

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE 8. PREDAVANJE

Čelični tornjevi, jarboli, dimnjaci - projektiranje

ČELIČNI TORNJEVI, JARBOLI SADRŽAJ PREDAVANJA (1.dio)

- Tornjevi i jarboli (EN 1993-3-1)
 - Osnove projektiranja
 - Trajnost
 - Proračun konstrukcije
 - Parcijalni faktori za GSN
 - Spojevi
 - Podjela prema pouzdanosti
 - Parcijalni koeficijenti za djelovanja
 - Modeliranje djelovanja vjetra
 - Odgovor rešetkastih tornjeva na djelovanje vjetra
 - Odgovor jarbola pridržanih zategama na djelovanje vjetra
 - Opterećenje ledom i kombinacije leda i vjetra
 - Prigušivači zatega
 - Lom zatega
 - Izvedba
 - Izvijanje elemenata visokih stupova i tornjeva

TORNJEVI I JARBOLI

OSNOVE PROJEKTIRANJA

- Osnovni zahtjevi:
 - projektiranje čeličnih tornjeva i stupova pridržanih zategama se provodi u skladu s osnovnim pravilima navedenim u EN 1990
 - treba primijeniti i odrednice iz EN 1993-1-1
 - stupovi pridržani zategama (visoki stupovi) visoke pouzdanosti moraju se proračunati tako da izdrže pucanje jedne od zatega bez urušavanja
 - preporuča se vijek trajanja od 30 godina
- Djelovanja:
 - elementi pod kutom do 30° u odnosu na horizontalu moraju biti projektirani tako da preuzimaju težinu radnika koja se u ovom slučaju može uzeti kao koncentrirano vertikalno opterećenje od 1 kN
 - djelovanja na platforme ($2,0 \text{ kN/m}^2$) i
 - horizontalna djelovanja na ogradu ($0,5 \text{ kN/m}$) se trebaju uzeti u obzir

TORNJEVI I JARBOLI

TRAJNOST

- Zatege za pridržanje jarbola:
 - ovisno o uvjetima okoliša užad od galvaniziranog čelika se treba zaštititi
 - dodatnim slojevima masti ili boje
 - kao alternativni način zaštite, kod galvanizirane čelične užadi promjera do 20 mm se može primijeniti
 - impregnacija polipropilenom pri čemu se ne zahtijeva dodatna zaštita osim u slučaju oštećenja metalne obloge tijekom gradnje ili korištenja



TORNJEVI I JARBOLI

PRORAČUN KONSTRUKCIJE

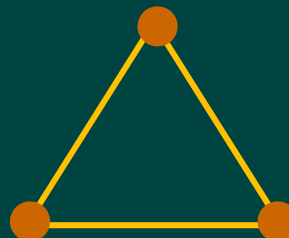
- Modeliranje za utvrđivanje posljedica djelovanja:
 - unutarnje sile i momenti imaju se odrediti koristeći elastičnu globalnu analizu
 - u proračunu se mogu koristiti značajke brutto poprečnog presjeka
 - kod proračuna treba uzeti u obzir deformacijske značajke temelja
 - ako deformacije imaju značajan utjecaj (npr. kod tornjeva s velikim opterećenjem na vrhu), potrebno je koristiti teoriju 2.reda
 - rešetkasti tornjevi se mogu u početku analizirati koristeći početnu geometriju (teorija 1.reda)
 - kod jarbola i dimnjaka pridržanih zategama potrebno je uzeti u obzir utjecaj deformacija na uvjete ravnoteže (teorija 2.reda)



TORNJEVI I JARBOLI

PRORAČUN KONSTRUKCIJE

- Modeliranje spojeva
 - Konstrukcije s trokutastim elementima (jednostavna ispuna)
 - Kod jednostavnog oblikovanja može se pretpostaviti da se u spojevima između elemenata ne javljaju momenti.
 - U globalnoj analizi se može pretpostaviti da su elementi zglobno spojeni.



TORNJEVI I JARBOLI

PARCIJALNI FAKTORI ZA GSN

Primjenjuju se sljedeći parcijalni faktori sigurnosti:

- otpornost elemenata na popuštanje: $\gamma_{M0} = 1,00$
- otpornost elemenata na izvijanje: $\gamma_{M1} = 1,00$
- otpornost netto presjeka na mjestu rupa za vijke: $\gamma_{M2} = 1,25$
- otpornost spojeva: *sljedeći slajd*
- otpornost zatega za pridržanje stupova i njihovo otkazivanje (prema EN 1993-1-11): $\gamma_{Mg} = 2,00$
- otpornost izolacijskog materijala: $\gamma_{Mi} = 2,50$

Nacionalni aneksi mogu sadržavati vrijednosti parcijalnih faktora sigurnosti. Preporučuju se vrijednosti dane narančastom bojom gore.

TORNJEVI I JARBOLI

PARCIJALNI FAKTORI ZA GSN

Primjenjuju se sljedeći parcijalni faktori sigurnosti za spojeve:

otpornost elemenata i poprečnih presjeka	γ_{M0}, γ_{M1} i γ_{M2} - prema EN 1993-1-1	
otpornost vijaka	γ_{M2}	= 1,25
otpornost zakovica		
otpornost trnova		
otpornost zavara		
otpornost ploča u ležajevima		
otpornost na proklizavanje vijaka zadovoljena za - granično stanje nosivosti - granično stanje uporabivosti	γ_{M3} $\gamma_{M3,ser}$	= 1,25 = 1,10
otpornost injektiranih vijaka	γ_{M4}	= 1,00
otpornost spojeva u šupljim elementima rešetkastog nosača	γ_{M5}	= 1,00
otpornost trnova kod graničnog stanja uporabivosti	$\gamma_{M6,ser}$	= 1,00
prednapinjanje visokovrijednih vijaka	γ_{M7}	= 1,10
otpornost betona	γ_c vidi EN 1992	

Nacionalni aneksi mogu sadržavati vrijednosti parcijalnih faktora sigurnosti. Preporučuju se vrijednosti dane narančastom bojom gore.

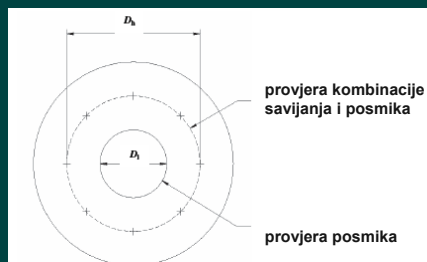
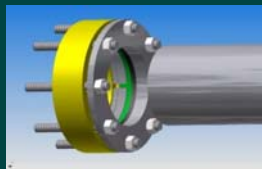
TORNJEVI I JARBOLI

SPOJEVI

- Vlačni vijci u krajnjim pločama (spojevi lamela)
 - prednapeti vijci moraju se koristiti u slučaju pojave vlaka poprijeko na spoj lamela
 - minimalni promjer vijka mora biti 12 mm
 - kod određivanja debljine lamele, za kružne šuplje presjeke, važno je sljedeće:
 - posmična otpornost lamele uzduž ruba spojenog elementa kružnog presjeka
 - otpornost lamele na kombinaciju savijanja i posmika uzduž kružnice kroz rupe vijaka; moment savijanja se može uzeti kao:

$$M = N \cdot D_b - D_1 \gamma 2$$

- N vlačna sila u pojasnom elementu
- D_b promjer kružnice kroz rupe vijaka
- D_1 promjer pojasnog elementa



TORNJEVI I JARBOLI

SPOJEVI

- Vlačni vijci u krajnjim pločama (spojevi lamela)
 - za određivanje sile u vijcima, uzdužna sila N_b iznosi:

$$N_b = \frac{N \cdot k_p}{n}$$

- n broj vijaka
- N vlačna sila u pojasnom elementu
- k_p koeficijent koji uzima u obzir proklizavanje;
 - = 1,2 za prednapete vijke;
 - = 1,8 za neprednapete vijke

- Svi vijci moraju biti prednapeti za zamor

- Spojevi zatega za pridržanje stupa

- svi spojevi zatega sa stupom ili sa temeljima trebaju omogućiti slobodnu rotaciju zatega u horizontalnom i vertikalnom smjeru



TORNJEVI I JARBOLI

PODJELA PREMA POUZDANOSTI

Razred pouzdanosti	
3	tornjevi i stupovi pridržani zategama u urbanim sredinama ili gdje će njihovo otkazivanje uzrokovati ozljede ili gubitak života; tornjevi i stupovi pridržani zategama koji se koriste za važna telekomunikacijska postrojenja; druge velike konstrukcije gdje su posljedice otkazivanja velike
2	svi tornjevi i stupovi pridržani zategama koji se ne mogu klasificirati u razred 1 ili 3
1	tornjevi i stupovi pridržani zategama izgrađeni za postrojenja bez ljudstva na otvorenom području; tornjevi i stupovi pridržani zategama čije otkazivanje vjerojatno neće uzrokovati ozljeđivanje ljudi

TORNJEVI I JARBOLI

PARCIJALNI KOEFICIJENTI ZA DJELOVANJA

Vrsta djelovanja	Razred pouzdanosti	Stalna djelovanja	Promjenjiva djelovanja (Q_s)
nepovoljno	3	1,2	1,6
	2	1,1	1,4
	1	1,0	1,2
povoljno	Svi razredi	1,0	0,0
Izvanredne situacije		1,0	1,0

TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

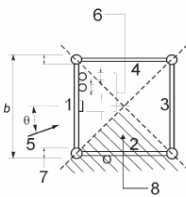
□ Ukupni koeficijent sile vjetra c_f

(Postupak za kvadratne ili istostranične trokutaste rešetkaste konstrukcije)

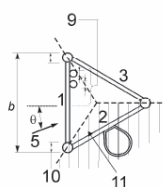
- u smjeru djelovanja vjetra na dio konstrukcije, uzima se kao:

$$c_f = c_{f,S} + c_{f,A}$$

- $c_{f,S}$ koeficijent sile vjetra samo za odsječak konstrukcije, (structure) koristeći koeficijent punoće konstrukcije φ
- $c_{f,A}$ koeficijent sile vjetra za dodatne elemente (opremu), (ancillaries)
- dodatni elementi čije se projicirane površine na svaku stranicu nalaze unutar 10 % jedna od druge, mogu se uzeti kao odgovarajući konstruktivni elementi



Stranica 1 se treba uzeti u privjetrini tako da je $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$



Stranica 1 se treba uzeti u privjetrini tako da je $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$. Vanjske ljestve se tretiraju kao zaseban element.

- 1 Stranica 1
- 2 Stranica 2
- 3 Stranica 3
- 4 Stranica 4
- 5 Vjetar
- 6 Dodatni elementi projicirani okomito na stranicu 1
- 7 Pojas projiciran okomito na stranicu
- 8 Dodatni elementi u tom području projicirani okomito na stranicu 2
- 9 Dodatni elementi projicirani okomito na stranicu (uključujući prečke ljestvi, zaštitne obruče itd.)
- 10 Pojas projiciran okomito na stranicu
- 11 Dodatni elementi u tom području pridruženi stranici 2

TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

□ Koeficijent sile vjetra za konstruktivne elemente $c_{f,S}$

za rešetkastu konstrukciju s kvadratnim tlocrtom ili tlocrtom u obliku jednakostraničnog trokuta, s jednakim površinama na svakoj stranici, ukupni koeficijent sile vjetra za odsječak u smjeru vjetra iznosi:

$$c_{f,S} = K_\theta \cdot c_{f,S,0}$$

- $c_{f,S,0}$ koeficijent ukupnog nominalnog pritiska odsječka j bez utjecaja na krajevima
- K_θ koeficijent kuta djelovanja vjetra

TORNJEVI I JARBOLI MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- Koeficijent kuta djelovanja vjetra K_θ se može odrediti :

■ za konstrukcije s kvadratnim tlocrtom $K_\theta = 1,0 + K_1 \cdot K_2 \cdot \sin^2 2\theta$

■ za konstrukcije s trokutnim tlocrtom $K_\theta = \frac{A_c + A_{c,sup}}{A_s} + \frac{A_f}{A_s} \cdot (1 - 0,1 \cdot \sin^2 1,5 \cdot \theta)$

pri čemu je:

$$K_1 = \frac{0,55 \cdot A_f}{A_s} + \frac{0,8 \cdot (A_c + A_{c,sup})}{A_s}$$

$$K_2 = 0,2 \text{ za } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ i } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0$$

$$= \varphi \text{ za } 0,2 \leq \varphi \leq 0,5$$

$$= 1 - \varphi \text{ za } 0,5 \leq \varphi \leq 0,8$$

- θ kut nagiba djelovanja vjetra u odnosu na normalu površine
- φ koeficijent punoće
- A_f ukupna projicirana površina gledana okomito prema licu elementa s ravnom plohom
- A_c ukupna projicirana površina gledana okomito prema licu elementa kružnog presjeka u pod-kritičnim režimima
- $A_{c,sup}$ ukupna projicirana površina gledana okomito prema licu elementa kružnog presjeka u nad-kritičnim režimima
- h visina promatranog elementa
- b ukupna širina presjeka

(Elementi su u pod kritičnom području kada je $Re \leq 4 \times 10^5$ i nad kritičnom za veće vrijednosti Re , bez leda)

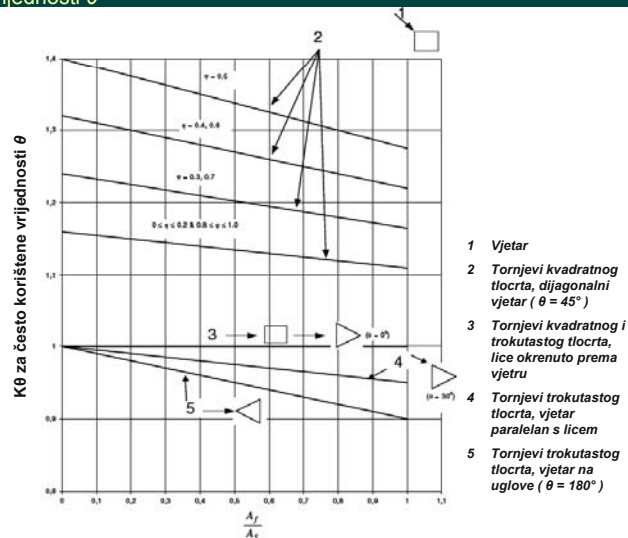
□ Napomena: $A_s = A_f + A_c + A_{c,sup}$

f: flet sided; c: circular section

TORNJEVI I JARBOLI MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- Koeficijent kuta djelovanja vjetra K_θ :

- za uobičajene vrijednosti θ



TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

□ Koeficijent ukupne normalne sile $c_{f,s,0}$

- Vrijednosti koeficijenata ukupne normalne sile $c_{f,s,0}$ koji su primjenjivi za odsječak kvadratnog tlocrta ili tlocrta u obliku jednakostraničnog trokuta j koji se sastoji i od ravnih elemenata i elemenata kružnog presjeka, određuju se prema:

$$c_{f,s,0,j} = c_{f,0,f} \cdot \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \cdot \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \cdot \frac{A_{c,sup}}{A_s}$$

- $c_{f,0,f}$, $c_{f,0,c}$ i $c_{f,0,c,sup}$ koeficijenti sile za odsječke sastavljene od

- ravnih elemenata, $c_{f,0,f} = 1,76 \cdot C_1 \cdot [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2]$
- elemenata sa pod-kritičnim kružnim i $c_{f,0,c} = C_1 \cdot (1 - C_2 \cdot \varphi) + C_1 + 0,875 \cdot \varphi^2$
- nad-kritičnim kružnim presjecima dani izrazima: $c_{f,0,c,sup} = 1,9 - \sqrt{(1 - \varphi) \cdot 2,81 - 1,14 \cdot C_1 + \varphi}$

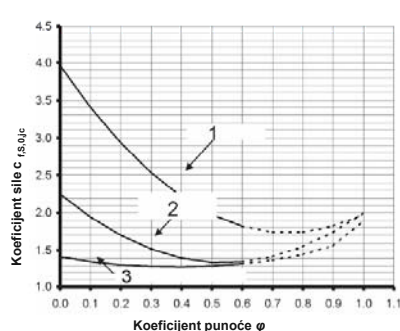
- $C_1 = 2,25$ za konstrukcije s kvadratnim tlocrtom
 - $= 1,9$ za konstrukcije s trokutastim tlocrtom
- $C_2 = 1,5$ za konstrukcije s kvadratnim tlocrtom
 - $= 1,4$ za konstrukcije s trokutastim tlocrtom

TORNJEVI I JARBOLI

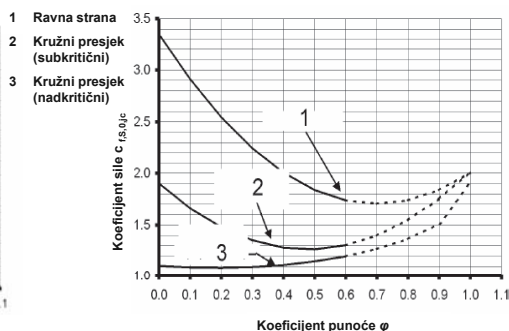
MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

□ Koeficijent ukupne normalne sile $c_{f,s,0}$

- približne vrijednosti za kvadratne i trokutaste konstrukcije:



a) Kvadratne konstrukcije



b) Trokutaste konstrukcije

- Napomena: Za konstrukcije s $\varphi > 0,6$ treba uzeti u obzir mogućnost odgovora konstrukcije uslijed vrtložne uzbude

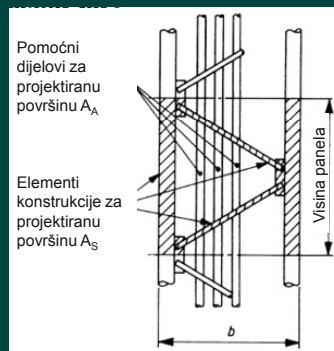
TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- Koeficijent sile vjetra za pravčaste dodatne elemente $c_{f,A}$
 - u smjeru djelovanja vjetra za bilo koji linearni dodatni element unutar visine panela određuje se prema:

$$c_{f,A} = c_{f,A,0} \cdot K_A \cdot \sin^2 \psi$$

- $c_{f,A,0}$ koeficijent ukupnog normalnog pritiska za odgovarajući element i njegov važeći Reynoldsov broj
- K_A redukcijski faktor koji uzima u obzir zaštitu elementa samom konstrukcijom i može se samo uzeti u obzir ako najmanje jedna strana konstrukcije djelotvorno štiti element (ili obratno)
- ψ kut djelovanja vjetra prema uzdužnoj osi linearnog elementa



TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- Redukcijski faktor, K_A , za dodatne elemente (opremu)

Položaj dodatnih elemenata	Redukcijski faktor, K_A	
	Kvadratni ili pravokutni tlocrtni oblik	Trokutasti tlocrtni oblik
Unutar odsječka	0,8	0,8
Izvan odsječka	0,8	0,8

Napomena: Ove vrijednosti mogu biti promijenjene u nacionalnim aneksima

- K_A se treba uzeti sa vrijednošću 1,0 za nad-kritične kružne presjeke te ako dodatni elementi ne zadovoljavaju sljedeće:
 - ukupna projicirana površina dodatnih elem., pridružena strani koja se razmatra je manja od projicirane površine konstruktivnih elemenata prema toj strani
 - ukupna projicirana površina bilo kojeg unutarnjeg ili vanjskog dodatnog elem., okomito na bilo koju stranu konstrukcije, je manja od polovice bruto površine same strane
 - bilo koji dodatni element ne prelazi više od 10% ukupne širine strane konstrukcije na toj razini

TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- ▣ Karakteristične vrijednosti koeficijenata normalnog pritiska, $c_{f,A,0}$ i $c_{f,G,0}$, za pojedinačne elemente (a: ancillary, g: guys)

Tip elementa	Važeći Reynoldsov broj Re (prema EN 1991-1-4)	Koeficijent pritiska $c_{f,A,0}$ ili $c_{f,G}$	
		Bez leda	S ledom
a) Odsječci ravnih strana ili ploče	Sve vrijednosti	2,0	2,0
b) Kružni odsječci i glatke žice	$\leq 2 \times 10^5$	1,2	1,2
	4×10^5	0,6	1,0
	$> 10 \times 10^5$	0,7	1,0
c) Kabeli od finih žica, npr. okrugli aluminijski vodič sa čeličnom jezgrom, zatvorena spiralna užad, spiralni čelični struk sa više od 7 žica	Bez leda: $\leq 6 \times 10^4$ $\geq 10^5$	1,2 0,9	
	Sa ledom: $\leq 1 \times 10^5$ $\geq 2 \times 10^5$		1,25 1,0

TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

- ▣ Karakteristične vrijednosti koeficijenata normalnog pritiska, $c_{f,A,0}$ i $c_{f,G,0}$, za pojedinačne elemente (a: ancillary, g: guys)

Tip elementa	Efektivni Reynoldsov broj Re (prema EN 1991-1-4)	Koeficijent pritiska $c_{f,A,0}$ ili $c_{f,G,0}$	
		Bez leda	S ledom
d) Deblji kabeli, npr. mala žičana užad, užad s okruglim strukovima, spiralni čelični strukovi sa samo 7 žica (1x7)	Bez leda: $\leq 4 \times 10^4$ $> 4 \times 10^4$	1,3 1,1	
	S ledom: $\leq 1 \times 10^5$ $\geq 2 \times 10^5$		1,25 1,0
e) Cilindri sa spiralom visine do 0,12D (Napomena 2)	Sve vrijednosti	1,2	1,2
Napomena 1: Za među-vrijednosti Re , $c_{f,A,0}$ se dobija linearnom interpolacijom Napomena 2: Ove vrijednosti su određene na osnovi ukupne širine, uključujući dvostruku visinu spirale Napomena 3: Vrijednosti za elemente sa ledom odgovaraju glatkom ledu; potrebno je obratiti pažnju ako se radi o hrapavom ledu Napomena 4: Ove vrijednosti mogu biti promijenjene u nacionalnim aneksima			

TORNJEVI I JARBOLI

MODELIRANJE DJELOVANJA VJETRA

□ Koeficijent sile vjetra $c_{f,G}$ za zatege za pridržanje stupova

- okomito na zatege u ravnini u kojoj se nalaze zatega i smjer vjetra, određuje se prema:

$$c_{f,G} = c_{f,G,0} \sin^2 \psi$$

- $c_{f,G,0}$ ukupni normalni koeficijent pritiska za odgovarajući važeći djelotvorni Reynoldsov broj
- ψ kut djelovanja vjetra prema užadi
- Napomena: *Sila vjetra na izolatore zatega, gdje je mjerodavna, se određuje koristeći odgovarajuće koeficijente sile vjetra za pojedinačne elemente ili uključivanjem njihovog efekta u $c_{f,G}$*

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR REŠETKASTIH TORNJEVA NA DJELOVANJE VJETRA

□ Kriterij za primjenu ekvivalente statičke metode

- Ekvivalentna statička metoda uključuje rezervu za dinamičko povećanje odgovora konstr.
- može koristiti ako vrijedi:

$$\frac{7 \cdot m_t}{\rho_s \cdot c_{ft} \cdot A_T \sqrt{d_B \cdot \tau_0}} \cdot \left(\frac{5}{6} - \frac{h_T}{h} \right)^2 < 1$$

- $c_{ft} A_T$ zbroj sile vjetra na panele (uključujući dodatne elemente), počevši od vrha tornja, tako da je $c_{ft} A_T$ manji od jedne trećine ukupne sume $c_f A_T$ za cijeli toranj (u m²);
- ρ_s gustoća materijala konstrukcije tornja (u kg/m³);
- m_T ukupna masa panela koji čine c_{ft} (u kg);
- h visina tornja (u m);
- h_T ukupna visina panela koji čine c_{ft} , ali ne veća od $h/3$ (u m);
- τ_0 konstanta volumen/otpornost uzeta kao 0,001 m;
- d_B visina u smjeru vjetra jednaka stranici d (m) za pravokutne tornjeve odnosno $0,75 d$ (m) za trokutaste tornjeve

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR REŠETKASTIH TORNJEVA NA DJELOVANJE VJETRA

□ Opterećenje vjetrom

- Srednja vrijednost vjetrovnog opterećenja $F_{m,W}(z)$ u smjeru djelovanja vjetra na toranj:

$$F_{m,W}(z) = \frac{q_p}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} \cdot \sum c_f \cdot A_{ref}$$

- Ekvivalentna vrijednost udara vjetra $F_{T,W}(z)$ u smjeru djelovanja vjetra na toranj:

$$F_{T,W}(z) = F_{m,W}(z) \left[1 + \left(1 + 0,2 \frac{z_m}{h} \right)^2 \frac{\left[1 + 7 \cdot I_v(z_e) \right] c_s c_d - 1}{c_o(z_m)} \right]$$

- I_v intenzitet turbulencije prema EN 1991-1-4
- c_s, c_d konstrukcijski faktor prema EN 1991-1-4
- z_m visina iznad razine na kojoj se traži utjecaj opterećenja
- h ukupna visina tornja
- c_o koeficijent terena (reljefa) prema EN 1991-1-4

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR REŠETKASTIH TORNJEVA NA DJELOVANJE VJETRA

□ Opterećenje za određivanje sile u elementima ili sile na temelje

- Maksimalna sila u elementu S_{max} , ili sile na temelje se određuju prema srednjoj vrijednosti vjetrovnog opterećenja $F_{m,W}$ i uvećavaju za faktor:

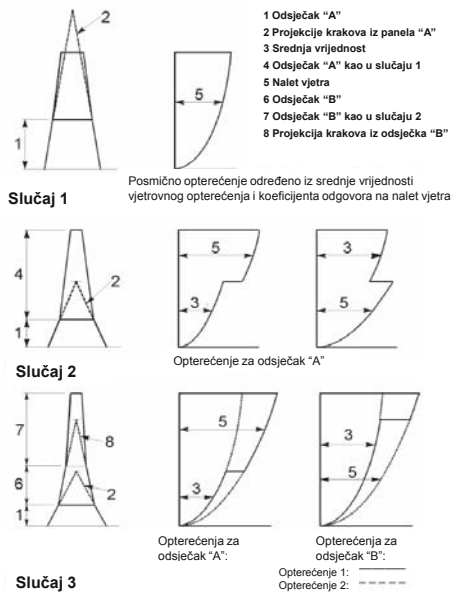
$$S_{max} = S_{m,W} \left[1 + \left(1 + 0,2 \frac{z_m}{h} \right)^2 \frac{\left[1 + 7 \cdot I_v(z_e) \right] c_s c_d - 1}{c_o(z_m)} \right]$$

- $S_{m,W}$ sila u elementu ili sila na temelj određena za srednju vrijednosti vjetrovnog opterećenja $F_{m,W}$

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR REŠETKASTIH TORNJEVA NA DJELOVANJE VJETRA

- Opterećenje za određivanje posmičnih sila
- Opterećenje za određivanje sila u elementima spregova mora se temeljiti na konfiguraciji tornja
 - **Slučaj 1:** Za tornjeve kod kojih su nagibi pojaseva (nogu) takvi, da se njihove projekcije sijeku iznad vrha tornja, maksimalna sila u spregu ili posmik iznad promatrane razine se određuje kao i za sile u elementima pojasa ili sile za temelje
 - **Slučaj 2:** Za tornjeve kod kojih su nagibi pojaseva (nogu) takvi, da se njihove projekcije sijeku ispod vrha tornja, potrebno je provesti dvije analize opterećenja:
 - srednja vrijednost vjetr. opter. $F_{m,w}(z)$, ispod sjecišta i ekvivalentna vrijednost 'udara' vjetra, $F_{T,w}(z)$ iznad sjecišta
 - srednja vrijednost vjetr. opter. $F_{m,w}(z)$, iznad sjecišta i ekvivalentna vrijednost 'udara' vjetra, $F_{T,w}(z)$ ispod sjecišta
 - **Slučaj 3:** Za više od jednog takvog sjecišta, potrebno je provesti dvije takve analize opterećenja za svaki panel



TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR REŠETKASTIH TORNJEVA NA DJELOVANJE VJETRA

- Opterećenje na kabele i zatege pridržane tornjem
 - Maksimalno opterećenje vjetra na kabele i zatege u smjeru djelovanja vjetra, $F_{c/Gw}(z)$:

$$F_{c/Gw} = \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot I_v(z)} \sum c_{f,G} \cdot A_G \left[1 + \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] c_s c_d - 1}{c_o(z)} \right]$$
 - $q_p(z)$ vršni pritisak vjetra na efektivnoj visini kabela, z metara iznad razine tla (1991-1-4)
 - $\sum c_{f,G}$ ukupni koeficijent vjetrovnog opterećenja na zategu/kabel u smjeru djelovanja vjetra

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Kriteriji za statičku metodu

- općenito se postupci statičke analize mogu primijeniti za određivanje reznih sila u jarbolu
- kod projektiranja značajnijih jarbola, čije bi otkazivanje imalo velike ekonomske posljedice, potrebno je provesti postupke provjere na dinamički odgovor, ako je to zatraženo projektnim specifikacijama
- postupci statičke analize se mogu primijeniti ako su zadovoljeni sljedeći kriteriji
 1. svaka konzola iznad razine gornje zatege ima ukupnu duljinu manju od polovine razmaka između prethodnih i gornjih zatega
 2. parametar β_s je manji od 1
 3. parametar Q je manji od 1
- ako niti jedan od gornja 3 kriterija nije zadovoljen, potrebno je provesti spektralnu analitičku metodu.

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Kriteriji za statičku metodu

2. parametar β_s je manji od 1, pri čemu je:

$$\beta_s = \frac{4 \left(\frac{E_m I_m}{L_s^3} \right)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{Gi} H_{Gi} \right)} < 1, \text{ sa } K_{Gi} = 0,5 N_i A_{Gi} E_{Gi} \cos^2 \alpha_{Gi} / L_{Gi}$$

- N broj razina zatega
- A_{Gi} površina popr. presjeka zatega na razini i
- E_{Gi} osni modul elastičnosti zatega na razini i
- L_{Gi} dužina zatega na razini i
- N_i broj zatega na razini i
- H_{Gi} visina i -te razine zatega iznad temelja visokih stupova;
- L_s prosječni razmak između razina zatega
- α_{Gi} nagib zatega prema horizontali na razini i
- E_m modul elastičnosti jarbola
- I_m prosječni moment tromosti jarbola

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Kriteriji za statičku metodu

3. parametar Q je manji od 1, gdje je:

$$Q = \frac{1}{30} \sqrt[3]{\frac{HV_H}{D_o}} \sqrt{\frac{m_o}{HR}}$$

- m_o prosječna masa po duljini jarbola uključujući dodatne elemente
- D_o prosječna širina stranice jarbola (m)
- V_H prosječna brzina vjetra na vrhu jarbola (m/s)
- R prosječni pritisak vjetra (m²)
- H visina jarbola, uključujući konzolu ako postoji (m)

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Ekvivalentne statičke metode

- Jarbol se mora provjeriti na
 - niz rasporeda statičkih opterećenja po dijelovima (*patch loadings*), temeljenih na prosječnom opterećenju vjetrom
 - povećanih sa opterećenjem vjetrom po dijelovima (*patches*) da se uzme u obzir dinamički odgovor jarbola.
- Taj postupak zahtijeva
 - nekoliko statičkih analiza djelovanja vjetra
 - za svaki razmatrani smjer djelovanja vjetra,
 - pri čemu se rezultati kombiniraju da se dobije maksimalni odgovor konstrukcije

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Prosječno opterećenje vjetrom

- opterećenje u smjeru djelovanja vjetra na stup, $F_{m,W}$, uslijed prosječnog djelovanja vjetra:

$$F_{m,W} = \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot I_v(z)} \cdot \sum c_w(z) A$$

- $c_w(z)$ koeficijent sile vjetra na konstrukciju (i bilo koji dodatni element) u smjeru djelovanja vjetra na promatrani odsječak stupa, na visini z iznad razine tla

- opterećenja djeluju u središtu površina strana (uključujući dodatne elemente) koje se nalaze u promatranom odsječku

- opterećenje okomito na zategu, F_{GW} , u ravni koja sadrži zategu i smjer djelovanja vjetra, uslijed prosječnog opterećenja vjetrom se određuje prema:

$$F_{GW} = \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot I_v(z)} \cdot c_G(z) A$$

- $c_G(z)$ koeficijent sile vjetra na zategu

- ako se primjenjuje jednoliko opterećenje, tada se $q_p(z)$ treba uzeti kao brzina vjetra na 2/3 visine priključka promatrane zatege na stup
- utjecaji opterećenja S_m uslijed prosječnog opterećenja vjetrom trebaju se odrediti za svaki element stupa pomoću geometrijski nelinearne statičke analize uslijed prosječnih opterećenja $F_{m,W}$ i F_{GW}

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Opterećenja po dijelovima jarbola (patch loads)

- opterećenja na dijelove jarbola se sukcesivno postavljaju prema sljedećem:
 - na svaki raspon jarbola između susjednih razina zatega (i na raspon između temelja i prve razine zatega);
 - na konzolu ako je značajno;
 - od sredine jednog do sredine drugog susjednog raspona;
 - od temelja do polovine visine prve razine zatega
 - od polovice raspona između najgornje i prethodne zatege do vrha jarbola; konzolu uključiti ako je značajna



TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Opterećenja po dijelovima jarbola (patch loads)

- opterećenje na jarbol od prosječnog vjetra određuje se prema sljedećem:

$$F_{PW} = 2 \cdot k_s \cdot \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot I_v(z)} \cdot \frac{I_v(z)}{c_0(z)} \sum c_w(z) A$$

- $c_w(z)$ koeficijent sile vjetra za konstrukciju (ili bilo koji dodatni element) u smjeru djelovanja vjetra na odsječak jarbola koji se razmatra, na visini z metara iznad tla
- k_s skalirajući faktor koji uzima u obzir multi-modalni odgovor jarbola sa zategama; preporuča se vrijednost $k_s = 3,5$
- $I_v(z)$ intenzitet turbulencije koji ovisi o reljefu terena
- $c_0(z)$ koeficijent terena (reljefa) prema EN 1991-1-4.
- Napomena: *Zbog jednostavnosti mogu se koristiti jednolika opterećenja na dijelove jarbola pri čemu je z visina na vrhu odsjeka za $I_v(z)$ i $q_p(z)$*

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Opterećenja po dijelovima jarbola (patch loads)

- opterećenje na dijelove jarbola stupova treba dodati prosječnom opterećenju vjetrom
- za jarbole 50 metara visine, potrebno je razmotriti samo jedan slučaj, uzimajući u obzir anvelopu prosječnog opterećenja i opterećenja po dijelovima
- Napomene:
 - u tim je slučajevima posmične spregove za svaki raspon potrebno proračunati za maksimalni posmik (i torziju) u tom rasponu
 - pojaseve i njihovi spojevi u svakom rasponu imaju se dimenzionirati na njihovo maksimalno (i minimalno) opterećenje u tom rasponu
 - ako jarbol stup podupire konzolu, tada je potrebno razmotriti:
 - (i) prosječno opterećenje i opterećenje po odsječcima na konzolu zajedno sa prosječnim opterećenjem na stup
 - (ii) prosječno opterećenje na konzolu zajedno sa prosječnim i opterećenjem po odsječcima na stup

TORNJEVI I JARBOLI

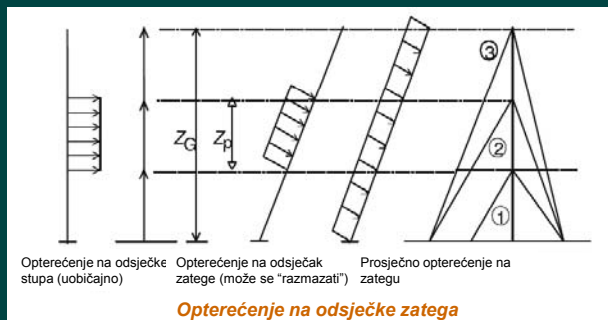
ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Opterećenja na zatege

- Za svako opterećenje na dijelove jarbola (*patch loading*), mora se zadati i *patch loading* F_{PG} - opterećenje na odsječke zatega unutar istih granica.
- Ta se opterećenja nanose okomito na svaku zategu u ravni koja sadrži zategu i smjer djelovanja vjetra, te određuju se prema:

$$F_{PG} = 2 \cdot k_s \cdot \frac{q_p(z)}{1 + 7 \cdot \frac{I_v(z)}{c_0(z)}} \cdot c_G(z) \cdot A$$

- k_s skalirajući faktor koji uzima u obzir multi-modalni odgovor jarbola sa zategama; preporuča se vrijednost $k_s = 3,5$
- $c_G(z)$ koeficijent sile vjetra okomito na zategu u ravni koja sadrži zategu i smjer vjetra



TORNJEVI I JARBOLI

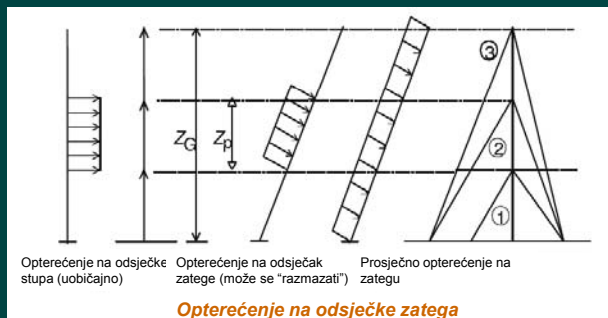
ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Opterećenja na zatege

- Zbog pojednostavnjenja, opterećenje na odsječke se može "razmazati" po ukupnoj visini promatranih zatega, množenjem opterećenja vjetrom, F_{PG} , sa omjerom

$$z_p/z_g$$

- z_p "visina" odsječka zatega
- z_g visina do priključka zatega na jarbol



TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Proračun odgovora konstrukcije za opterećenje po dijelovima (patch loading)

- Potrebno je proračunati utjecaj opterećenja u svakom elementu jarbola i zatega, S_{PLi} , izveden od svakog opterećenja na odsječke koji se nanose u nizu.
- To se radi računanjem razlike između
 - utjecaja od opterećenja na odsječke kombiniranog sa prosječnim opterećenjem i
 - utjecaja samo prosječnog opterećenja.
- Ti se utjecaji zatim kombiniraju kao korijen sume kvadrata:

$$S_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{PLi}^2}$$

- S_{PLi} utjecaj opterećenja (odgovor) od i-tog opterećenja u nizu;
- N ukupni broj potrebnih rasporeda opterećenja;
- S_p ukupni efektivni utjecaj od opterećenja na odsječke

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Ukupni utjecaji opterećenja

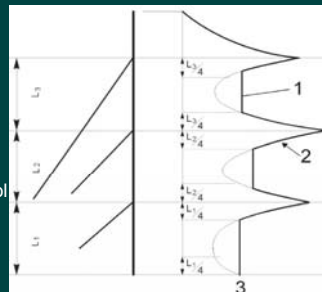
1. Ukupni utjecaji opterećenja za svaki element stupa visokih stupova, S_{TM} , se određuju prema:

$$S_{TM} = S_M \pm S_p$$

- S_M utjecaj opterećenja od prosječnog opterećenja vjetrom
- S_p fluktuirajući utjecaj od opterećenja na odsječke, sa predznakom koji daje najveći utjecaj

2. Kod proračuna ukupne sile u posmičnom spregu za svaki raspon jarbola sukladno prethodnoj točki 1, potrebno je

- minimalnu vrijednost unutar raspona uzeti kao najveću izračunatu na udaljenosti od 1/4 raspona
 - od ili susjedne razine priključka zatega na jarbol
 - ili od temelja.
- U skladu s tim, "raspon" se odnosi na razmak
 - između susjednih razina zatega ili
 - između baze stupa i najniže razine zatega.

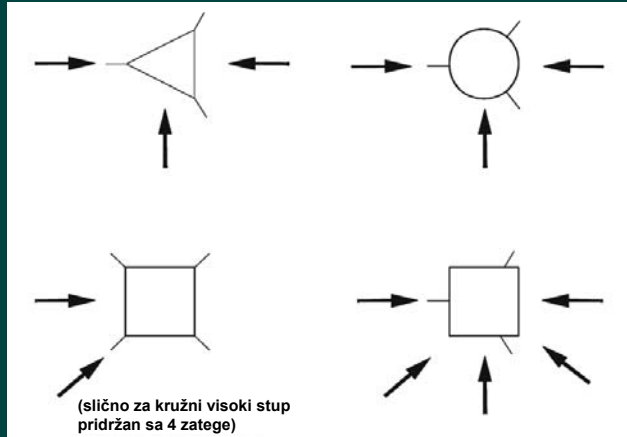


- 1 Minimalna vrijednost koja se koristi u tom rasponu
- 2 Anvelopa sile u ukrutnim elementima od opterećenja na odsječke
- 3 Sila u posmičnim ukrutama

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

- Smjerovi djelovanja vjetra koje je potrebno uzeti u obzir



TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

- Vibracije zatega
 - Zatege jarbola potrebno je provjeriti na visoko frekventne vibracije uzrokovane
 - vrtložnom pobudom ili
 - na galopiranje zatega, osobito kad su zatege zaleđene.
 - Ako se vibracije uoče, potrebno je instalirati prigušivače i stabilizatore.
 - Provjeru zamora sidara mora se provesti ako je poznato da su nastupile takve vibracije i ako nisu provedene nikakve mjere za popravak

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Vibracije zatega

■ a) Vrtložna pobuda

- Zatege mogu biti pod utjecajem rezonantnih vibracija niskih amplituda kod malih brzina vjetra uzrokovanih vrtložnom pobudom visokih frekvencija.
- Kako se pobuda može pojaviti kod visokih tonova, općenita pravila ne postoje.
- Međutim, iskustvo pokazuje da se takve vibracije vrlo vjerojatno javljaju ako vlačna naprezanja u zategama kod mirnih uvjeta prelaze 10% njihove sile sloma.

TORNJEVI I JARBOLI

ODGOVOR JARBOLA PRIDRŽANIH ZATEGAMA

□ Vibracije zatega

■ b) Galopiranje (uključujući kišom izazvane vibracije)

- Zatege mogu biti izložene galopirajućoj pobudi ako su obložene ledom ili gustim mazivom.
- Nakupine leda ili masti mogu izazvati aerodinamične oblike koje uzrokuju odižuće (*lift*) i pritisne (*drag*) nestabilnosti, što rezultira vibracijama niskih frekvencija i velikih amplituda.
- Slične vibracije mogu se pojaviti ako pada kiša.
- Opća pravila ne mogu se dati, jer pojava galopiranja bitno ovisi o naslagama leda ili profila maziva.
- Općenito će se pojaviti samo na zategama većih promjera i relativno su neosjetljive na početne vlačne sile zatega.

TORNJEVI I JARBOLI

OPTEREĆENJE LEDOM I KOMBINACIJE LEDA I VJETRA

Težina leda

- kod procjene težine leda na rešetkasti toranj ili stup visokih stupova, može se pretpostaviti
 - da su svi konstrukcijski elementi, dijelovi ljestvi, dodatni elementi itd. prekriveni ledom jednake debljine preko cijele površine elementa.



- ako su razmaci između elemenata mali (manji od 75 mm), može se pretpostaviti da su ispunjeni ledom

TORNJEVI I JARBOLI

OPTEREĆENJE LEDOM I KOMBINACIJE LEDA I VJETRA

Kombinacije leda i vjetra

- Potrebno je razmotriti dvije kombinacije vjetra i leda
 - i za simetrično i nesimetrično zaleđivanje:

- za dominantni led i prateći vjetar:

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{led} \cdot Q_{k,led} + \gamma_W \cdot k \cdot \psi_w \cdot Q_{k,w}$$

- za dominantni vjetar i prateći led:

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_W \cdot k \cdot Q_{k,w} + \gamma_{led} \cdot \psi_{led} \cdot Q_{k,led}$$

$\psi_w=0,5$; $\psi_{led}=0,5$; parcijalni koefic. slajd 12; k ovisi o razredu leda (ISO 12494)

TORNJEVI I JARBOLI

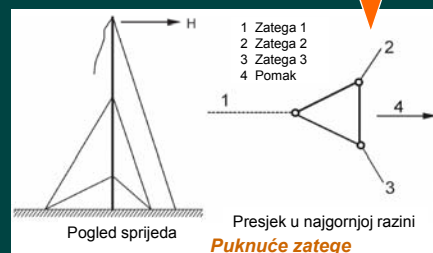
PRIGUŠIVAČI ZATEGA

- Kako bi se suzbile moguće vibracije koje se mogu pojaviti u zategama uslijed vjeta, potrebno je provesti jedan od sljedećih postupaka:
 - Montaža prigušivača na zatege u svim slučajevima kad je početni vlak veći od 10 % utvrđene čvrstoće pucanja zatege.
 - Gdje prigušivači nisu instalirani, zatege se moraju pregledavati tijekom prve godine korištenja da se osigura da nema pojave pretjeranih frekvencija i/ili amplituda vibracija. U protivnom je potrebna montaža prigušivača.
- Prigušivači za smanjivanje vrtložnih uzbuda i sprječavanje galopiranja
 - u svim slučajevima velikih vibracija uslijed vrtložnih uzbuda, potrebna je montaža prigušivača, s odgovarajućim tehničkim specifikacijama
 - Djelomična kontrola galopiranja i vibracija izazvanih kišom/vjetrom se može postići montažom užadi između zatega, koji povezuje točke maksimalnih amplituda dviju ili više zatega. Spojevi tih užadi na zatege moraju se provjeriti za jake brzine vjeta.
 - Viseći lanci se također mogu primijeniti za kontrolu galopiranja, ako djeluju na odgovarajućem rasponu frekvencija.

TORNJEVI I JARBOLI

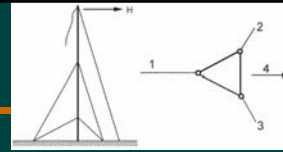
LOM ZATEGE

- **Pojednostavnjeni analitički postupak**
 - uslijed loma (puknuća) zatege kod jarbola, pretpostavlja se da su
 - dinamički utjecaji jednaki statičkoj sili
 - koja djeluje na stup u razini grupe zatega kod kojih se dogodilo puknuće
 - za proračun ekvivalentne statičke sile $F_{h,dyn,Sd}$, pretpostavlja se sljedeće:
 - lom je jednostavan prerez kroz zategu - elastična energija zatege 1 prije loma se zanemaruje
 - prigušenje se ne uzima u obzir
 - opterećenje vjetrom se kod određivanja ekvivalentne sile zanemaruje



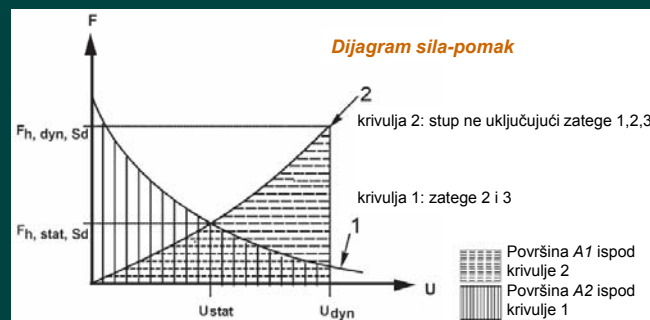
TORNJEVI I JARBOLI

LOM ZATEGE



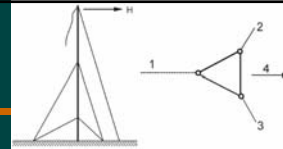
□ Pojednostavnjeni analitički postupak

- Za zadani pomak u zatege 2 i 3 djeluju na tijelo tornja sa silom $F_{h, Sd}$.
- Odnos je prikazan kao krivulja 1. Sila $F_{h, Sd}$ pada sa porastom pomaka uslijed otpuštanja zatege.
- Za konstrukcijski sustav tornja, osim za skup zatega na promatranoj razini, odnos između napadne horizontalne sile i pomaka čvora prikazan je kao krivulja 2.
- U sjecištu krivulja 1 i 2 dvije sile su jednake, tj. uspostavljena je statička ravnoteža. Sila koja djeluje na čvor je $F_{h, stat, Sd}$.



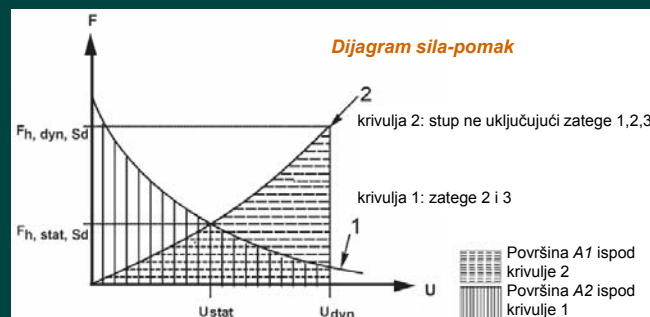
TORNJEVI I JARBOLI

LOM ZATEGE



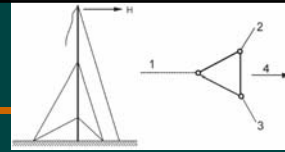
□ Pojednostavnjeni analitički postupak

- U trenutku puknuća u zategama 2 i 3 spremljena je energija. Kada se stup počnje horizontalno pomicati ta energija će se djelomično transformirati u kinetičku energiju.
- Za maksimalni pomak kinetička energija će biti jednaka nuli, jer se izgubljena energija u zategama 2 i 3 premjestila na stup kao elastična deformacijska energija u tijelu stupa i zategama. Prigušenje nije uzeto u obzir.
- Energija izgubljena u zategama 2 i 3 mora se uzeti jednaka površini A2 ispod krivulje 1 na slici.
- Pomak koji nastaje kad su dvije površine A1 i A2 jednake uzima se kao dinamički pomak u_{dyn} .
- Dinamička sila $F_{h, dyn, Sd}$ odgovara tom dinamičkom pomaku.



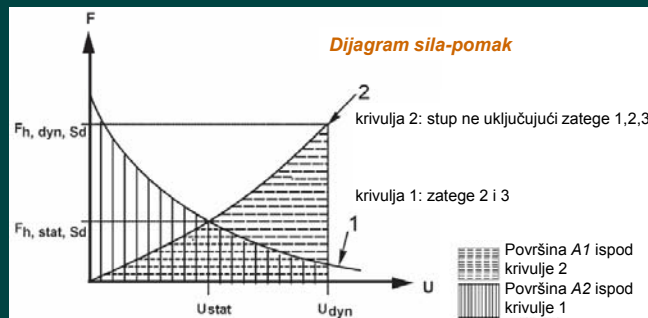
TORNJEVI I JARBOLI

LOM ZATEGE



□ Pojednostavnjeni analitički postupak

- Dinamički faktor Φ može se odrediti kao: $\Phi = F_{h,dyn,Sd} / F_{h,stat,Sd}$
- Ovaj postupak za proračun jarbola upravo nakon mogućeg loma zatege vrijedi za stup pridržan zategama u 3 smjera.
- Za stupove pridržane zategama u 4 (ili više) smjerova imaju se primijeniti slični postupci temeljeni na jednakim načelima.
- Ako se projektant, korisnik i nadležna institucija slože, navedena dinamička sila uslijed loma zatege ne mora se kombinirati sa meteorološkim opterećenjima.



TORNJEVI I JARBOLI

LOM ZATEGE

□ Konzervativna metoda

- horizontalna komponenta sile u zatezi prije loma se koristi kao
 - dodatna sila koja djeluje na jarbol (stup) bez pukle zatege
- rezultirajuće sile u zategama moraju se povećati s faktorom 1,3
 - u slučaju stupa s dvije razine zatega
 - ili ako se razmatra lom gornje zatege

□ Proračun poslije loma zatege

- Jarbol (stup) bez pukle zatege mora izdržati reducirano opterećenje vjetrom,
 - koje djeluje kao statičko opterećenje,
 - bez opterećenja vjetra po odsječcima (*patch wind loading*).
- Reducirano opterećenje vjetrom se uzima kao
 - 50 % vrijednost karakterističnog prosječnog opterećenja vjetrom,
 - koji djeluje u najnepovoljnijem smjeru.

TORNJEVI I JARBOLI

IZVEDBA

□ Vijčani spojevi

- svi vijčani spojevi kod tornjeva i jarbola sa zategama moraju biti tako izvedeni
 - da se spriječi otpuštanje matica tijekom korištenja
- rupe vijaka trebaju biti bušene,
 - ako se utjecaj zamora ne može zanemariti

□ Prednapinjanje zatega

- Prednapinjanje zatega mora se provesti ciklički:
 - do ukupne sile od 10% do 50% vrijednosti sile loma
 - Broj ciklusa ne bi trebao biti manji od 10.

TORNJEVI I JARBOLI

IZVEDBA

□ Dopušteno odstupanje tijekom gradnje – Stupovi pridržani zategama

- Konačno postavljanje i napinjanje zatega se provodi od najniže razine zatega prema gornjim. Preporučuju se sljedeće vrijednosti dopuštenih odstupanja:
 1. Konačni položaj središnje osi stupa nalazi se
 - unutar vertikalnog stošca s vrhom u bazi visokih stupova i s radiusom od $1/1500$ visine iznad baze stupa.
 2. A) Rezultirajuća horizontalna komponenta početnih vlačnih sila u svim zategama
 - na promatranoj razini ne smije prijeći 5% prosječne horizontalne komponente početne vlačne sile u zategi na toj razini.
 2. B) Početna vlačna sila u bilo kojoj zasebnoj zategi
 - na promatranoj razini ne smije varirati više od 10% od projektne vrijednosti.
 3. Maksimalni početni pomak stupa
 - visokih stupova između dvije razine zatega iznosi $L/1000$,
 - gdje je L razmak između promatranih razina,
 4. odstupanje od poravnjanja triju uzastopnih priključaka zatega na stup.
 - poslije izvedbe, je ograničeno na $(L_1+L_2)/2000$,
 - gdje su L_1 i L_2 duljine dva uzastopna raspona na stupu

TORNJEVI I JARBOLI

IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

Otpornost na izvijanje tlačnih elemenata

- proračunska otpornost na izvijanje tlačnih elemenata u rešetkastom tornju ili visokom stupu se određuje prema:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

- za klase 1,2 i 3 poprečnih presjeka

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

- za klasu 4 poprečnih presjeka

- Za elemente s konstantnim poprečnim presjekom pod konstantnim tlačnim opterećenjem faktor redukcije χ i faktor ϕ za definiranje χ se određuju pomoću efektivnog omjera vitkosti λ_{eff} umjesto λ . Efektivni omjer vitkosti se definira kao:

$$\lambda_{eff} = k \cdot \lambda$$

- k koeficijent efektivne vitkosti
- λ_1 je definiran u EN 1993-1-1
- λ vitkost odgovarajućeg oblika izvijanja

$$\lambda = \frac{L}{r}$$

- za pojedinačne kutnike koji nisu kruto vezani na oba kraja (barem sa 2 vijka, ako se radi o vijčanoj vezi), proračunska otpornost na izvijanje definirana u (1) ima se smanjiti s koeficijentom redukcije η .
 - $\eta = 0,8$ za pojedinačne kutnike spojene sa po jednim vijkom na svakom kraju
 - $\eta = 0,9$ za pojedinačne kutnike spojene sa po jednim vijkom na jednom kraju te kontinuirano ili kruto na drugom kraju

TORNJEVI I JARBOLI

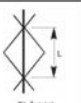
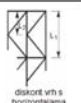
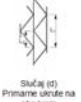
IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

Koeficijent efektivne vitkosti k za elemente pojaseva (noqu)

Napomena 1: Redukcij faktor može biti opravdan analizom

Napomena 2: Kritično samo ako se koriste vrlo nejednaki kutnici

Napomena 3: Navedene vrijednosti vrijede samo za kuteve od 90°

Simetrični spregovi			Nesimetrični spregovi		
Odsječak	L (1)	$\pm \bullet \circ$	Odsječak	L (1)	$\pm \bullet \circ$
Os	v-v	y-y	Os	v-v	y-y
	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ ali $\geq 0,9$ i $\leq 1,0$	1,0 (1)		$1,2 \left(0,8 + \frac{\lambda}{10} \right)$ ali $\geq 1,08$ i $\leq 1,2$ na L_1 (2)	$1,2 \left(0,8 + \frac{\lambda}{10} \right)$ ali $\geq 1,08$ i $\leq 1,2$ na L_1
	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$	1,0 (1)		$0,8 + \frac{\lambda}{10}$	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$
	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ ali $\geq 0,9$ i $\leq 1,0$	1,0 (1)		$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ ali $\geq 0,9$ i $\leq 1,0$ na L_1 (2)	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ ali $\geq 0,9$ i $\leq 1,0$ na L_1

TORNJEVI I JARBOLI

IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

□ Koeficijent efektivne vitkosti k za elemente **spregova**

Vrsta ograničenja	Primjeri	Os	K
Diskontinuirana oba kraja (npr. po jedan vijak na oba kraja elementa)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_z}$
Kontinuirani jedan kraj (npr. jedan vijak na jednom kraju te ili dva vijka ili kontinuirana veza na drugom kraju elementa)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_z}$
Kontinuirana oba kraja (npr. po dva vijka na oba kraja, po dva vijka na jednom kraju te kontinuirana veza na drugom, ili kontinuirana veza na oba kraja)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_z}$

Napomena 1:
Detalji su prikazani ilustrativno.

Napomena 2:
Detalji su prikazani za veze na kutnike.
Faktor K vrijedi i za veze na cijevne ili pune kružne pojaseve (noge) preko zavarenih čvornih ploča.

TORNJEVI I JARBOLI

IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

□ Koeficijent efektivne vitkosti k za elemente **spregova**

- U slučaju horizontalnih elemenata K spregova koji imaju tlačno naprezanje na jednoj polovini svoje duljine i vlačno naprezanja na drugoj polovini, koeficijent efektivne vitkosti k za izvijanje poprečno na ravninu, množi se sa faktorom k_1 koji ovisi o odnosu vlačne sile N_t , prema tlačnoj sili N_c .

Omjer $\frac{N_t}{N_c}$	Modif.faktor, k_1
0,0	0,73
0,2	0,67
0,4	0,62
0,6	0,57
0,8	0,53
1,0	0,50

Vrijednost 1,0 se primjenjuje kada je omjer N_t/N_c negativan (npr. kada su oba elementa u tlaku)

TORNJEVI I JARBOLI

IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

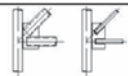
□ Koeficijent efektivne vitkosti k za **ukrutne elemente**

Napomena 2:
Redukcija samo za stvarnu duljinu, ali ne manje od razmaka između krajnjih vijaka

Napomena 3:
Gdje krajevi nisu isti koristi se prosječna "K" vrijednost

Napomena 4:
Gornji detalji su prikazani samo ilustrativno

Napomena 5:
Gornje vrijednosti su za elemente spregova (ispune) s jednakim priključkom na oba kraja

Pojasevi (noge) od cijevi ili šipke	Vrsta	Os	$K_{0.95}$
	 cijev s jednim vijkom	u ravnini	0,95 ²⁾
		izvan ravnine	0,95 ²⁾
	 cijev s 2 vijka zavarene cijevi s krajnjim pločama	u ravnini	0,85
		izvan ravnine	0,95 ²⁾
	 zavarene cijevi i šipke s čvornim elem.	u ravnini	0,70
		izvan ravnine	0,85
	 direktno zavarene cijevi i šipke	u ravnini	0,70
		izvan ravnine	0,70
	 zavarene savinute šipke	u ravnini	0,85
		izvan ravnine	0,85

TORNJEVI I JARBOLI

IZVIJANJE ELEMENATA VISOKIH STUPOVA I TORNJEVA

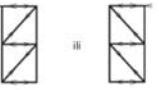
□ **Vitkost**

- elementa pojaseva (nogu), općenito ne bi trebala biti veća od 120.
- elementa ispune λ , se određuje prema:
 - za kutnike
 - za cijevne profile

$$\lambda = \frac{L_{di}}{i_{vv}}$$

- za cijevne profile

$$\lambda = \frac{L_{di}}{i_{yy}}$$

Tipični primarni uzorci					
paralelni ili s postepenim sužavanjem		obično s postepenim sužavanjem		obično s paralelni	
					
I Jednost. rešetka $L_{di}=L_{ej}$	II Križna ispuna $L_{di}=L_{ej}$	III K-sprez $L_{di}=L_{ej}$	IV Diskont. sprez s kontinuiranim horiz. sjecištima $L_{di}=L_{ej}$	V sprez s višestrukom rešetkom	VI Vlačni sprez
Tipični oblici sekundarne ispune (spregova)				Napomena: Vlačni elementi u uzorku VI su proračunati da preuzimaju ukupni posmik u vlatku; npr.	
					
I A	II A Križna ispuna $L_{di}=L_{ej}$	III A K-sprez $L_{di}=L_{ej}$ $L_{di}=L_{ej}$ kod pravok. osi	IV A Križna ispuna sa sekundarnim elementima $L_{di}=L_{ej}$		

ČELIČNI DIMNJACI

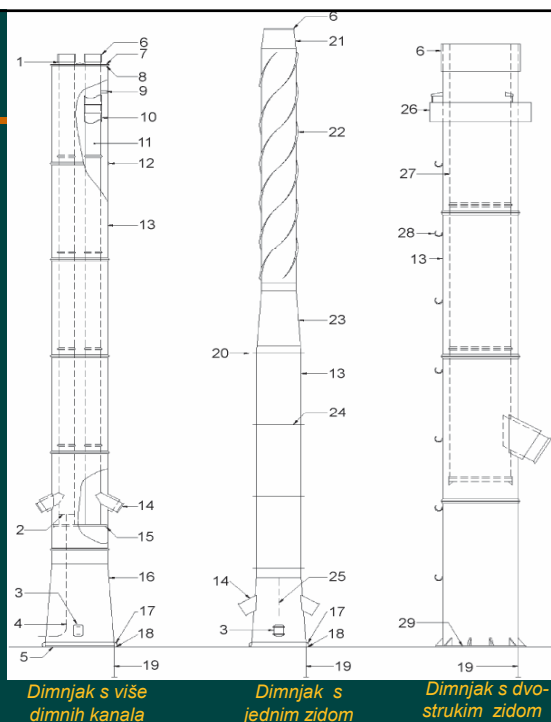
SADRŽAJ PREDAVANJA (2.dio)

- ▣ Dimnjaci (EN 1993-3-2)
 - Osnovni pojmovi
 - Trajnost
 - Proračun konstrukcije
 - Granično stanje uporabljivosti
 - Podjela prema pouzdanosti
 - Parcijalni koeficijenti za djelovanja
 - Arodinamičke mjere i mjere za prigušenje vibracija
 - Izvedba

ČELIČNI DIMNJACI

OSNOVNI POJMOVI

- 1 Traka
- 2 Slivnik
- 3 Pristupna vrata
- 4 Odvodna cijev
- 5 Baza ili ležajna ploča
- 6 Poklopac ispusta
- 7 Pokrovna ploča
- 8 Kut
- 9 Bočni podupirači
- 10 Izolacija mineralnom vunom
- 11 Cijevi
- 12 Povezujuća lamela
- 13 Nosiva ljuska
- 14 Ulazna cijev
- 15 Linearna osnovica
- 16 Bazni konus
- 17 Tlačni prsten
- 18 Bazna stolica
- 19 Sidreni vijci
- 20 Mogući ukrutni prsten
- 21 Gornji konus
- 22 Spiralni aerodinamični stabilizatori
- 23 Srednji konus
- 24 Povezujuća lamela
- 25 Vezna ploča
- 26 Uređaj za prigušivanje
- 27 Cijev
- 28 Pristupne kuke
- 29 Bazna ploča



ČELIČNI DIMNJACI

TRAJNOST

□ Dodatak na debljinu za koroziju izvana

Sustav zaštite	Period izlaganja	
	Prvih 10 godina	Svaki dodatni period od 10 godina
Obojani karbonski čelik (bez planiranog plana ponovnog bojanja)	0	1 mm
Obojani karbonski čelik (s planiranim planom ponovnog bojanja)	0	0 mm
Obojani karbonski čelik zaštićen izolacijom i vodootpornom oblogom	0	1 mm
Nezaštićeni karbonski čelik	1,5 mm	1 mm
Nezaštićeni "weathering" čelik	0,5 mm	1 mm
Nezaštićeni nehrđajući čelik	0	0,3 mm
Nezaštićena unutrašnja površina nosive ljuske i nezaštićena vanjska površina cijevi u dimnjacima s više cijevi (za karbonski i "weathering" čelik)	0,2 mm	0,1 mm

ČELIČNI DIMNJACI

PRORAČUN KONSTRUKCIJE

□ Proračun unutarnjih sila - Analiza nosive ljuske

■ Za neukružene vertikalne cilindrične ljuske

- membranska naprezanja od vanjskih djelovanja se mogu odrediti prema mebranskoj teoriji,
- pri čemu se cilindar promatra kao globalna greda sa zanemarivanjem utjecaja savijanja ljuske,
- osim prstenastih momenata savijanja uslijed nejednolike raspodjele pritiska vjetra uzduž opsega

■ Napomene: *Preporučeni kriterij za zanemarivanje efekata ljuske:*

- l ukupna visina
- r_m srednji radijus ljuske
- t debljina korodirane ploče

$$l / r_m \geq 0,14 \cdot r_m / t + 10$$

■ Prstenasti momenti savijanja na jedinicu duljine se mogu približno definirati kao:

- w_e opterećenje vjetrom, koji djeluje na vanjsku površinu konstrukcije (5.1 EN 1991-4; z visina dimnjaka)

$$m_y = 0,5 \cdot r_m^2 \cdot w_e$$

■ Napomene: *Prstenasti momenti savijanja uslijed opterećenja vjetrom se mogu zanemariti u neukrućenim cilindričnim ljuskama ako je:*

$$r_m / t \leq 160$$

ČELIČNI DIMNJACI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

□ Proračun unutarnjih sila - Analiza nosive ljuske

■ Za cilindrične ljuske s ukrutnim prstenovima

ili za sklopove od cilindričnih i konusnih, prstenovima ukrućenih ljuski,

- membranska naprezanja se mogu, neovisno o odnosima l/r_m i r_m/t , odrediti prema membranskoj teoriji pri čemu se konstrukcija tretira kao globalna greda.
- Utjecaji savijanja ljuske se mogu zanemariti, ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:
 - ukrutni prstenovi za preuzimanje pritiska vjetra su proračunati za prstenaste (obodne) momente savijanja
 - ukrutni prstenovi na prijelazima između cilindara i konusa su proračunati za ravnotežne sile koje su rezultat promjene smjera meridijanskih membranskih sila

ČELIČNI DIMNJACI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

□ Proračun unutarnjih sila - Imperfekcije

- horizontalne imperfekcije samostojećih konzolnih dimnjaka se uzimaju pretpostavkom bočnog pomaka Δ u [m], na vrhu u odnosu na vertikalu:

$$\Delta = \frac{h}{500} \cdot \sqrt{1 + \frac{50}{h}}$$

- h ukupna visina dimnjaka u [m]

ČELIČNI DIMNJACI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

□ Proračun unutarnjih sila – Globalna analiza

- Kada se nosiva ljuska promatra kao greda, može se proračunati prema globalnoj teoriji prvog reda ako je:

$$\frac{N_b}{N_{crit}} \leq 0,10$$

- N_b je proračunska vrijednost ukupnog vertikalnog opterećenja u podnožju ljuske
- N_{crit} elastična kritična vrijednost za slom u podnožju ljuske

- Kada se nosiva ljuska računa kao greda, a mora se primijeniti globalna teorija drugog reda, momenti savijanja drugog reda M'_b se mogu približno odrediti iz momenata savijanja prvog reda M_b , prema:

$$M'_b = M_b \cdot \left(1 + \frac{\eta^2}{8} \right), \text{ sa } \eta = h \cdot \sqrt{\frac{N_b}{EI}}$$

- h ukupna visina ljuske
- EI fleksijska krutost u podnožju ljuske

ČELIČNI DIMNJACI GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI

□ Pomaci i amplitude vibracija:

- maksimalna vrijednost pomaka, δ_{max} , uslijed karakteristične vrijednosti opterećenja vjetrom, u smjeru djelovanja vjetra na vrhu samostojećeg dimnjaka, mora biti ograničena te se preporuča sljedeća vrijednost:

- h ukupna visina dimnjaka.

$$\delta_{max} = h/50$$

- maksimalna vrijednost amplituda vibracija na vrhu samostojećeg dimnjaka uslijed vrtložne pobude mora biti ograničena

Razred pouzdanosti	Ograničenja amplitude uslijed vibracija	
3	0,05	vanjskog promjera
2	0,10	vanjskog promjera
1	0,15	vanjskog promjera

ČELIČNI DIMNJACI

PODJELA PREMA POUZDANOSTI

Razred pouzdanosti	
3	dimnjaci na strateški važnim lokacijama, npr. u sklopu atomskih elektrana, ili u gusto naseljenim područjima.; veliki dimnjaci u sklopu industrijskih postrojenja kojima upravljaju ljudi gdje su ekonomske i društvene posljedice otkazivanja vrlo velike
2	svi uobičajni dimnjaci u sklopu industrijskih postrojenja ili na drugim lokacijama, koji se ne mogu definirati kao razred 1 ili 3
1	dimnjaci na otvorenom prostoru čije otkazivanje ne može izazvati ozljedu; dimnjaci niži od 16 m u sklopu postrojenja bez ljudi.

ČELIČNI DIMNJACI

PARCIJALNI KEFICIJENTI ZA DJELOVANJA

Vrsta djelovanja	Razred pouzdanosti	Stalna djelovanja	Promjenjiva djelovanja (Q_s)
nepovoljno	3	1,2	1,6
	2	1,1	1,4
	1	1,0	1,2
povoljno	Svi razredi	1,0	0,0
Izvanredne situacije		1,0	1,0

ČELIČNI DIMNJACI

AERODINAMIČKE MJERE I MJERE ZA PRIGUŠENJE VIBRACIJA

□ Aerodinamičke mjere:

- ako su spirale raspoređene na vrhu dimnjaka, osnovna vrijednost odižućeg (*lift*) koeficijenta c_{lat} , na cijeloj visini dimnjaka može se pomnožiti s faktorom α određenog prema:

$$\alpha = \left(1 - \frac{l_s}{h}\right)^3$$

- l_s duljina ljuske na kojoj su postavljene spirale
- h ukupna visina dimnjaka

- prethodnu jednadžbu je moguće koristiti samo ako geometrija takvih spirala zadovoljava sljedeće:

- tri početne spirale;
 - razmak (korak) spirala iznosi $h_s = 4,5 b$ do $5,0 b$;
 - visina spirala iznosi $t = 0,10 b$ do $0,12 b$;
 - duljina ljuske na kojoj su postavljene spirale l_s iznosi najmanje $0,3 h$, a obično između $0,3 h$ i $0,5 h$;
- dopušta se odsječak na vrhu dimnjaka bez spirala maksimalne duljine $1,0 b$, a koji se može uključiti u duljinu l_s

ČELIČNI DIMNJACI

IZVEDBA

□ Dopuštena odstupanja tijekom izvedbe

- dozvoljeno horizontalno odstupanje Δ od vertikale čelične ljuske na bilo kojoj razini h (u metrima) iznad podnožja samostojećeg dimnjaka:

$$\Delta = \frac{h}{500} \cdot \sqrt{1 + \frac{50}{h}}$$

PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJA S VLAČNIM ELEMENTIMA

SADRŽAJ PREDAVANJA (3.dio)

□ Konstrukcije s vlačnim elementima

- Osnovni pojmovi i definicije
- Trajnost
- Djelovanja
- Materijal
- Proračun konstrukcije
- Granično stanje nosivosti
- Granično stanje uporabljivosti
- Vibracije kabela

Grupa	Glavni vlačni element	Komponenta vlačnog elementa
A	šipka	Vlačna šipka, prednapeta šipka
B	Okrugla žica	Spiralni strukovi
	Okrugle i Z žice	Zatvorena spiralna užad
	Okrugle žice i žičani struk	Užad od žičanih strukova
C	Okrugla žica	Paralelnih žičanih strukova
	Okrugla žica	Snop paralelnih žica
	Uže sastavljeno od sedam žica	Snop paralelnih strukova

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

□ Faktor sile loma (K)

- empirijski faktor koji se koristi za utvrđivanje minimalne sile loma i određuje se prema:

$$K = \frac{\pi \cdot f \cdot k}{4}$$

- f faktor ispunje za uže
- k faktor gubitka uslijed "pletanja"

□ Minimalna sila loma (F_{min})

- minimalna sila loma se određuje prema:

$$F_{min} = \frac{d^2 \cdot R_r \cdot K}{1000} \quad [\text{kN}]$$

- d promjer užeta u mm
- K faktor sile loma
- R_r razred užeta u N/mm²

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

TRAJNOST

- za poboljšanu trajnost primjenjuju se sljedeći razredi izloženosti:

Vrsta zamora	Djelovanje korozije	
	bez vanjskog izlaganja	vanjska izloženost
bez značajnog djelovanja zamora	razred 1	razred 2
uglavnom osno djelovanje zamora	razred 3	razred 4
osno i bočno djelovanje zamora (vjetar i kiša)	-	razred 5

- veze vlačnih elemenata trebaju biti zamjenjive i sa mogućnošću prilagođavanja

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

DJELOVANJA

□ Vlastita težina vlačnih elemenata

- za spiralne strukove, zatvorenu spiralnu užad ili nosivu žičanu užad srednja vrijednost vlastite težine se može odrediti prema:

$$g_k = w \cdot A_m$$

- w jedinična težina koja uzima u obzir gustoću čelika uključujući antikorozijsku zaštitu, N/mm³
- A_m površina poprečnog presjeka metalnih komponenta u mm² $A_m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f$
- d vanjski promjer užeta ili struka u mm, uključujući oblogu antikorozivne zaštite
- f faktor ispune

		faktor ispune							jedinična težina $w \times 10^{-7}$ [N/mm³]
		Žice jezgre+1 sloj z žica	Žice jezgre+2 sloja z žica	Žice jezgre + > 2 sloja z žica	Broj slojeva žica oko žičane jezgre				
					1	2	3-6	>6	
1	Spiralni strukovi				0,77	0,76	0,75	0,73	830
2	Zatvorena spiralna užad	0,81	0,84	0,88					830
3	Užad sastavljena od strukova s kružnim žicama				0,56				930

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

MATERIJAL

- Modul elastičnosti E_Q
 - za odgovarajuće promjenjivo djelovanje

	Vlačni elementi visoke čvrstoće	E_Q [kN/mm ²]	
		čelične žice	nehrđajuće čelične žice
1	Spiralni strukovi	150+/- 10	130+/- 10
2	Zatvorena spiralna užad	160+/- 10	-
3	Užad od žičanih strukova sa CWR-om	100+/- 10	90+/- 10
4	Užad od žičanih strukova sa CF-om	80+/- 10	-
5	Snop paralelnih žica	205+/- 5	-
6	Snop paralelnih strukova	205+/- 5	-

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

PRORAČUN KONSTRUKCIJE

- Nelinearni utjecaji od deformacija
 - Utjecaji lančanice
se mogu uzeti u obzir preko efektivnog modula E_t za svaki kabel ili za njegov segment:

$$E_t = \frac{E}{1 + \frac{w^2 \cdot l^2 \cdot E}{12 \cdot \sigma^3}}$$

- E modul elastičnosti kabela u N/mm²
- w jedinična težina u N/mm³
- l horizontalni raspon kabela u mm
- σ naprezanje u kabelu u N/mm²

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

PRORAČUN KONSTRUKCIJE

■ Nelinearni utjecaji od deformacija

- Utjecaji deformacija na konstrukciju
- Kod analize prema teoriji II. reda za utjecaje od promjenjivih opterećenja
 - treba uzeti u obzir početni geometrijski oblik konstrukcije uslijed stalnog djelovanja "G+P" pri danoj temperaturi T_0 .
- Kod analize prema teoriji II. reda za GSU, utjecaji promjenjivih opterećenja
 - se trebaju odrediti koristeći *karakteristične* kombinacije opterećenja.
 - Ti se utjecaji mogu koristiti i kod provjera za GSN.
- Kod analize prema teoriji II. reda za nelinearno ponašanje konstrukcije (nelinearni odgovor) kod GSN,
 - potrebni stalni geometrijski oblik konstrukcije kod referentne temperature T_0 je potrebno kombinirati s naprezanjima uslijed " γ_G (G+P)".
 - Proračunske vrijednosti promjenjivih djelovanja $\gamma_Q Q_{k1} + \gamma_Q \psi_2 Q_{k1}$ se mogu primijeniti s odgovarajućim pretpostavkama za imperfekcije konstrukcije.

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA

GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

□ Prednapete šipke i elementi iz grupa B i C

- Proračunska vrijednost vlačne otpornosti F_{Rd} se određuje prema:

$$F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5 \cdot \gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right\}$$

- F_{uk} karakteristična vrijednost čvrstoće loma
- γ_R parcijalni faktor
- F_k karakteristična vrijednost dokazne čvrstoće vlačnih elemenata

Grupa	Odgovarajuća norma	Dokazna čvrstoća F_k
A	EN 10138-1	$F_{0,1k}$ *
B	EN 10264	$F_{0,2k}$
C	EN 10138-1	$F_{0,1k}$

* Za prednapete šipke pogledati EN 1993-1-1 i EN 1993-1-4

■ Napomene:

- F_{uk} odgovara karakterističnoj vrijednosti granične vlačne čvrstoće
- provjera za F_k osigurava da će element ostati elastičan kada djelovanja dostignu svoje proračunske vrijednosti. Za element (npr. zatvorena spiralna užad) gdje je $F_k \geq F_{uk} / 1,50$ provjera nije potrebna
- eksperimentalne vrijednosti F_{uke} i F_{uk} zadovoljavaju zahtjeve, prema EN 12385, dio 1: $F_{uke} > F_{uk}$; $F_{ke} > F_k$
- Parcijalni faktor γ_R može biti definiran u Nacionalnim aneksima. Njegova vrijednost ovisi o tome da li su na krajevima užadi primijenjene mjere za smanjivanje momenata savijanja uslijed rotacije. Preporučuju se vrijednosti
 - $\gamma_R = 0,9$ ako su mjere primijenjene
 - $\gamma_R = 1,0$ ako mjere nisu primijenjene

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI

□ Ograničenja naprezanja

■ za faze montaže

Faza gradnje	f_{const}
Prvi vlačni elementi unutar nekoliko sati	$0,60 \sigma_{uk}$
Poslije montaže ostalih vlačnih elemenata	$0,55 \sigma_{uk}$

- ograničenja naprezanja slijede iz:

$$F_{const} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \cdot \gamma_R \cdot \gamma_F} = \frac{0,66 \cdot \sigma_{uk}}{\gamma_R \cdot \gamma_F}$$

- $\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,10 = 1,10$ za kratkotrajne situacije
- $\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,20 = 1,20$ za dugotrajne situacije

■ za uvjete uporabe

Uvjeti opterećenja	f_{SLS}
Proračun zamora uključujući naprezanja od savijanja *	$0,50 \sigma_{uk}$
Proračun zamora bez naprezanja od savijanja *	$0,45 \sigma_{uk}$
* Naprezanja od savijanja se mogu reducirati razradom detalja.	

- ograničenja naprezanja slijede iz:

$$F_{const} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \cdot \gamma_R \cdot \gamma_F} = \frac{0,66 \cdot \sigma_{uk}}{\gamma_R \cdot \gamma_F}$$

- $\gamma_R \times \gamma_F = 0,9 \times 1,48 = 1,33$ sa napreznjima od savijanja
- $\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,48 = 1,48$ bez napreznja od savijanja

KONSTRUKCIJE S VLAČNIM ELEMENTIMA VIBRACIJE KABELA

- Za kabele izložene vanjskim utjecajima potrebno je provjeriti sve moguće vibracije izazvane vjetrom tijekom i nakon gradnje i njihov utjecaj na sigurnost.

- Aerodinamičke sile na kabele mogu uzrokovati slijedeći uzroci:

- mahovitost** (od turbulencija u protoku zraka)
- vrtiložna pobuda** (od von Karmanovih vrtloga iza kabela)
- galopiranje** (samopobuda)
- potaknuto galopiranje** (fluidno-elastična interakcija susjednih kabela)
- interakcija vjetra, kiše i kabela**

- Napomena:

- Galopiranje nije moguće kod kabela sa kružnim poprečnim presjekom zbog simetrije. Do te pojave može doći kod kabela gdje je došlo do promjene oblika uslijed formiranja slojeva leda ili prašine. Sile uslijed c), d) i e) su u funkciji gibanja kabela i uzrokuju aeroelastičnu nestabilnost koja vodi do vibracija većih amplituda počevši od kritične brzine vjetra. Kako se mehanizmi dinamičkog uzbuđivanja još ne mogu dovoljno točno modelirati u vidu dobivanja pouzdanih rezultata, potrebno je provesti mjere kako bi se te vibracije ograničile.

- Vibracije kabela mogu biti uzrokovane i

- dinamičkim silama koje djeluju na druge dijelove konstrukcije (greda, pilon).
- Ta pojava uzrokuje vibracije velikih amplituda gdje dolazi do preklapanja vlastitih frekvencija zatega i konstrukcije.

**SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE
SLJEDEĆE PREDAVANJE**

Telekomunikacijske strukture