

Zoran MIŠKOVIĆ ¹
Marko POPOVIĆ ²
Ljiljana MIŠKOVIĆ ³

EKSPERIMENTALNO-NUMERIČKA ANALIZA OSETLJIVOSTI VISOKOG DIMNJAKA NA POBUDU VETROM

Rezime: Rad prikazuje eksperimentalno-numeričku analizu osetljivosti konstrukcije rekonstruisanog visokog dimnjaka na pobudu vetrom. Eksperimentalno istraživanje je uključilo ambijentalno merenje vibracija na više nivoa po visini konstrukcije sa odgovarajućom analizom u cilju određivanja sopstvenih frekvencija i tonova oscilovanja. Numeričkom analizom formiran je model konstrukcije, koji je ponderisan na osnovu eksperimentalnih rezultata. Primenom numeričkog modela, shodno aktuelnim preporukama i standardima, sprovedena je detaljna analiza osetljivosti konstrukcije objekta na uticaj vetra.

Ključne reči: Visoki objekti, uticaj vetra, ambijentalne vibracije, numerička analiza

EXPERIMENTAL-NUMERICAL ANALYSIS OF HIGH CHIMNEY SENSITIVITY ON WIND EXCITATION

Abstract: The paper presents experimental-numerical analysis of sensitivity of reconstructed high steel chimney on wind excitation. Experimental investigations included ambient vibration measurements of accelerations at different levels with corresponding extraction of modal frequencies and shapes. Detailed structural numerical model is created and tuned based on experimentally determined dynamic properties of the structure. Using developed numerical model, tuned based on experimental results, carried out analysis of structural sensitivity on wind influence according to actual regulations and recommendations.

Key words: High structures, wind excitation, ambient vibrations, numerical analysis

¹ V.prof. dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija, e-mail: zoran.miskovic@gmail.com

² Str.saradnik, dipl.građ.inž. - master, Institut za ispitivanje materijala IMS a.d., Bulevar Vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija, e-mail: mare381@gmail.com

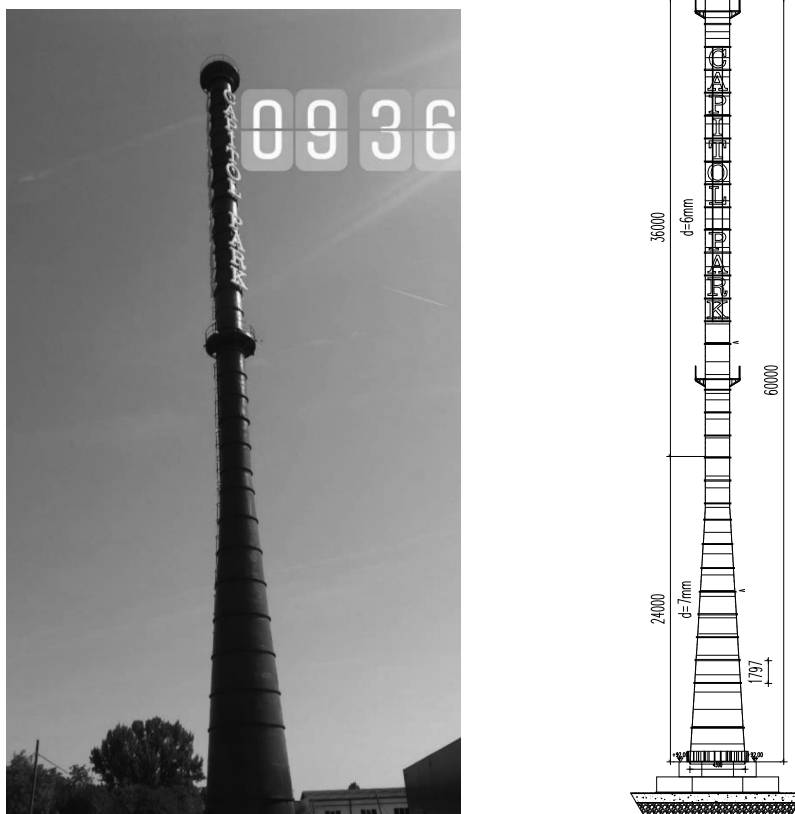
³ Direktor zavoda za konstrukcije dipl.građ.inž., Saobraćajni institut CIP d.o.o., Nemanjina 6/IV, 11000 Beograd, Srbija, e-mail: miskoviclj@sicip.co.rs

1. UVOD

Konstrukcije dimljaka, posebno u slučajevima kada njihova visina prelazi 50m, spadaju u objekte osetljive na dejstvo vetra. Isto se manifestuje značajnim pomeranjima usled dejstva vetra, kako u pravcu delovanja vetra tako i upravno na pravac delovanja vetra. Iz navedenog razloga, neophodna je provera stabilnosti dimljaka usled ovih, praktično glavnih opterećenja za stabilnost ovakvih konstrukcija. Važećom tehničkom regulativom zahteva se kao obavezna provera stabilnosti i stanja upotrebljivosti ovakvih konstrukcija, [4,5].

Eksperimentalno numerička analiza sprovedena je za dimljak visine $H=60\text{m}$, koji je premešten na lokaciju blisku gde je bio originalno izgrađen na teritoriji Beograda. Nova namena dimljaka je za reklamne svrhe u okviru kompleksa *CAPITOL PARK* u Beogradu. Na slici 1 prikazana je fotografija i dispozicija konstrukcije dimljaka sa reklamnim natpisom.

Prikazano istraživanje je sprovedeno iz razloga što su se pojavile indicije na osetljivost konstrukcije objekta na pobudu vetrom.



Slika 1 – Izgled i dispozicija dimljaka visine $H=60\text{m}$

2. OPIS KONSTRUKCIJE ČELIČNOG DIMLJAKA

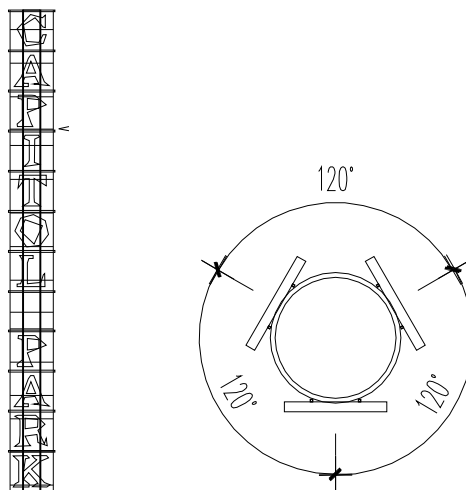
Tokom premeštanja dimljaka na novu, blisku, lokaciju, s obzirom na nepotrebnost unutrašnjeg plašta, isti je uklonjen. Nova konstrukcija dimljaka se sastoji samo od čeličnog lima, koji je u donjem delu promenljivog kružnog poprečnog preseka prečnika 4300-1900mm do visine 24.0m, pri čemu debljina lima kružnog poprečnog preseka iznosi $t=7.0\text{mm}$. U

gornjem delu, konstrukcija dimljaka je konstantnog kružnog poprečnog preseka prečnika 1900mm i debljine lima 6mm.

Po celoj visini dimljaka, postavljena su horizontalna ukrućenja na približno ekvidistantnim odstojanjima od cca 1800mm, koja su izrađena od ugaonika L 80x80x8.

Na dva nivoa, na visini od cca 30m i pri vrhu dimljaka izvedene su revizione platforme oko dimljaka od L profila.

Takodje, u reklamne svrhe, u tri ravni pod uglovima od 120°, postavljeni su reklamni natpisi *CAPITOL PARK* u zoni od visine 35.0 – 56.0m, na dužini od cca 21.0m, slika 2.



Slika 2 – Dispozicija reklamnih natpisa postavljenih na dimljaku

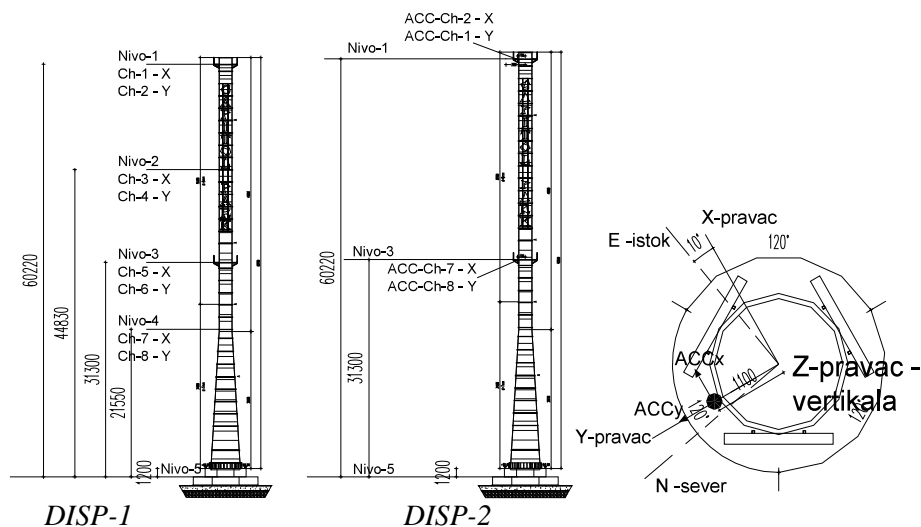
3. AMBIJENTALNA MERENJA VIBRACIJA NA KONSTRUKCIJI

Eksperimentalno istraživanje odgovora konstrukcije dimljaka u uslovima ambijentalne pobude, uglavnom vetrom, sprovedena su u dva navrata sa dve različite dispozicije mernih mesta, DISP-1 i DISP-2.

Na slici 3 prikazane su dispozicije sprovedenih ambijentalnih merenja vibracija konstrukcije.

U prvom navratu, prema dispoziciji DISP-1, merenja su vršena na četiri nivoa u dva horizontalna pravca. Orijehtacija mernih pravaca je praktično odgovarala pravcima N-S (sever-jug) odnosno E-W (istok – zapad).

U drugom navratu, prema dispoziciji DISP-2, merenja su vršena na dva nivoa, takođe u dva horizontalna pravca na svakom nivou, pri čemu je orijentacija mernih pravaca bila ista kao i pri prvom merenju prema dispoziciji DISP-1, koja su praktično odgovarala pravcima N-S (sever-jug) odnosno E-W (istok – zapad), slika 3.



Slika 3 – Dispozicije merenja ambijentalnih vibracija na konstrukciji dimljaka i orijentacija senzora

Tokom oba merenja ambijentalnih vibracija registrovanje ubrzanja na svim mernim mestima vršeno je analognim akcelerometrima SiliconDesign Model 2140 proizvođača *Silicondesing*, opsega merenja ubrzanja $\pm 2g$ i osetljivosti $2V/g$. Konverzija analognog izlaza iz akcelerometra i automatska akvizicija podataka vršena je 24-bitnim mernim sistemom *QUANTUM* Hottinger-Baldwin-Messtechnik, čime je ostvarena rezolucija registrovanja ubrzanja 0.0001 m/s^2 .

U cilju obezbeđenja uslova za precizno određivanje modova sopstvenih oscilacija konstrukcije, prilikom prvog merenja prema DISP-1, akvizicija je vršena frekvencijom uzorkovanja $f_s = 600 \text{ Hz}$ tokom vremena od cca 2 časa (7200 sec). Prilikom drugog merenja registrovanje ubrzanja je vršeno tokom 1 časa, tj. tokom 3600 sec, što je takođe dovoljno za dobijanje kvalitetnih rezultata.

Tabela 1 - Sopstvene frekvencije određene na osnovu merenja ambijentalnih vibracija

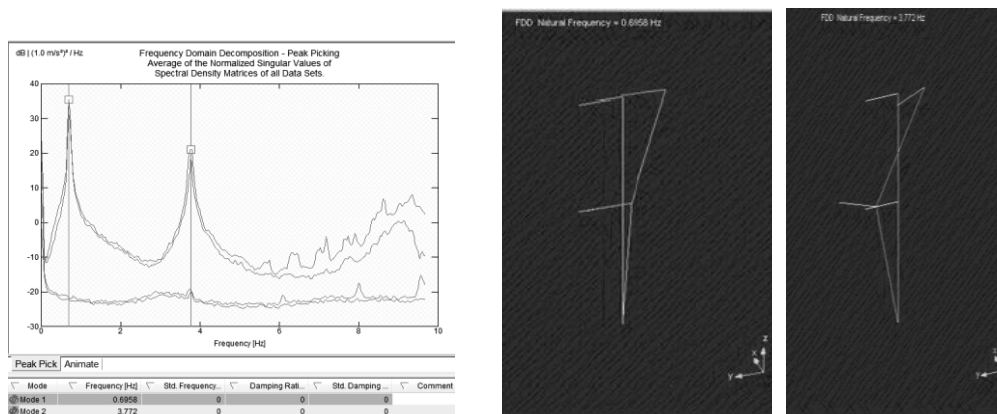
Dispozicija merenja	Sopstvena frekvencija (Hz)	
	I-ton	II-ton
DISP-1	0.714	3.745
DISP-2	0.696	3.774

Ekstrakcija modalnih frekvencija i oblika sprovedena je primenom softverskog paketa za analizu ambijentalnih merenja ARTeMIS [1]. U tabeli 1 prikazane su određene frekvencije na osnovu sprovedenih merenja koje odgovaraju I i II tonu sopstvenih oscilacija.



Slika 4 – Sopstveni modovi određeni na osnovu merenja prema DISP-1 ambijentalnih merenja ubrzanja na konstrukciji dimnjaka

Na slici 4 prikazani su određeni modovi sopstvenih oscilacija I i II tona na osnovu sprovedene procedure ekstrakcije modalnih oblika na osnovu merenja prema DISP-1, dok su na slici 5 prikazani određeni modovi na osnovu merenja prema DISP-2, sa odgovarajućim matricama spektralne gustine.



Slika 5 – Matrice spektralne gustine i oblici oscilovanja I i II tona određeni na osnovu merenja ambijentalnih vibracija prema DISP-2

4. NUMERIČKI PRORAČUN

Numeričim proračunom je sprovedena je analiza uticaja vetra na konstrukciju dimljaka prema *Evrokodu* [4,5] sa ciljem da se sagleda osetljivost konstrukcije na pobudu vetrom, uzimajući u obzir eksperimentalne rezultate, a primenom proračuna shodno aktuelnoj tehničkoj regulativi.

Ulazni podaci za proračun, tj. karakteristike konstrukcije su:

- visina dimnjaka - 60 m;
- prečnik dimnjaka - promenljiv do visine 20.3 m od $D = 4.3 \text{ m} - 1.9 \text{ m}$, a iznad pa do vrha prečnik je konstantan $D=1.9 \text{ m}$;
- masa dimnjaka - $M=28090 \text{ kg}$ (određena na osnovu numeričkog modela) ;

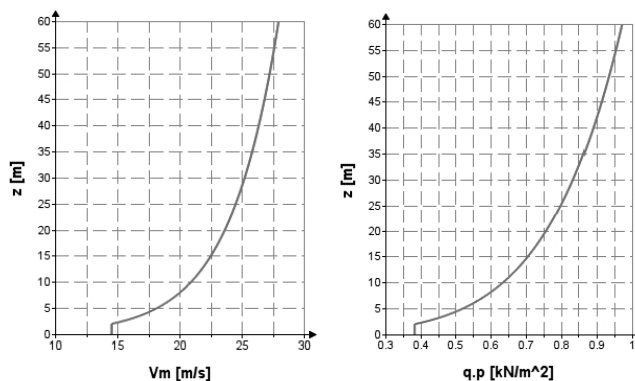
- sopstvena frekvencija I-tona oscilovanja: $f_1=0.70$ Hz, shodno frekvenciji koja je određena eksperimentalnom analizom.

U skladu sa lokacijom dimnjaka - Rakovica - Beograd, a na osnovu *Nacionalnog aneksa* [5], usvojena je fundamentalna vrednost osnovne brzina vetra $V_{b,0} = 21$ m/s. Fundamentalna vrednost osnovne brzine vetra je nezavisna od pravca vetra i doba godine. Ovi uticaji se uzimaju u obzir uvođenjem koeficijenata: C_{dir} - pravca i C_{season} - sezonskog delovanja, a za preporučenu vrednost oba koeficijenta usvojena je vrednost 1.0, a shodno tome osnovna brzina vetra iznosi $V_b = 21$ m/s.

Promena srednje brzine vetra V_m po visini objekta z , uslovljena je hrapavošću i topografijom terena prema tački 4.3.1 [4], i određena je sa (1).

$$V_m(z) = C_r C_0 V_b \quad (1)$$

Koeficijent hrapavosti je promenljiv po visini $C_r = C_r(z)$ i zavisi od kategorije terena, koji se u zoni objekta može okarakterisati kao "teren kategorije II", sa "niskom vegetacijom... i usamljenim preprekama... od najmanje 20 visina prepreka" shodno [4]. Za koeficijent topografije usvojena je preporučena vrednost $C_0 = 1.0$ prema tački A.3(4) [4].



Slika 6 – Promena srednje brzine vetra V_m i udarnog pritiska vetra q_p u zavisnosti od visine z

Udarni pritisak vetra q_p na visini z uključuje fluktuacije srednje i kratkotrajne brzine, a dobija se množenjem osnovnog pritiska vetra $q_b(z)$ prema tački 4.5 [4], i dat je izrazom (2).

$$q_p(z) = 0.5 (1 + 7 I_v(z)) \rho V_m^2(z) \quad (2)$$

Sem prirode vetra (pravac, brzina) i terena u okolini objekta (topografija, hrapavost), na opterećenje vetrom utiču i osobine same konstrukcije. S tim u vezi, vrednost udarnog pritiska vetra koriguje se koeficijentom konstrukcije – $C_s C_d$, koji se sastoji iz dva dela, prema [2]. Koeficijent dimenzije (veličine) C_s uzima u obzir smanjenje uticaja usled neistovremene pojave udarnih pritisaka vetra na površinu, dok dinamički koeficijent C_d uključuje povećanje uticaja usled oscilacija izazvanim turbulencijom u rezonanciji sa konstrukcijom. Koeficijent dimenzije opada sa povećanjem veličine konstrukcije i ima vrednost $C_s \leq 1$, a koeficijent C_d uzima u obzir osetljivost konstrukcije na dinamičke uticaje i ima vrednosti $C_d \geq 1$, prema [4].

Prema [4] tačka 6.2 - SRPS EN 1991-1-4, definisan je odabir postupka proračuna $C_s C_d$, pa se tako za razmatranu konstrukciju dimnjaka visine $H=60\text{m}$, sa odnosom visine i prečnika $H/D=31.6 > 6.5$, koeficijent konstrukcije mora se određivati prema tzv. "detaljnem postupku". Postupak se može sprovesti na dva načina, a preporučeni je prikazan u aneksu B [4]. Prema nacionalnim aneksu [5] tačka 2.14, koeficijent konstrukcije $C_s C_d$ nije potrebno razdvajati na C_s i C_d . Ne ulazeći u detalje zbog ograničenog prostora, proizvod ovih koeficijenata dat je sa (3).

$$C_s C_d = \frac{1+2 k_p I_p(z_s) \sqrt{R^2+B^2}}{1+7 I_p(z)} = 0,994 \quad (3)$$

Koeficijent sile za kružni cilindar konačne dužine C_f dobija se množenjem dva koeficijenta – $C_{f,0}$ koji zavisi od tipa površine - hrapavosti konstrukcije, kao i *Reynolds*-ovog broja Re , dok koeficijent uticaja kraja ψ_λ , zavisi od vitkosti konstrukcije, i koeficijent sile je izražen sa (4).

$$C_f = C_{f,0} \psi_\lambda = 0.635 \quad (4)$$

Konačno, opterećenje u pravcu vetra određeno je prema izrazu (5), uključujući i odgovarajuću promenu sa visinom.

$$f_w(z) = C_s C_d C_f q_p(z) b(z) \quad (5)$$

Čelični dimnjak je elastično telo oblika relativno glatkog kružnog cilindra, istog prečnika najvećim delom svoje visine. Opstrujavanjem vazduha oko kružnog cilindra pri dejstvu vetru dolazi do fenomena međusobne interakcije fluida i konstrukcije [2, 3]. Pri određenim uslovima u vrtložnom tragu iza objekta dolazi do naizmeničnog odvajanja vrtloga sa suprotnih strana konstrukcije, koje se odvija periodično. Posledica toga je pojava periodičnih dominantno horizontalnih sila upravno na pravac strujanja. Ponašanje konstrukcije pri ovoj pojavi najviše zavisi od sopstvenih frekvencija osnovnih tona oscilacija. Kako je frekvencija odvajanja vrtloga u relaciji sa brzinom vetra, to je pri određenoj – „kritičnoj“ brzini vetra V_{cr} moguće izjednačavanje sopstvene i prinudne frekvencije. Ovaj efekat je karakterističan za izrazito vitke konstrukcije kružnog poprečnog preseka a malog prigušenja, poput čeličnih dimnjaka. *Strouhal*-ova relacija izražava vezu dominantne frekvencije odvajanja vrtloga i osrednjene brzine strujanja fluida, a koeficijent proporcionalnosti S_f se naziva *Strouhal*-ov broj, koji za kružni cilindar iznosi $S_f=0.18$. Izjednačavajući prinudne frekvencije pobude sa frekvencijom osnovnog tona dimnjaka, dobijamo izraz za kritičnu brzinu (6).

$$V_{cr} = \frac{f_1 D}{S_f} = 7.39 \frac{m}{s} \quad (6)$$

Osetljivost konstrukcije na vibracije zavisi od prigušenja konstrukcije i odnosa mase konstrukcije i mase fluida. *Skraton*-ov broj je bezdimenzioni parametar koji sadrži prigušenje konstrukcije izraženo preko logaritamskog dekrementa – δ_s , ekvivalentne mase razmatranog I-tona – m_e , gustine vazduha – ρ i referentne širine poprečnog preseka u kojem nastaje rezonantno odvajanje vrtloga – D , i određen je sa (7).

$$S_c = \frac{2 \delta_s m_e}{\rho D^2} = 1.817 \quad (7)$$

Amplituda oscilacija je obrnuto proporcionalna *Skraton*-ovom broju. Povećanjem mase i prigušenja dimnjaka raste S_c , samim tim amplitude opadaju. Sa druge strane, povećanjem prečnika u zoni odvajanja vrtloga, *Skraton*-ov broj opada, a amplituda oscilacija konstrukcije raste.

Koeficijent oblika tona oscilovanja K , tačka E.1.5.2.5 [4], sračunat je na osnovu oblika I-ona oscilovanja $\Phi_l(z)$ dobijenog iz modela konstrukcije koji je ponderisan na osnovu eksperimentalnih podataka i iznosi $K = 0.126$.

Sila usled odvajanja vrtloga nije jednakopodeljena duž ose cilindra [3], a proračunski model u Evrokodu predviđa aproksimaciju – jednakopodeljeno opterećenje na dužini korelacije L_j . Za razmatrani osnovni ton konzole, L_j se meri od vrha konstrukcije.

Koeficijent efektivne dužine korelacije K_w zavisi od odnosa dužine korelacije, referentne širine dimnjaka i vitkosti, prema tabeli E.5 [4], i određen je sa (8).

$$K_w = 3 \frac{L_j/D}{H/D} \left(1 - \frac{L_j/D}{H/D} + \frac{1}{3} \left(\frac{L_j/D}{H/D} \right)^2 \right) = 0.569 \quad (8)$$

Dejstvo odvajanja vrtloga na kružni cilindar zavisi od *Reynolds*-ovog broja R_e , pri kritičnoj brzini vetra, a u ovom slučaju razmatranog I-ona shodno tački E.1.3.4 [4], i određen je sa (9).

$$R_e(V_{cr}) = D \frac{V_{cr}}{\nu} = 9.36 * 10^5 \quad (9)$$

Osnovna vrednost koeficijenta bočne sile u funkciji $R_e(V_{cr})$ prikazana je u [4] na slici E.2, te je $c_{lat,0}=0.2$, a korekcijom ove vrednosti, u zavisnosti od odnosa kritične brzine V_{cr} i srednje brzine u visini sredine dužine korelacije V_{m,L_j} dobija se vrednost koeficijenta bočne sile c_{lat} , pa je usvojena vrednost $c_{lat} = c_{lat,0}=0.2$, shodno tabeli E.3 [4].

Na osnovu navedenih parametara, određena je amplituda vibracija upravno na pravac vetra, shodno tački E.1.5.2 [4], i određena je sa (10).

$$y_{F,max} = D \frac{1}{S_t^2} \frac{1}{S_c} K K_w L_j c_{lat} = 0.46 \text{ m} \quad (10)$$

Imajući u vidu da parametar L_j , a samim tim i K_w , V_{m,L_j} i c_{lat} , zavise od odnosa amplitude vibracija i prečnika dimnjaka, to se vrednost $y_{f,max}$ dobija iterativnim postupkom. Na osnovu ovog proračuna određena je amplituda $y_{F,max}/D = 0.24$.

Opterećenje usled dejstva odvajanja vrtloga, koje deluje u ravni upravnoj na pravac vetra na efektivnoj dužini korelacije, a istovremeno sa opterećenjem u pravcu vetra, prema tački E.1.4. [4] određeno je sa (11).

$$F_{w,s} = m_e (2\pi f_1)^2 1 y_{F,max} = 3.06 \frac{kN}{m} \quad (11)$$

Prezentovan proračun sproveden je uzimajući vrednost *Strouhal*-ovog broja za gladak kružni cilindar $S_t=0.18$ prema tabeli E.1 [4]. Dodavanje reklamnih slova značajno utiče na aerodinamičke karakteristike dimnjaka, odnosno obara vrednost *Strouhal*-ovog broja, a stvarna vrednost se može ustanoviti isključivo eksperimentalnim putem.

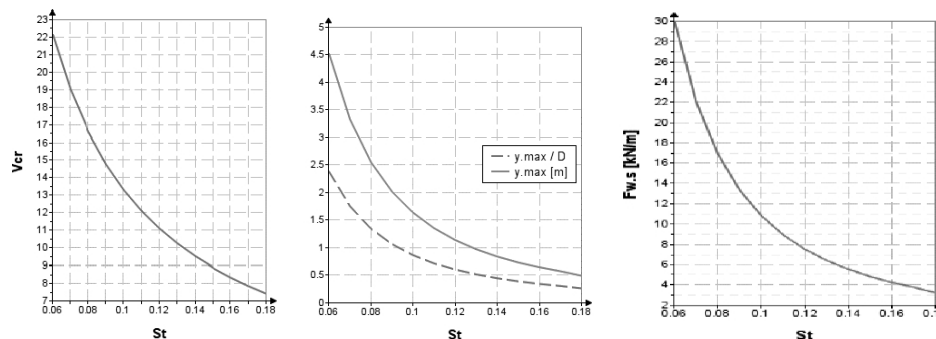
Sa smanjenjem *Strouhal*-ovog broja kritična brzina V_{cr} raste, a opterećenje i amplituda vibracija upravno na pravac vetra značajno rastu. Primera radi, upoređene su vrednosti parametara za nekoliko vrednosti S_t , kako je prikazano u Tabeli 2.

Tabela 2 – Proračunski parametri za različite vrednosti *Strouhal*-ovog broja

S_t	V_{cr} [m/s]	L_1 [m]	$y_{F,max} / D$	$y_{F,max}$ [m]	$F_{w,s}$ [kN/m]
0.18	7.39	13.22	0.25	0.46	3.19
0.16	8.31	12.77	0.34	0.64	4.21
0.14	9.50	12.31	0.44	0.83	5.50
0.12	11.08	11.86	0.60	1.13	7.49
0.10	13.30	11.4	0.86	1.63	10.78
0.08	16.63	11.4	1.34	2.55	16.85

5. ZAKLJUČAK

Prikazana analiza osetljivosti visokog dimljaka na dejstvo vetra ukazuje neophodnost poznavanja preciznih modalnih parametara koji su ulazni podaci za sprovođenje numeričkih proračuna. U prvom redu to podrazumeva poznavanje nekoliko prvih modalnih frekvencija i formi, a koje je precizno moguće odrediti jedino eksperimentalnim putem. Savremeni merni instrumenti omogućuju sprovođenje merenja tzv. *ambijentalnih vibracija* vrlo niskog nivoa, na osnovu kojih je primenom modernih alata za ekstrakciju modalnih karakteristika moguće dobiti pouzdane dinamičke karakteristike konstrukcije. Koristeći ovakve precizne podatke, moguće je ponderisati numrički model konstrukcije i dobiti adekvatne potrebne podatke za sprovođenje proračuna (modalnu masu, krutost, ...).



Slika 7 – Promena kritične brzine odvajanja vrtloga V_{cr} , parametara konstrukcijskog odgovora $y_{F,max}$ odnosno $y_{F,max} / D$ i odgovarajućeg proračunskog opterećenja $F_{w,s}$ sa promenom *Strouhal*-ovog broja

Nadalje, prilikom sprovođenja numeričkih provera, kao jedan od ključnih parametara za procenu osetljivosti konstrukcije na dejstvo vetra su uslovi opstrujavanja i odvajanja vrtloga koji za posledicu imaju oscilacije upravo na pravac dejstva vetra. Ovaj fenomen izražen je tzv. *Strouhal*-ovim brojem, pri čemu se u literaturi mogu naći vrednosti/preporuke za manji broj oblika konstrukcije. Samo u retkim situacijama se vrši njegovo eksperimentalno određivanje, a za slučajeve izuzetno visokih i/ili značajnih objekata. Stoga, prilikom analize osetljivosti visokih objekata na dejstvo vetra treba dobro proceniti opseg mogućih vrednosti ovog parametra, jer vrlo značajno utiče na konstrukcijski odgovor usled dinamičkog uticaja

vetra. Na slici 7 prikazane su promene kritične brzine odvajanja vrtloga, maksimalnog pomeranja i opterećenja pri varijaciji *Strouhal*-ovog broja, koji nije najpouzdaniji podatak u slučaju analiziranog dimljaka cilindričnog oblika sa dodatim reklamnim natpisima. Takođe, treba napomenuti da do odvajanja vrtloga može doći i pri brzinama znatno manjim od projektnih maksimalnih, što ukazuje na znatno veću mogućnost pojave ovakvih brzina u eksploataciji.

6. LITERATURA

- [1] ARTEMIS EXTRACTOR – www.svibs.com
- [2] Bojović, A., (1993.): *Proračun opterećenja vetrom građevinskih konstrukcija*, Beograd: Građevinska knjiga.
- [3] Sockel, H. (1994): *Wind-Excited Vibrations of Structures*, Wien: Springer.
- [4] SRPS EN 1991-1-4:2012: *Evrokod 1 – Dejstva na konstrukcije - Deo 1-4: Opšta dejstva – Dejstva vetra*
- [5] SRPS EN 1991-1-4/NA:2017: *Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije - Deo 1-4: Opšta dejstva – Dejstva vetra – Nacionalni aneks*