i to pri brzini vjetra 5 – 8 m/s. Videopraćenjem (monitoringom) tijekom šestomjesečnog razdoblja ustanovljeno je da je najveća amplituda vertikalnih oscilacija 0,5 m i da se ona javlja za prvih pet vertikalnih vlastitih oblika pri bezdimenzijskim brzinama vjetra $v/n \cdot d = 1,1 - 1,9$.

Simulacije vrtložnog toka pokazale su vrtloge slične onima kao kod mosta "Storebaelt", bez obzira na razlike u obliku poprečnog presjeka. Kako je poprečni presjek mosta "Osteroy" manje aerodinamičkog oblika od mosta "Storebaelt", nije odmah bilo jasno da bi krilca za usmjeravanje strujanja pomogla u smanjenju amplituda vertikalnih oscilacija. Zbog toga su obavljena ispitivanja u zračnom tunelu. Na temelju ispitivanja krilaca za usmjeravanje strujanja mosta "Storebaelt" bilo je jasno da su potrebna ispitivanja s velikim Reynoldsovim brojem

da bi se točno opisalo strujanje zraka između krilaca i mosta. Model mosta izveden je u mjerilu 1:10, tako da je Reynoldsov broj bio dovoljno velik (400.000).

Ispitivanja su pokazala da je dovoljno krilcima pokriti trećinu raspona i to u intervalima. Učinkovitost takvog pokrivanja krilcima za razliku od kontinuiranog pokrivanja pri ublaživanju vertikalnih oscilacija na mostu "Storebaelt" jest u činjenici da je potrebna određena duljina raspona mosta da bi se formirali vrtlozi, a ovaj most ima kraći raspon od mosta Storebaelt. Krilca za usmjeravanje strujanja su postavljena na razmacima od 4 m, što je bilo dovoljno da se spriječi formiranje vrtložnog traga. Sama krilca su izvedena od zakrivljenih čeličnih ploča duljine 4 m, duljine tetive 1 m, udaljena od poprečnog presjeka mosta 0,3 m.



Slika 29. Primjer primjene krilaca za usmjeravanje strujanja zraka na visećem mostu «Osteroy» u Norveškoj

Nakon što su postavljena krilca za usmjeravanje strujanja, povećane amplitude vertikalnih oscilacija više se nisu pojavljivale.

Krilca za usmjeravanje strujanja prikazana su na slici 29.

LITERATURA

[1] Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures, Part 1-4 : Actions on structures – Wind actions, EN 1991-1-4, CEN-European Committee for Standardization, 2004.

[2] Sachs, P.: Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, Oxford, 1972.

-
- [3] Androić, B.; Čaušević, M.; Dujmović, D.; Džeba, I.; Markulak, D.; Peroš, B.: *Čelični i spregnuti mostovi*, IA Projektiranje, Zagreb 2006.
- [4] Den Hartog, J. P.: *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, New York, 1956.
- [5] Larsen, A.; Poulin, S.: *Vortex – Shedding Excitation of Box – Girder Bridges and Mitigation*, Structural Engineering International, Vol. 15, No. 4. , pp. 258-263 , November 2005.
- [6] Larsen, A.; Esdahl, S.; Andersen, J. E.; Vejrum, T.: *Storebaelt suspension bridge – vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 88 (2000), pp. 283-296.
- [7] Walther, J.H.; Larsen, A.: *Two dimensional discrete vortex method for application to bluff body aerodynamics*, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics 67 & 68 (1997), pp. 183-193.
- [8] Larsen, S.V.; Koss, H.K.; Smitt, L.W.; Larsen, A.: *Vortex-induced motion of bridge decks investigated at high Reynolds numbers using large scale section model*, Proceedings of the 5th international conference on bluff body aerodynamics, BBAA, 2003, Ottawa, Canada.
- [9] Čaušević, M.: *State-of-the-art on aerodynamics of steel long-span bridges at the end of the second millenium*, // INFORMATOLOGIJA, 34 (2001) 3-4, Zagreb, 252-258.
- [10] Larsen, A.: *Aerodynamics of the Tacoma Narrows Bridge – 60 years later*, Structural Engineering International, Vol. 10, No. 4, pp. 243-248, November 2000.
- [11] Čaušević, M.: *Vibracije*, Tehnička enciklopedija, Vol. 13, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1997., 463.-478.
- [12] Daugherty, R. L.; Franzini, J. B.; Finnemore, E. J.: *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, McGraw-Hill Book Company 1985.
-