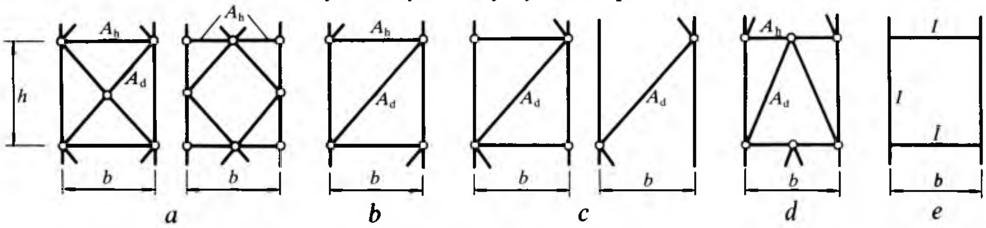
li se opća rješenja tih diferencijalnih jednadžbi, koja imaju četiri integracijske konstante, u sustav četiriju rubnih i prijelaznih uvjeta, dobit će se homogen sustav od četiri linearne algebarske jednadžbe s integracijskim konstantama kao nepoznanicama. Iz uvjeta da je determinanta matrice koeficijenata tog sustava jednadžbi jednaka nuli, slijedi

$$P_{kr} = k\frac{K}{L^2}. \tag{112}$$

Numeričke vrijednosti koeficijenta k kritične sile štapa u ovisnosti o parametrima λ i φ prema A. Voljmiru, nalaze se u tabl. 1.

Tablica 1
VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA k U JEDNADŽBI (112)

φ	λ			
	0,2	0,4	0,6	0,8
0,1	1,47	2,40	4,50	8,59
0,2	2,80	4,22	6,69	9,33
0,4	5,09	6,68	8,51	9,67
0,6	6,98	8,19	9,24	9,79
0,8	8,55	9,18	9,63	9,84



Sl. 22. Dispozicije štapova ispune raščlanjenih štapova

Raščlanjeni štapovi sastoje se od pojasa i štapova ispune (sl. 22); neka je b visina poprečnog presjeka štapa, h duljina polja, d duljina dijagonala, A_h površina presjeka horizontalnog, a A_d površina presjeka dijagonalnog štapa; I i $\bar{I}$ su momenti inercije presjeka pojasa odnosno prečke okvirnih štapova, a H duljina štapa.

Bočnoj podatljivosti raščlanjenih štapova osim fleksijske podatljivosti $1/K$ pridonosi i posmična podatljivost $1/K_s$.

Kritična sila raščlanjenih štapova određuje se metodom raščlambe sustava u podsustave:

$$P_{kr} = \frac{1}{\dfrac{1}{P_{kr,K}} + \dfrac{1}{P_{kr,K_s}}} = \frac{1}{1 + \dfrac{P_{kr,K}}{P_{kr,K_s}}} P_{kr,K}. \tag{113}$$

Kritična je sila fleksijski podatljivog, a posmično nepodatljivog podštapa:

$$P_{kr,K} = k\frac{K}{H^2}, \tag{114}$$

gdje je k koeficijent te kritične sile koji ovisi o ležajnim uvjetima štapa i, npr., za obostrano zglobno oslonjeni, tj. Eulerov štap II iznosi π^2, a K je fleksijska krutost EI presjeka štapa, utvrđena uz pretpostavku da vrijedi Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka. Označi li se s A_1 površina presjeka jednog pojasa, moment inercije I iznosi za dvopojasni štap $A_1 b^2/2$, za četveropojasni štap pravokutnog presjeka $A_1 b^2$, a za tropojasni štap istostraničnotrokutnog presjeka $A_1 b^2/2$. Kritična je sila posmično podatljivog, a fleksijski nepodatljivog podštapa:

$$P_{kr,K_s} = K_s. \tag{115}$$

Posmične podatljivosti $1/K_s$ presjeka raščlanjenih štapova na sl. 22 odredio je C. Petersen metodama statike, smatrajući pojase aksijalno nepodatljivima ($EA_1 = \infty$):

$$\frac{1}{K_s} = \begin{cases} \dfrac{1}{E}\left(\dfrac{d^3}{2A_d b^2 h} + \dfrac{b}{A_h h}\right) & \text{(sl. 22a)} \\ \dfrac{1}{E}\left(\dfrac{d^3}{A_d b^2 h} + \dfrac{b}{A_h h}\right) & \text{(sl. 22b)} \\ \dfrac{1}{E}\cdot\dfrac{d^3}{A_d b^2 h} & \text{(sl. 22c)} \\ \dfrac{1}{E}\left(\dfrac{2d^3}{A_d b^2 h} + \dfrac{b}{4A_h H}\right) & \text{(sl. 22d)} \\ \dfrac{1}{E}\left(\dfrac{h^2}{24I} + \dfrac{bh}{12\bar{I}}\right) & \text{(sl. 22e).} \end{cases} \tag{116}$$

Jednadžba (113) za kritičnu silu raščlanjenog štapa može se napisati i u obliku

$$P_{kr} = k_s k \frac{K}{H^2} = \pi^2 \frac{K}{(\beta H)^2}, \tag{117}$$

gdje je k koeficijent kritične sile $P_{kr,K}$ pripadnog posmično nepodatljivog štapa, a

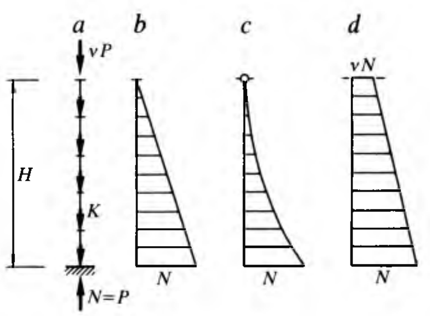
$$k_s = \frac{1}{1 + \dfrac{kK}{H^2 K_s}} \quad \text{i} \quad \beta = \frac{\pi}{\sqrt{k k_s}} \tag{118}$$

jesu: k_s bezdimenzijski koeficijent redukcije kritične sile $P_{kr,K}$ zbog posmične podatljivosti štapa i β bezdimenzijski koeficijent duljine izvijanja H_i štapa.

ŠTAPOVI S UZDUŽNOM SILOM PROMJENLJIVE VRIJEDNOSTI, A NEPROMJENLJIVA SMJERA

Konzola visine H i fleksijske krutosti K (sl. 23a) opterećena je jednoliko raspodijeljenim aksijalnim opterećenjem, kojemu pripada trokutan dijagram uzdužne sile (sl. 23b). Ista je konzola opterećena linearno prema dolje rastućim aksijalnim opterećenjem kojemu odgovara paraboličan dijagram uzdužne sile (sl. 23c). Konačno, ista je konzola opterećena aksijalnom silom na vrhu i jednoliko raspodijeljenim aksijalnim opterećenjem kojemu pripada trapezan dijagram uzdužne sile (sl. 23d). Pripadne vrijednosti koeficijenta β duljine izvijanja također su dane na sl. 23. Kritična vrijednost ukupnog opterećenja P i maksimalne uzdužne sile N iznosi:

$$P_{kr} = \pi^2 \frac{K}{(\beta H)^2}. \tag{119}$$



β	1,122	0,783	$\sqrt{\dfrac{1{,}218\,\nu}{0{,}794}}$

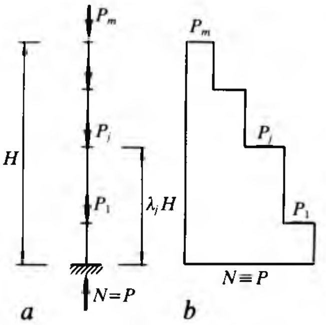
Sl. 23. Konzola s trokutnim, paraboličnim i trapeznim dijagramom uzdužne sile te pripadni koeficijenti duljine izvijanja

Ako je konzola opterećena nizom koncentriranih sila $P_j = \omega_j P$, gdje je $j = 1,2,\ldots,m$ (sl. 24a), ukupne vrijednosti P, onda je dijagram uzdužne sile stepeničasta linija (sl. 24b). Kritična se vrijednost ukupnog opterećenja P i maksimalne uzdužne sile N određuje primjenom metode raščlambe opterećenja. Ako bi djelovala samo sila P_j, njena bi kritična vrijednost bila:

$$P_{kr,j} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{K}{\lambda_j^2 H^2}. \tag{120}$$

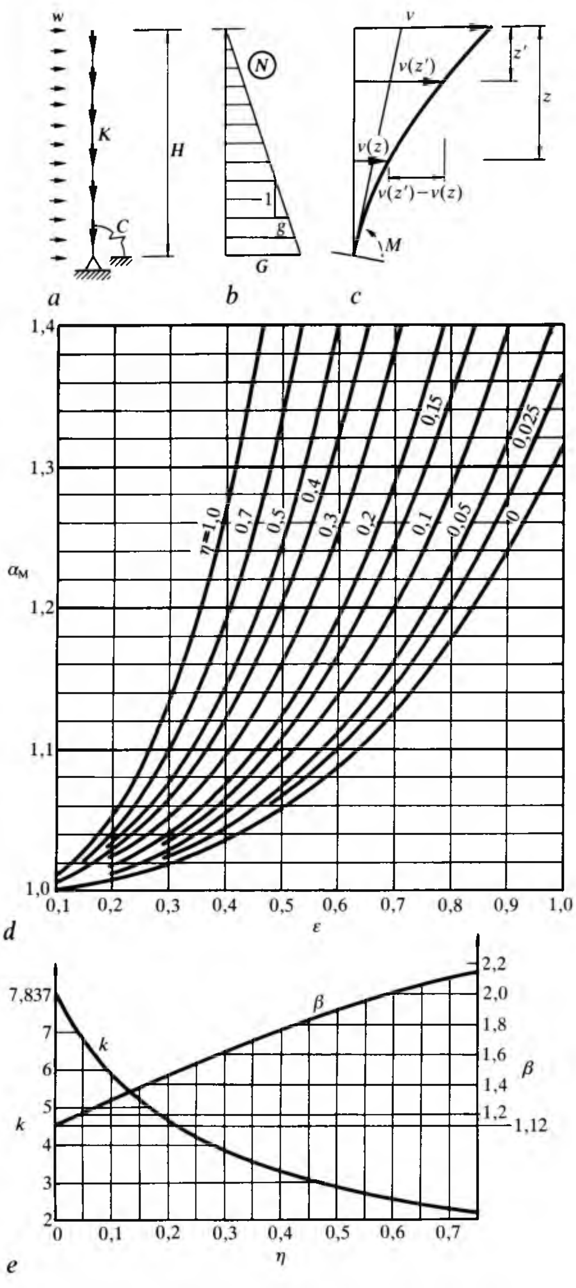
Za niz koncentriranih sila ukupna je kritična sila prema jednadžbi (43):

$$P_{\mathrm{kr}} = \frac{\pi^2}{4\sum_j \omega_j \lambda_j^2} \cdot \frac{K}{H^2} = k\frac{K}{H^2}. \tag{121}$$



Sl. 24. Konzola opterećena nizom koncentriranih aksijalnih sila (*a*) i pripadni dijagram uzdužne sile (*b*)

Elastično upeta konzola. Treba odrediti moment uklještenja i progib vrha elastično upete konzole visine H i fleksijske krutosti K na koju djeluje jednoliko raspodijeljeno aksijalno



Sl. 25. Konzola s jednoliko raspodijeljenim aksijalnim i jednoliko raspodijeljenim bočnim opterećenjem (*a*), dijagram uzdužne sile (*b*), progibna linija (*c*), dijagram koeficijenta povećanja momenta uklještenja (*d*) te dijagram koeficijenta kritične težine i koeficijenta duljine izvijanja (*e*)

opterećenje intenzivnosti g, ukupnog iznosa G, te jednoliko raspodijeljeno bočno opterećenje intenzivnosti w (sl. 25a). Krutost je pera C. Dijagram je uzdužne sile trokut (sl. 25b).

Parametri su sustava stupanj uklještenja η konzole i njen koeficijent labilnosti ε:

$$\eta = \frac{K}{CH}, \qquad \varepsilon = \frac{2}{3}H\sqrt{\frac{G}{K}}. \tag{122}$$

Da bi se odredila diferencijalna jednadžba progibne linije štapa (sl. 25c), postavlja se uvjet da je na koti z, moment savijanja unutrašnjih sila:

$$M_{\mathrm{i}} = K\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}z^2}, \tag{123}$$

jednak momentu savijanja vanjskih sila:

$$M_{\mathrm{a}} = g\int_0^z [v(z') - v(z)]\,\mathrm{d}z' + \frac{wz^2}{2}. \tag{124}$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe dobiva se pomoću Besselovih funkcija. Rubni su uvjeti diferencijalne jednadžbe ovi: na gornjem je kraju štapa zakrivljenost progibne linije jednaka nuli, a na donjem je kraju štapa nagib progibne linije jednak kutnom pomaku podloge.

Rješenjem zadatka dobiva se vrijednost momenta uklještenja:

$$M = \alpha_M \frac{wH^2}{2} = \alpha_M M^{\mathrm{I}}. \tag{125}$$

Numeričke vrijednosti koeficijenta α_M povećanja momenta uklještenja M^{I} mogu se očitati iz dijagrama na sl. 25d.

Rješenje je pripadnog homogenog zadatka:

$$G_{\mathrm{kr}} = k\frac{K}{H^2} = \pi^2\frac{K}{(\beta H)^2}. \tag{126}$$

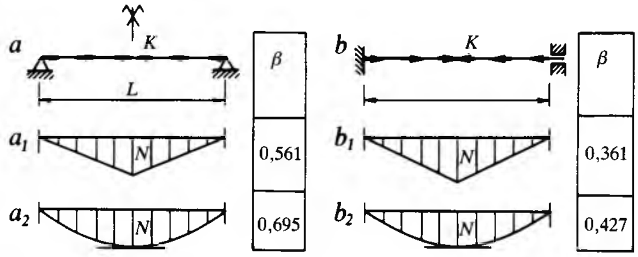
Numeričke vrijednosti koeficijenta k kritične težine i koeficijenta β duljine izvijanja mogu se očitati iz dijagrama na sl. 25e.

Progib je vrha konzole:

$$v = \frac{1}{1 - \dfrac{G}{G_{\mathrm{kr}}}}(1 + 4\eta)\frac{wH^4}{8K} = \alpha v^{\mathrm{I}} \tag{127}$$

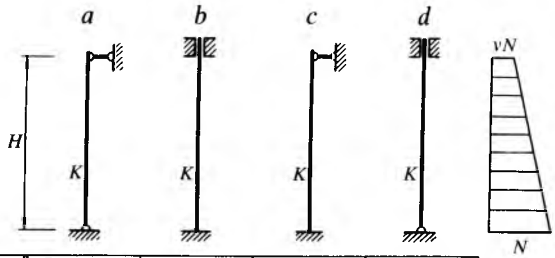
Ako je konzola potpuno uklještena ($C = \infty$), onda je $\eta = 0$, $k = 7{,}837$ i $\beta = 1{,}122$.

Štapovi pridržani na oba kraja. Na sl. 26 dani su koeficijenti β duljine izvijanja $L_{\mathrm{i}} = \beta L$: *a*) za obostrano zglobno oslonjen fleksijski štap (sl. 26a) s trokutnim (sl. 26a$_1$) odnosno paraboličkim dijagramom uzdužne sile (sl. 26a$_2$) i *b*) za obostano upet fleksijski štap (sl. 26b) s trokutnim (sl. 26b$_1$) odnosno paraboličnim dijagramom uzdužne sile (sl. 26b$_2$). Takvi dijagrami odgovaraju jednolikom, odnosno linearno promjenljivo raspodijeljenom aksijalnom opterećenju kojem se u polovištu raspona mijenja orijentaciju.



Sl. 26. Koeficijenti duljine izvijanja obostrano zglobno oslonjenog (*a*) i obostrano upetog štapa (*b*) s trokutnim i paraboličnim dijagramima uzdužne sile

Na sl. 27 navode se, prema R. L'Hermiteu, koeficijenti β duljine izvijanja $H_{\mathrm{i}} = \beta H$, i to za: *a*) obostrano zglobno oslonjeni (sl. 27a), *b*) obostrano upeti (sl. 27b) i *c*) na jednom kraju zglobno oslonjeni, a na drugom upeti (sl. 27c) i *d*) fleksijski štap na koji djeluje sila na vrhu i jednoliko raspodijeljeno opterećenje uzduž raspona, što odgovara trapeznom dijagramu uzdužne sile (sl. 27d).



β	$\sqrt{\frac{1+0{,}881v}{1{,}881}}$	$\sqrt{\frac{1+0{,}891v}{7{,}564}}$	$\sqrt{\frac{1+1{,}559v}{5{,}319}}$	$\sqrt{\frac{1+0{,}486v}{3{,}041}}$

Sl. 27. Koeficijenti duljine izvijanja obostrano zglobno oslonjenog, obostrano upetog i na jednom kraju zglobno oslonjenog, a na drugom upetog štapa s trapeznim dijagramom uzdužne sile

Štapovi na elastičnoj podlozi mogu imati nepomične ležaje na krajevima, biti bez posebnih ležaja na krajevima i imati elastične ležaje na krajevima.

Štap na elastičnoj podlozi i s nepomičnim ležajima na krajevima. Na štap duljine L i fleksijske krutosti K, koji se oslanja na elastičnu podlogu krutosti C' po jedinici duljine i s nepomičnim ležajima na krajevima djeluje linearno promjenljivo raspodijeljeno aksijalno opterećenje (sl. 28a). Dijagram opterećenja sastoji se od dvaju trokuta (sl. 28b). Označi li se rubna intenzivnost opterećenja sa p, bit će intenzivnost na mjestu x:

$$p_x = \frac{L-2x}{L} p. \tag{128}$$

Dijagram je uzdužne sile štapa (sl. 28c) paraboličan, a njezina je maksimalna vrijednost u polovištu raspona:

$$N = \frac{pL}{2}. \tag{129}$$

Kritičnu vrijednost N_{kr} uzdužne sile N u polovištu raspona izračunao je S. P. Timošenko metodom konzervacije energije.

Deformirani štap i sile koje na njega djeluju vide se na sl. 28d. Progib na mjestu x neka je v, pa će reakcija podloge biti $C'v$. Deformacijska energija sustava sastoji se od doprinosa štapa i podloge:

$$U_i = \frac{1}{2}\int_0^L K v''^2 \mathrm{d}x + \frac{1}{2}\int_0^L C' v^2 \mathrm{d}x, \tag{130}$$

a rad je opterećenja:

$$W_N = \int_0^L p_x \mathrm{d}x \int_0^x v'^2 \mathrm{d}x = \frac{2N}{L^2}\int_0^L (L-2x)\int_0^x v'^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}x =$$

$$= \frac{N}{L^2}\int_0^L x(L-x)\, v'^2 \mathrm{d}x. \tag{131}$$

Uvrste li se izrazi za U_i i W_N u (35), dobiva se

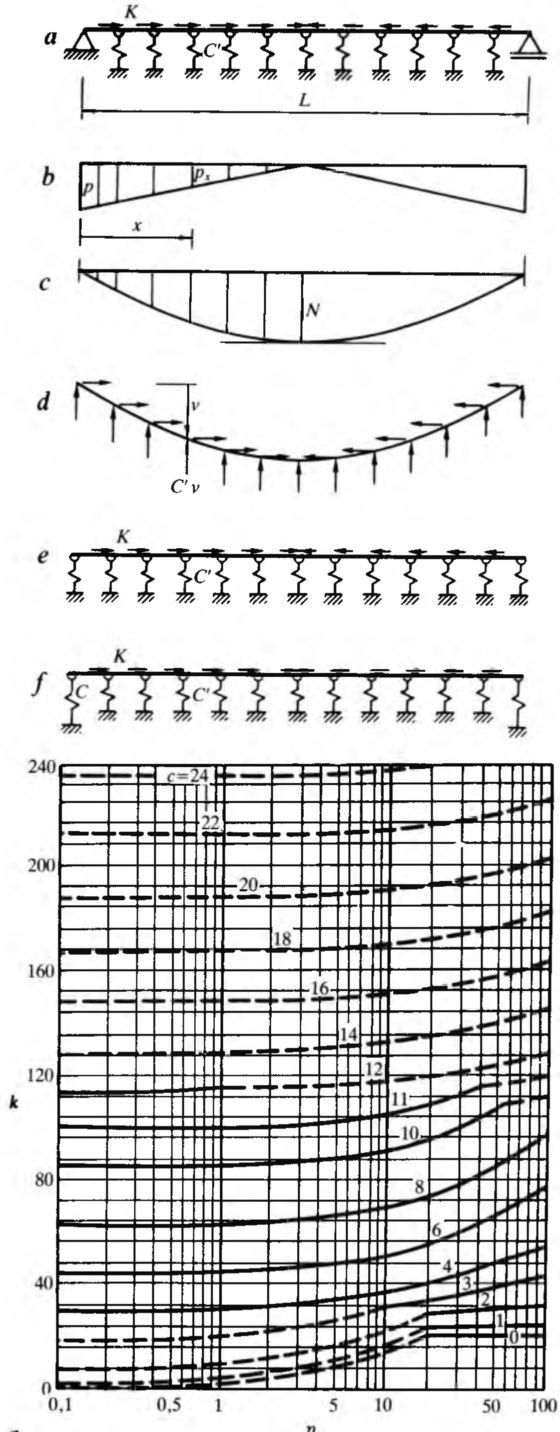
$$N = \frac{\int_0^L K v''^2 \mathrm{d}x + \int_0^L C' v^2 \mathrm{d}x}{\int_0^L x(L-x)\, v'^2 \mathrm{d}x} \cdot \frac{L^2}{2}. \tag{132}$$

Za nepoznatu progibnu liniju postavi se izraz u obliku beskonačnog trigonometrijskog reda:

$$v = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \sin\frac{j\pi x}{L}. \tag{133}$$

Izraz za v uvrsti se u jednadžbu (132), pa se konstante a_j odrede iz uvjeta za minimum funkcije N. Rješenje glasi:

$$N_{kr} = k\frac{K}{L^2} = \pi^2 \frac{K}{(\beta L)^2}, \tag{134}$$



Sl. 28. Štap na elastičnoj podlozi i zglobnim ležajima na krajevima (*a*), dijagram aksijalnog opterećenja (*b*), dijagram uzdužne sile (*c*), deformirani štap (*d*); štap na elastičnoj podlozi bez posebnih ležaja na krajevima (*e*); štap na elastičnoj podlozi s koncentriranim elastičnim ležajima na krajevima (*f*) i dijagram koeficijenta kritične sile toga štapa (*g*)

gdje su:

$$k = \pi^2 \frac{1+\frac{C'L^4}{\pi^4 K}}{2\left(\frac{\pi^2}{3}-1\right)}, \qquad \beta = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{2\left(\frac{\pi^2}{3}-1\right)}{1+\frac{C'L^4}{\pi^4 K}}}. \tag{135}$$

Za niz vrijednosti parametra $C'L^4/(16K)$ sustava dane su numeričke vrijednosti koeficijenta β u tabl. 2.

Štap na elastičnoj podlozi bez ležaja na krajevima (sl. 28e) A. Umanskij je riješio analogno prethodnom slučaju s nepomičnim ležajima na krajevima. Za niz vrijednosti parametra $C'L^4/(16K)$ sustava dane su vrijednosti koeficijenta β duljine izvijanja štapa u tabl. 3.

Štap na elastičnoj podlozi i s elastičnim ležajima na krajevima (sl. 28f). Krutost podloge po jedinici duljine označena je sa C', a krutost ležaja na krajevima sa C. Prema C. Petersenu za kritičnu vrijednost uzdužne sile vrijedi jednadžba (134), s time da se koeficijent kritične sile očita iz dijagrama na sl. 28g kao funkcija parametara sustava:

$$\eta = \frac{CL^3}{2K}, \qquad c = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{C'L^4}{K}}, \tag{136}$$

gdje se pune linije c odnose na simetrične, a isprekidane na antimetrične linije izvijanja.

Za $\eta = 0$ sustav degenerira u sustav na sl. 28e, a za $\eta = \infty$ u sustav na sl. 28a.

pravcu osi štapa prije deformacije (sl. 30). Neka je duljina štapa h, udaljenost pola R od donjeg kraja štapa a, a krutost pera C. Deformacija je sustava opisana kutnim pomakom v štapa. Uvjet ravnoteže, da je zbroj momenata s obzirom na donji kraj štapa (točka O) jednak nuli:

$$\Sigma M_{(O)} = 0, \tag{138}$$

daje

$$Cv - \frac{ah\sin v}{\sqrt{a^2 + h^2 + 2ah\cos v}} P = 0. \tag{139}$$

Kako su deformacije građevnih konstrukcija uvijek vrlo malene, može se uz dovoljnu točnost postaviti da je $\sin v = v$ i $\cos v = 1$, pa se jednadžba (139) može napisati u obliku

$$\left(C - \frac{ah}{a+h} P\right) v = 0. \tag{140}$$

Tablica 2

VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA β ZA ŠTAP NA ELASTIČNOJ PODLOZI I S NEPOMIČNIM LEŽAJIMA NA KRAJEVIMA

$\frac{C'L^4}{16K}$	0	5	10	15	20	50	100	150	200	300	500	1000
β	0,69	0,52	0,44	0,39	0,36	0,32	0,29	0,26	0,25	0,22	0,20	0,17

Tablica 3

VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA β ZA ŠTAP NA ELASTIČNOJ PODLOZI BEZ LEŽAJA NA KRAJEVIMA

$\frac{C'L^4}{16K}$	0	1	3	5	10	15	20	50	100	150	200	300	500	1000
β	∞	2,22	1,28	0,99	0,70	0,57	0,54	0,43	0,34	0,28	0,26	0,24	0,21	0,18

Konzola promjenljiva presjeka. Konzola stepeničasto promjenljiva presjeka opterećena je dvjema aksijalnim silama (sl. 29) ukupne vrijednosti P.

Kritična je vrijednost ukupnog opterećenja

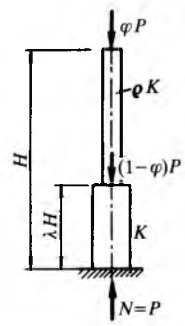
$$P_{\mathrm{kr}} = k\frac{K}{H^2}. \tag{137}$$

Numeričke vrijednosti koeficijenta $k(\lambda, \varphi, \varrho)$ kritičnog opterećenja prema N. Snitku nalaze se u tabl. 4. Opaža se da smanjenje krutosti konzole u njenu gornjem dijelu znatno smanjuje vrijednost kritičnog opterećenja.

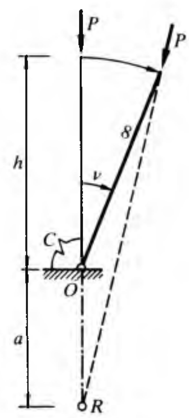
Tablica 4

VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA k U JEDNADŽBI (137)

λ	φ	ϱ			
		0,02	0,1	0,6	1
0,9	0,2	2,89	2,92	2,92	2,92
	0,6	2,56	2,66	2,69	2,69
	1,0	1,74	2,43	2,46	2,47
0,8	0,2	3,24	3,46	3,50	3,50
	0,6	1,61	2,72	2,89	2,92
	1,0	1,02	2,16	2,43	2,47
0,6	0,2	1,44	4,33	5,20	5,24
	0,6	0,49	1,82	3,20	3,42
	1,0	0,29	1,12	2,25	2,47
0,4	0,2	0,52	2,53	7,34	8,35
	0,6	0,22	1,00	3,03	3,84
	1,0	0,14	0,61	1,88	2,47



Sl. 29. Konzola promjenljiva presjeka



Sl. 30. Nedeformabilna elastično upeta konzola opterećena polnom silom

ŠTAPOVI S UZDUŽNOM SILOM KONSTANTNE VRIJEDNOSTI, A PROMJENLJIVA SMJERA

Nedeformabilna elastično upeta konzola. A. Ržanicin je analizirao stabilnost ravnoteže nedeformabilne elastično upete konzole opterećene polnom silom P, tj. silom koja i pri deformaciji sustava uvijek prolazi istom točkom, polom, na

U stanju bifurkacije ravnoteže ($P = P_{\mathrm{kr}}$) izraz među zagradama mora biti jednak nuli, pa je

$$P_{\mathrm{kr}} = \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{a}\right) C. \tag{141}$$

Ako sila ne mijenja smjer, npr. ako je P gravitacijska sila, onda je $a = \infty$, pa je $P_{\mathrm{kr}} = C/h$, što je u skladu s jednadžbom (50). Ako sila djeluje uvijek uzduž osi štapa onda je $a = 0$, pa je $P_{\mathrm{kr}} = \infty$.

Konzola opterećena preko pendela. Konzolni stup visine h i fleksijske krutosti K aksijalno je opterećen silom P preko pendela (sl. 31a). K.-H. Roik je utvrdio kritičnu vrijednost sile P pri kojoj se pojavljuje bifurkacija ravnoteže.

Neka progib vrha konzole bude označen sa v, a progib na koti z sa v_z (sl. 31b). Diferencijalna jednadžba progibne linije konzole (sl. 31c) formulira se na osnovi jednakosti unutrašnjeg momenta savijanja

$$M_{\mathrm{i}z} = K v_z'' \tag{142}$$

na koti z i vanjskog momenta savijanja

$$M_{az} = \left[v_z + \frac{v}{a}z - \left(1 + \frac{h}{a}\right)v\right]P \tag{143}$$

također na toj koti. Rubni su uvjeti:

$$v_0 = 0, \qquad v_0' = 0, \qquad v_h = v. \tag{144}$$

Kad se u opće rješenje diferencijalne jednadžbe uvrste rubni uvjeti (144), dobiva se homogen sustav od tri linearne algebarske jednadžbe; nepoznanice su dvije integracijske konstante i progib v vrha konzole. Uvjet da determinanta koeficijenata tog sustava bude jednaka nuli daje, uz oznaku

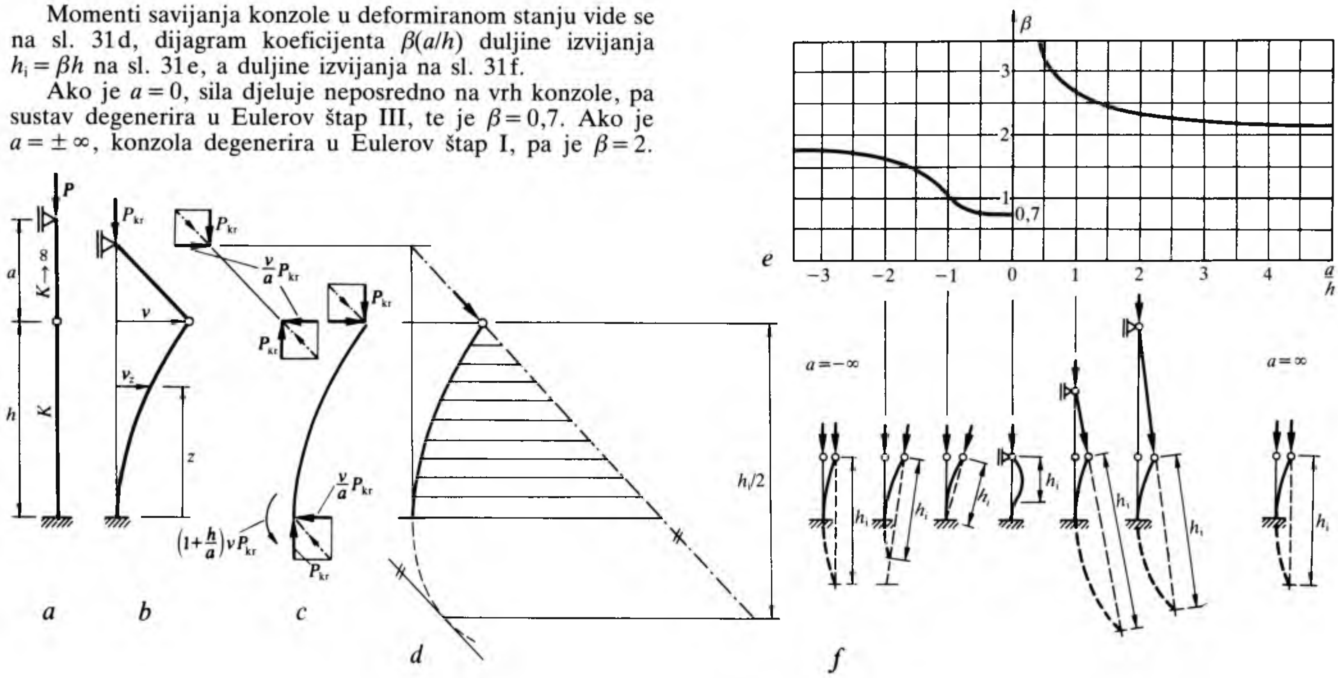
$$\varepsilon_{kr} = h\sqrt{\frac{P_{kr}}{K}} \tag{145}$$

za kritičnu vrijednost koeficijenta labilnosti štapa, kriterij stabilnosti

$$\frac{\varepsilon_{kr}}{\tan\varepsilon_{kr}} = \frac{1}{1 + a/h}. \tag{146}$$

Momenti savijanja konzole u deformiranom stanju vide se na sl. 31d, dijagram koeficijenta $\beta(a/h)$ duljine izvijanja $h_i = \beta h$ na sl. 31e, a duljine izvijanja na sl. 31f.

Ako je $a = 0$, sila djeluje neposredno na vrh konzole, pa sustav degenerira u Eulerov štap III, te je $\beta = 0{,}7$. Ako je $a = \pm\infty$, konzola degenerira u Eulerov štap I, pa je $\beta = 2$.



Sl. 31. Konzola opterećena preko pendela (a), deformacija sustava (b), akcija na pendel i na konzolu (c), momenti savijanja u izvinutom stanju (d), dijagram koeficijenta $\beta(a/h)$ duljine izvijanja (e) i duljine izvijanja (f)

Ako je $a = -h$, pravac sile uvijek prolazi donjim krajem konzole, pa ona degenerira u Eulerov štap II, te je $\beta = 1$. Analiza pokazuje da je ponašanje konzole najnepovoljnije ako je $0 \leqq a/h \leqq 2$, jer tada h_i ima najveću vrijednost.

TANKOZIDNI KONZOLNI STUP

Treba utvrditi kritičnu vrijednost ukupnog opterećenja tankozidnog konzolnog stupa (sl. 32). Značenje oznaka: z je os krutosti stupa, g os mase ili težišna os stupa, H visina stupa, x i y su glavne osi poprečnog presjeka stupa, x_G i y_G koordinate osi mase, I_x i I_y momenti inercije poprečnog presjeka stupa za smjerove x i y, a I_z deplanacijski moment inercije poprečnog presjeka stupa s obzirom na os z, r je polumjer inercije poprečnog presjeka stupa s obzirom na os z, G ukupno opterećenje stupa i D os rotacije stupa pri izvijanju.

Bezdimenzijski su geometrijski parametri poprečnog presjeka stupa

$$t_y = \frac{I_y}{I_x}, \qquad t_z = \frac{I_z}{r^2 I_x}. \tag{147}$$

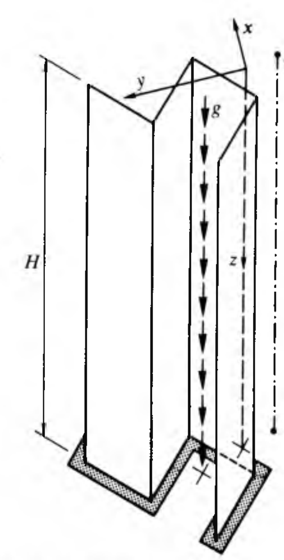
Pretpostavlja se da se pri izvijanju oblik poprečnih presjeka ne mijenja; u praksi se nepromjenljivost oblika poprečnih presjeka ostvaruje poprečnim dijafragmama (u zgradama stropnim diskovima).

Koaksijalni stupovi. Tako se nazivaju stupovi kojima se poklapaju težišna os i os krutosti ($z \equiv g$). Tu spadaju dvostrukoravninskosimetrični, kososimetrični i cikličkosimetrični profili.

Međusobno su neovisna izvijanja u smjeru osi x i y, odnosno preciznije, u glavnim ravninama xz i yz, te torzijsko izvijanje oko osi z. Prema tome, ukupno kritično opterećenje koje izvija u smjeru x, ukupno kritično opterećenje koje izvija u smjeru y te ukupno kritično opterećenje koje torzijski izvija oko osi z iznose:

$$G_{kr,x} = k\frac{K_x}{H^2}, \qquad G_{kr,y} = t_y G_{kr,x}, \qquad G_{kr,z} = t_z G_{kr,x} \tag{148}$$

gdje je $K_x = EI_x$ fleksijska krutost presjeka štapa u smjeru x, a koeficijent k kritične sile ovisi o rasporedu opterećenja uzduž visine stupa (v. *Eulerovi štapovi* i *Konzola* u ovom članku). Mjerodavna je, dakako, najmanja od tih triju vrijednosti.



Sl. 32. Tankozidni konzolni stup