

АНАЛИЗА УТИЦАЈА УСЛЕД ДЕЈСТВА ВЕТРА НА ПРИМЕРУ ЦИЛИНДРИЧНОГ ТВ ТОРЊА ПРЕМА ЕВРОКОДУ

Петар Кнежевић¹
Миливоје Милановић²

УДК: 624.97.042.41

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.005

Резиме: Поступци одређивања утицаја дејства ветра су дефинисани према СРПС ЕН 1991-4 за различите типове конструкција. У овом раду ће на примеру ТВ торња, цилиндричног попречног пресека, променљивог по висини, бити дат детаљан приказ прорачуна утицаја услед ветра код оваквих конструкција са освртом на евентуалне проблеме у препорукама СРПС ЕН 1991-4, као и на апроксимације потребне за примену наведених препорука и поступака.

Кључне речи: Дејство ветра, брзина ветра, коефицијент силе, пригушење.

1. УВОД

Високи објекти у грађевинарству су изложени дејству ветра а њихово понашање зависи не само од саме конструкције, већ и од природе струјања ваздуха, као и од амбијента у ком се налази. Како су овакве конструкције еластичне, а изложене су дејству аеродинамичких сила, њихово понашање услед дејства ветра се назива аероеластично понашање. Како су аеродинамичке силе стохастички променљиве величине, њихово одређивање и одређивање утицаја које изазивају у конструкцијама представља тежак и сложен задатак. СРПС ЕН 1991-1-4 даје препоруке и дефинише процедуре за про-рачун конструкција изложених дејству ветра уз дефинисање спољашњих сила и аеродинамичког понашања саме конструкције. Како СРПС ЕН 1991-1-4 дефинише параметре и коефицијенте за конструкције једноставније конфигурације, на следећем нумеричком примеру ће бити приказане неопходне апроксимације и евентуални недостаци примене наведеног стандарда при прорачуну утицаја у конструкцијама услед ветра.

2. УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ

Изглед торња

¹ Assist. PhD, State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, petar.knezevic.dunp@gmail.com

² Assist. PhD, State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, pbarhisnp@gmail.com

Приказ армиранобетонског ТВ торња дат је на слици 1 . Укупна висина торња, не рачунајући антену је $H = 127\text{m}$. Торањ је углавном константног попречног пресека и састоји се из следећих целина:

- цилиндар I, простире се првих 80м (спољашњи пречник 8м и дебљине зида 1м),
- платформа, простире се до коте од 102 м (спољаш. пречник 30м и висина 22 м),
- цилиндар II, простире се изнад платформе (спољашњи пречник 4м, висина 25м и дебљине зида 0.5м).

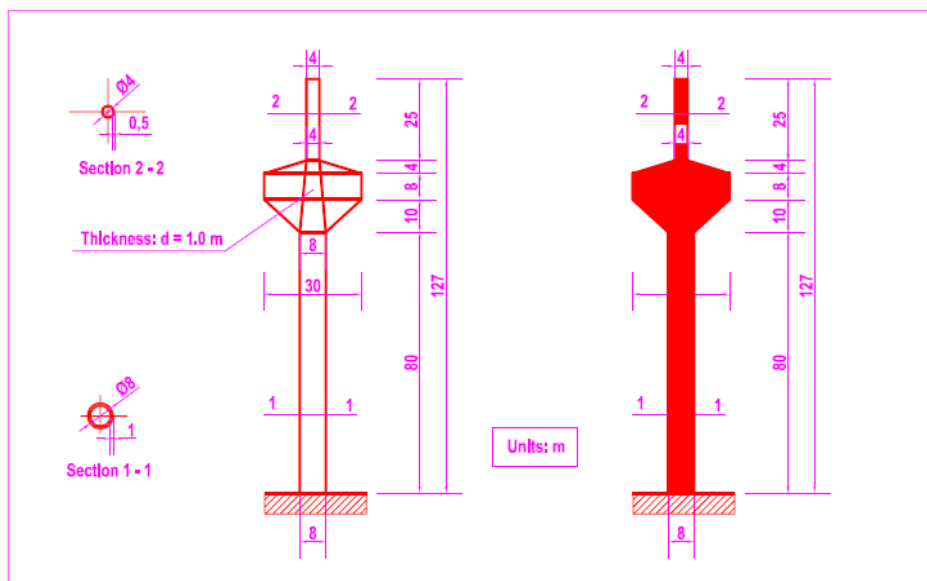
Подаци о околини

ТВ торањ се налази на субурбаној, релативно равној површини у близини села и шуме. У његовој близини се не налазе брда и гребени.

Према расположивим метеоролошким подацима, може се претпоставити основна брзина ветра од $v_b = 25\text{m/s}$

Спољашње оптерећење

Тежина конструкције је срачуната према датим димензијама и запреминској тежини бетона. Такође је претпостављено површинско оптерећење $q = 7\text{ kN/m}^2$, које делује на целој површини обе кружне плоче платформе (оптерећење представља додатно стално и повремено оптерећење). При прорачуну тежине спољашњег зида галерије између две кружне плоче, узето је да је 75% површине од стакла, тежине 2 kN/m^2 .



Слика 1- Диспозиција конструкције ТВ торња

3. АНАЛИЗА ДЕЈСТВА ВЕТРА

Улазни подаци

Основна брзина ветра: $\mathcal{G}_b = 25 \text{ m/s}$

Субурбан, релативно раван терен у близини шуме и села: III категорија терена
 $z_0 = 0.3 \text{ m}$ $z_{0,II} = 0.05 \text{ m}$ $z_{\min} = 5 \text{ m}$ $z_{\max} = 200 \text{ m}$ (Table 4.1, EN 1991 -1 -4)

Терен без брда и гребена у непосредној близини: $C_0 = 1$

Брзина и притисак ветра

Фактор терена:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left(\frac{0.3}{0.05} \right)^{0.07} = 0.21539 \quad (1)$$

Коефицијент храпавости терена:

$$C_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)^{0.07} \quad \text{за } z_{\min} < z < z_{\max} \quad (2)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \quad \text{за } z \leq z_{\min}$$

Средња брзина ветра:

$$\mathcal{G}_m(z) = C_r(z) \cdot C_0 \cdot \mathcal{G}_b \quad (3)$$

Основни притисак услед ветра:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot \mathcal{G}_b^2 = \frac{1}{2} 1.25 \cdot 25^2 = 390.625 \text{ N/m}^2 \quad (4)$$

Интензитет турбуленције:

$$I_v(z) = \frac{k_l}{C_0 \cdot \ln(z/z_0)} = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad \text{за } z_{\min} < z < z_{\max} \quad (5)$$

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z_{\min}/z_0)} \quad \text{за } z \leq z_{\min}$$

Ударни притисак ветра

$$q_p = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho \cdot \mathcal{G}_m^2(z) \quad (6)$$

Коефицијенти силе

Приликом одређивања коефицијената силе, извршена је декомпозиција конструкције на три релевантна дела, ради боље апроксимације дејства ветра на конструкцију променљиве геометрије.

Цилиндар I,

$$z_e = 80 \text{ m} \quad d = 1 \text{ m} \quad b = 8 \text{ m}$$

$\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ - кинематичка вискозност ваздуха

$$C_r = 1.203 \quad \mathcal{G}_m = 30.076 \text{ m/s} \quad I_v = 0.179 \quad q_p = 1227.8 \text{ N/m}^2$$

$$g(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} = 44.32 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{b \cdot g(z_e)}{\nu} = 23.639 \cdot 10^6 \text{ - Рејнолдсов број} \quad (8)$$

Облога: груби бетон $k = 1$

$$\frac{k}{b} = 0.125 \cdot 10^{-3} \quad A_{ref} = 8 \cdot 80 = 640 \text{ m}^2$$

$$C_{f,0} = 1.2 + \frac{0.18 \log(10 k/b)}{1 + 0.4 \log(R_e/10^5)} = 0.9319 \quad (9)$$

$$\lambda = 0.7 \frac{l}{b} = 7 \leq 70 \text{ - ефективна виткост} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = 1 \quad (11)$$

$$\psi_\lambda = 0.68$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0.634 \quad (12)$$

Платформа ,

$$z_e = 102 \text{ m} \quad d = 1 \text{ m} \quad b_{sr} = 6 \text{ m}$$

$\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ - кинематичка вискозност ваздуха

$$C_r = 1.255 \quad g_m = 31.39 \text{ m/s} \quad I_v = 0.1716 \quad q_p = 1355.35 \text{ N/m}^2$$

$$g(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} = 46.57 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{b \cdot g(z_e)}{\nu} = 1117.626 \text{ - Рејнолдсов број} \quad (8)$$

Облога: стакло $k = 0.0015$

$$\frac{k}{b} = 5 \cdot 10^{-8} \quad A_{ref} = 8 \cdot 30 + \frac{30+8}{2} \cdot 10 + \frac{30+4}{2} \cdot 4 = 498 \text{ m}^2$$

$$C_{f,0} = 1.2$$

$$\lambda = 0.7 \frac{l}{b} = 0.7 \frac{22}{6} = 2.656 \leq 70 \text{ - ефективна vitkost} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = 1 \quad (11)$$

$$\psi_\lambda = 0.64$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0.768 \quad (12)$$

Цилиндар II ,

$$z_e = 127 \text{ m} \quad d = 0.5 \text{ m} \quad b = 4 \text{ m}$$

$\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ - кинематичка вискозност ваздуха

$$C_r = 1.308 \quad g_m = 32.58 \text{ m/s} \quad I_v = 0.165 \quad q_p = 1428.58 \text{ N/m}^2$$

$$g(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} = 47.81 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{b \cdot g(z_e)}{\nu} = 12.75 \cdot 10^6 \text{ - Рејнолдсоов број} \quad (8)$$

Облога: груби бетон $k = 1$

$$\frac{k}{b} = 0.25 \cdot 10^{-3} \quad A_{ref} = 4 \cdot 25 = 100 \text{ m}^2$$

$$C_{f,0} = 1.2 + \frac{0.18 \log(10k/b)}{1 + 0.4 \log(R_e/10^5)} = 0.875 \quad (9)$$

$$\lambda = 0.7 \frac{l}{b} = 0.7 \frac{25}{4} = 4.375 \leq 70 \text{ - еффекивнвнкост} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = 1 \quad (11)$$

$$\psi_\lambda = 0.655$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0.573 \quad (12)$$

Коефицијент конструкције - $C_s C_a$

Приликом одређивања овог коефицијента, коришћене су препоруке из СРПС ЕН 1991-1-4, прилог Б. Као референтна висина z_e је усвојена висинска ката положаја тежишта платформе, што је у аналогији са конструкцијама у облику знакова. При даљој анализи коришћени су параметри ветра за референтну висину $z_e = 91.684\text{m}$, док је при одређивању вредности Рејнолдсоовог броја, објекат апроксимиран цилиндром висине 127м и пречника 8м.

$$z_e = 91.684 \text{ m} \quad d = 1 \text{ m} \quad b = 8 \text{ m}$$

$\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ - кинематичка вискозност ваздуха

$$C_r = 1.233 \quad g_m = 30.813 \text{ m/s} \quad I_v = 0.175 \quad q_p = 1319.31 \text{ N/m}^2$$

$$g(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} = 45.944 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{b \cdot g(z_e)}{\nu} = 24.5 \cdot 10^6 \text{ - Рејнолдсов број} \quad (8)$$

Коефицијент изворног дејства - B^2

Реални објекат, укупне референтне површине $A_{ref} = 1238\text{m}^2$ се апроксимира цилиндром висине 127м и пречника 8м приликом одређивања R_e .

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha = 186.45 \quad \text{за } z_{\min} \leq z \quad (13)$$

где је:

$L_t = 300\text{m}$ – референтна дужина скале

$z_t = 200\text{m}$ – референтна висина

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \ln(z_0) = 0.610$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{bh}{L(z_s)} \right)^{0.63}} = 0.577 \quad (14)$$

Коефицијент резонантног одговора - R^2

Природна фреквенција објекта за први тон осциловања, коришћена при одређивању коефицијента резонантног одговора R^2 , добијена је коришћењем програмског пакета TOWER 6 и износи $n_{1,x} = 0.3916\text{Hz}$. Еквивалентна маса по јединици дужине торња, апроксимира се масом по јединици дужине горње трећине торња, која износи $m_e = 53.71 \text{ t/m}$.

$$f_L(z_e, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_e)}{g_m(z_e)} = 2.37 \quad (15)$$

$$S_L(z, n_{1,x}) = \frac{6.8 f_L(z_e, n_{1,x})}{(1 + 10.2 f_L(z_e, n_{1,x}))^{5/3}} = 0.075 \quad (16)$$

$$\eta_b = \frac{4.6b}{L(z_e)} f_L(z_e, n_{1,x}) = 0.468 \quad (17)$$

$$\eta_h = \frac{4.6h}{L(z_e)} f_L(z_e, n_{1,x}) = 7.425 \quad (18)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) = 0.749 \quad (19)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) = 0.126 \quad (20)$$

Приликом одређивања коефицијента конструкције $C_s C_d$ треба узети и обзир пригушење преко логаритамског декрамент пригушења:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0.1048 \quad (21)$$

Где је:

$\delta_s = 0.1$ – структурални логаритамски декремент пригушења)

$$\delta_a = \frac{C_f \rho \cdot b \cdot g_m(z_e)}{2n_{1,x} m_e} = 0.0048 \text{ – аеродинамички логаритамски декремент (22)}$$

пригушења, при чему је $C_f = 0.651$

$\delta_d = 0$ – логаритамски декремент пригушења услед постојања различитих уређаја за пригушење (дампери).

Нешто несекономичније решење ће се добити уколико се усвоји да је аеродинамички декрамент пригушења δ_a једнак 0, али се тиме избегавају многобројне несигурности при одређивању овог феномена.

Вредност резонантног фактора R^2 се рачуна као:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) = 0.330 \quad (23)$$

Коначно, коефицијент конструкције се израчунава као:

$$C_s C_d = \frac{1 + 2k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_e)} = 0.950 \quad (24)$$

Где је:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(v \cdot T)}} = 3.338 - \text{ударни коефицијент} \quad (25)$$

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{R^2 + B^2}} = 0.236 \text{ Hz} > 0.08 \text{ Hz} - \text{учесталост прекорачења} \quad (26)$$

$T = 600\text{s}$ – период осредњавања средње брзине

Силе услед ветра

Сходно претходној подели конструкције на целине приликом одређивања коефицијената силе, јавиће се и три концентрисане силе услед ветра које делују на одговарајућим референтним висинама z_e . Свака од концентрисаних сила услед ветра се рачуна на следећи начин:

$$F_w = C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}} \quad (27)$$

Целине	z_e [m]	$C_s C_d$ [1]	C_f [1]	$q_p(z_e)$ [N/m ²]	A_{ref} [m ²]	F_w [kN]
Цилиндар I	80	0.950	0.634	1227.8	640	473.282
Платформа	102		0.768	1355.35	498	492.45
Цилиндар II	127		1.308	1428.58	100	177.52

4. УТИЦАЈИ У КОНСТРУКЦИЈИ

Помоћу програмско пакета TOWER 6 добијени су следећи максимални утицаји:

максимално померање (врха) торња: $u_{\text{max}} = 11.53\text{cm}$

максимални моменат: $\max M_y = 110614.94 \text{ kNm}$

Пошто се максимални моменат јавља при дну торња, максимални напон услед дејства ветра ће бити:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{\max M_y}{I_y} \cdot y_{\text{max}} = \frac{110614.94}{\frac{1}{4}\pi(4^4 - 3^4)} \cdot 4 = 805.8 \text{ kN/m}^2 = 0.8058 \text{ MPa} \quad (28)$$

5. ЗАКЉУЧАК

Анализа дејства ветра на конструкције, у домену аероеластичности, представља комплексан задатак, који зависи од више параметара. Поред параметара околине, и

саме природе струјања ваздуха, у обзир се мора узети и еластично понашање конструкције и њене динамичке карактеристике, при осцилацијама побуђеним стохастичним дејством ветра.

СРПС ЕН 1991-1-4 даје довољно тачне и прецизне поступке за одређивање замењујућих сила услед ветра за различите типове конструкција, произвољних облика. Могућности примене ових процедура на конструкцијама сложених облика, леже у могућности расчлањавања конструкције на елементарне делове и површине, за које су дефинисане процедуре у *СРПС ЕН 1991-1-4*. Међутим, анализа аероеластичног понашања конструкције намеће потребу разматрања конструкције као целине, чиме се налази на потешкоће код анализе конструкција сложених облика, који нису директно дефинисани у *СРПС ЕН 1991-1-4*. Конкретно за дефинисање коефицијента конструкције $C_s C_d$ и параметара конструкције који фигуришу у њему, попут Рејнолдсовог броја, Морају се извршити одређене апроксимације самог модела конструкције, како би одговарао понуђеним моделима и процедурама. Сама тачност и поузданост апроксимација зависи од стручности самог пројектанта и његовог искуства у анализи оваквих конструкција.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SRPS EN 1991-1-4, *Eurocode 1: Action on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions (2005)*.
- [2] *Guide to use of EN 1991-1-4*, Department of Communities and Local Government: London, September 2006.
- [3] N.Cook, *Designers' Guide to EN 1991-1-4. Eurocode 1: Action on structures. Wind actions (2007)*.
- [4] C.Sigmund, *Worked examples in accordance with European Standards CEN/TC 250 and Structural Eurocodes (EN 1990/EN 1991)(2014)*.

WIND LOAD ANALYSIS OF CYLINDRICAL TV TOWERN BY EUROCODE

Summary: *Procedures of determining the wind load effects are defined by EN 1991-4 for different types of structures. In this paper at the example of TV tower, with cylindrical cross-section, variable by height, will be given a detailed calculation of wind loads effects in these structures with reference to eventually issues in the recommendations given by SRPS EN 1991-4 as well as the approximations necessary for the implementation of those recommendations and procedures..*

Keywords: *Wind loads, wind velocity, force coefficient, dumping.*