ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ
СОФИЯ

Том Volume 51 2018 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY
SOFIA

Получена: 15.09.2017 г.
Приета: 13.11.2017 г.

НОМОГРАМИ ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА СИМЕТРИЧНИ ДВОЙНО Т-ОБРАЗНИ СТОМАНОБЕТОННИ СЕЧЕНИЯ С РАЗПРЕДЕЛЕНА АРМИРОВКА, ПОДЛОЖЕНИ НА ДЕЙСТВИЕТО НА ОГЪВАЩ МОМЕНТ И ОСОВА СИЛА ПО ЕВРОКОД 2

В. Янчев[1]

Ключови думи: *номограми, деформации, напрежения*

РЕЗЮМЕ

За решаване на поставената задача е приета правоъгълна работна диаграма на бетона и работна диаграма на армировъчната стомана – билинейна с хоризонтален горен клон. При тези работни диаграми са изведени зависимости за определяне на носещата способност на симетрични двойно Т-образни стоманобетонни сечения, подложени на действието на огъващ момент и осова сила по Еврокод 2 при симетрична армировка. Армировката е разпределена по равно във всеки от поясите и в стеблото. За да се постигне икономично решение цялата вложена армировка, включително и равномерно разпределената армировка в стеблото, е отчетена в изразите $m_{Ed} = f\left(\omega_{tot}\right)$ и $n_{Ed} = f\left(\omega_{tot}\right)$ за всяка от разглежданите прави на деформирано състояние. На базата на тези зависимости са разработени номограми за оразмеряване на разглеждания тип сечения при различни класове бетон, стомана клас B500 и при фиксирани стойности на d_1/h, $B = b_f/b$ и $H = h_f/h$. За да се покаже работата с номограмите, е разгледан конкретен пример.

[1] Владимир Янчев, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vladimir_yanchev@abv.bg

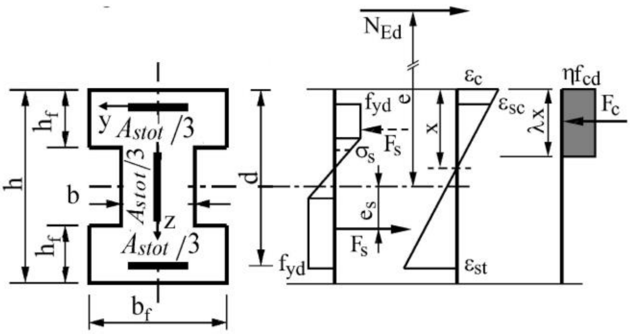
1. Въведение

Стоманобетонните елементи със симетрично двойно Т-образно напречно сечение се срещат често в строителната практика.

Задачата за оразмеряване се състои в избиране на такава деформирана равнина на сечението, при която да бъдат изпълнени условията на равновесие – фиг. 1.

$$N_{Ed} = N_{Rd}\,; \quad M_{Ed} = M_{Rd}\,, \tag{1}$$

където N_{Ed} и M_{Ed} са изчислителните разрезни усилия от външни въздействия при различни комбинации на натоварване, а N_{Rd} и M_{Rd} са нормална сила и момент на носимоспособност, които съответстват на избраната деформирана равнина на сечението.



Фиг. 1. Симетрично двойно Т-образно сечение

Приета е правоъгълната работна диаграма на бетона от [2]. Работната диаграма на армировъчната стомана е приета билинейна с хоризонтален горен клон, без да се ограничава деформацията на стоманата [2]. Въведени са бездименсионните величини:

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_f h^2 \eta f_{cd}}; \; n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b_f h \eta f_{cd}}; \; B = \frac{b_f}{b}; \; H = \frac{h_f}{h}; \; \omega_{tot} = \frac{A_{s,tot} f_{yd}}{b_f h \eta f_{cd}}; \; Z = \frac{z}{h}, \tag{2}$$

където M_{Ed} е изчислителна стойност на огъващия момент в сечението в N.mm;

N_{Ed} – изчислителна стойност на нормалната сила (опън или натиск) в разглежданото сечение, N;

f_{cd} – изчислителна стойност на цилиндричната якост на натиск на бетона, MPa;

f_{yd} – изчислителна стойност на границата на провлачане на стоманата, MPa;

b, h, b_f, h_f – геометрични размери на симетричното двойно Т-образно сечение**,** mm;

$A_{s,tot}$ – площ на напречното сечение на цялата армировка в сечението, mm^2;

ω_{tot} – физико-механичен коефициент на армиране;

Z – бездименсионна стойност на координатата z .

Въведени са още следните означения:

ε_{s1} – деформация на опънатата, по-силно опънатата или по-слабо натиснатата поясна армировка;

ε_{s2} – деформация на натиснатата, по-силно натиснатата или по-слабо опънатата поясна армировка;

ε_c – деформация на натиснатия или по-силно натиснатия ръб на сечението;

σ_{s1} – напрежение в опънатата, по-силно опънатата или по-слабо натиснатата поясна армировка, MPa;

σ_{s2} – напрежение в натиснатата, по-силно натиснатата или по-слабо опънатата поясна армировка, MPa;

ξ – относителна височина на натисковата зона, съответстваща на разглежданата гранична права на деформациите;

σ_s – напрежение в разпределената армировка с координата Z, зависещо от разглежданата гранична права на деформациите, MPa;

Z_1 – стойност на бездименсионната координата Z, която съответства на достигане на натисково напрежение f_{yd} в разпределената армировка в стеблото;

Z_2 – стойност на бездименсионната координата Z, която съответства на достигане на опънно напрежение в разпределената армировка в стеблото, равно на f_{yd};

d_1, d_2 – разстояние от центъра на тежестта на съответната поясна армировка до най-близкия ръб на сечението (долен или горен), mm; за разглеждания случай на симетрично армиране е в сила $d_1 = d_2$;

dA_s – елементарна площ на армировката от израза $dA_s = \dfrac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}dz$.

2. Гранични прави на деформациите и основни зависимости

За всяка от разгледаните в [1] гранични прави, са изведени изрази за намиране на съответните стойности на m_{Ed} и n_{Ed} при фиксирани стойности на ω_{tot}, $d_1/h = d_2/h$, $B = b_f/b$ и $H = h_f/h$.

– **права A'** е с параметри: $\xi_{A'} = 0$; $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \infty$; $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd}$;

$$n_{Ed} = \omega_{tot}, \tag{3}$$

$$m_{Ed} = 0; \tag{4}$$

– **права B'** − минава през т. B и е с параметри: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu3} = -3{,}5‰$; $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd}$;

$$\xi_{B'} = \frac{\left|\varepsilon_{cu3}\right|}{\left|\varepsilon_{cu3}\right| + \varepsilon_{yd}} \cdot \frac{d_1/h}{1-d_1/h};\quad \varepsilon_{s1} = \left(\left|\varepsilon_{cu3}\right| + \varepsilon_{yd}\right)\frac{1-d_1/h}{d_1/h} - \left|\varepsilon_{cu3}\right| > \varepsilon_{yd};\quad \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{yd}.$$

От (1), като се използват бездимензионните величини (2), се получава

$$n_{Ed} = \omega_{tot} - \frac{\lambda\chi_5}{\chi_5 + 1} \cdot \frac{d_1}{h}\,, \tag{5}$$

$$m_{Ed} = 0,5\frac{\lambda\chi_5}{\chi_5 + 1} \cdot \frac{d_1}{h}\left[1 - \frac{\lambda\chi_5}{\chi_5 + 1} \cdot \frac{d_1}{h}\right], \text{ където } \quad \chi_5 = \frac{E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|}{f_{yd}}\,. \tag{6}$$

– **права C'** − минава през т. B и е с параметри: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu3} = -3,5‰$;

$$\xi_{C'} = \frac{d_1/h}{1 - d_1/h}\,; \quad \varepsilon_{s1} = \left|\varepsilon_{cu3}\right|\frac{1 - 2d_1/h}{d_1/h} > \varepsilon_{yd}\,; \quad \varepsilon_{s2} = 0\,; \quad \sigma_{s1} = f_{yd}\,; \quad \sigma_{s2} = 0\,;$$

$$\sigma_{sC'} = -E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|\frac{z}{d_1} \le f_{yd}\,; \quad Z_{2C'} = \frac{d_1/h}{\chi_5}\,;$$

$$N_{Rd,C'} = -\int\limits_{h_f - d_1}^{\max\left(z_{2C'};\, h_f - d_1\right)} \sigma_{sC'}\, dA_s + f_{yd}\int\limits_{\max\left(z_{2C'};\, h_f - d_1\right)}^{h - d_1 - h_f} dA_s + \frac{A_{s,tot}}{3} f_{yd} - \lambda b_f d_1 \eta f_{cd}\,;$$

$$M_{Rd,C'} = \int\limits_{h_f - d_1}^{\max\left(z_{2C'};\, h_f - d_1\right)} \sigma_{sC'}\left(0,5h - d_1 - z\right)dA_s - f_{yd}\int\limits_{\max\left(z_{2C'};\, h_f - d_1\right)}^{h - d_1 - h_f}\left(0,5h - d_1 - z\right)dA_s +$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3} f_{yd}\left(0,5h - d_1\right) + 0,5\lambda b_f d_1 \eta f_{cd}\left(h - \lambda d_1\right);$$

От (1), като се използват бездимензионните величини (2), се получава

$$n_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1 - 2H)}\left\{\frac{\max\left[0; \chi_5\left(Z_{2C'} + H - d_1/h\right)\left(Z_{2C'} - H + d_1/h\right)\right]}{2\,d_1/h} +\right.$$

$$\left. + \left[1 - \frac{d_1}{h} - H - \max\left(Z_{2C'}; H - \frac{d_1}{h}\right)\right]\right\} + \frac{1}{3}\omega_{tot} - \lambda\frac{d_1}{h}\,, \tag{7}$$

$$m_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1 - 2H)}\left\{0,5\left(1 - \frac{d_1}{h} - H\right)^2 - 0,5\left[\max\left(Z_{2C'}; H - \frac{d_1}{h}\right)\right]^2 -\right.$$

$$\left. -\left(0,5 - \frac{d_1}{h}\right)\left[1 - \frac{d_1}{h} - H - \max\left(Z_{2C'}; H - \frac{d_1}{h}\right)\right]\right\} -$$

$$-\frac{\chi_5\omega_{tot}\left(0,5-d_1/h\right)}{6\left(1-2H\right)d_1/h}\max\left\{0;\left[Z_{2C'}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\right\}+$$

$$+\frac{\chi_5\omega_{tot}}{9\left(1-2H\right)d_1/h}\max\left\{0;\left[Z_{2C'}^3-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^3\right]\right\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+0,5\lambda\frac{d_1}{h}\left[1-\lambda\frac{d_1}{h}\right], \tag{8}$$

– **права FL2** − минава през т. B и е с параметри:

$$\varepsilon_c=\varepsilon_{cu3}=-3,5‰;\quad \xi_{FL2}=\frac{H}{\lambda\left(1-d_1/h\right)};\quad \varepsilon_{s1}=\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left(\frac{1-d_1/h}{H/\lambda}-1\right)>\varepsilon_{yd};$$

$$\left|\varepsilon_{s2}\right|=\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left(1-\lambda\frac{d_1/h}{H}\right);\quad \sigma_{s1}=f_{yd};\quad \sigma_{s2}\le f_{yd};$$

$$\sigma_{sFL2}=E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left[1-\frac{Z+d_1/h}{\xi_{FL2}\left(1-d_1/h\right)}\right]\le f_{yd};\quad Z_{2FL2}=\frac{H\left(\chi_5+1\right)}{\lambda\chi_5}-\frac{d_1}{h};$$

$$N_{Rd,FL2}=-\int_{h_f-d_1}^{z_{2FL2}}\sigma_{sFL2}dA_s+f_{yd}\int_{z_{2FL2}}^{h-d_1-h_f}dA_s+\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}-b_fh_f\eta f_{cd};$$

$$M_{Rd,FL2}=\int_{h_f-d_1}^{z_{2FL2}}\sigma_{sFL2}\left(0,5h-d_1-z\right)dA_s-f_{yd}\int_{z_{2FL2}}^{h-d_1-h_f}\left(0,5h-d_1-z\right)dA_s+$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3}\left(f_{yd}+E_s\left|\varepsilon_{s2}\right|\right)\left(0,5h-d_1\right)+0,5b_fh_f\eta f_{cd}\left(h-h_f\right);$$

От (1), като се използват бездименсионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left[-\left(\chi_5+1\right)\left(Z_{2FL2}-H+\frac{d_1}{h}\right)+\chi_5\frac{\left(Z_{2FL2}+d_1/h\right)^2-H^2}{2\xi_{FL2}\left(1-d_1/h\right)}\right]+$$

$$+\frac{1}{3}\left[2-\chi_5\left(1-\lambda\frac{d_1/h}{H}\right)\right]\omega_{tot}-H,\ \text{където}\ \ \chi_5\left(1-\lambda\frac{d_1/h}{H}\right)\le 1, \tag{9}$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\chi_5\left(1-\lambda\frac{d_1/h}{H}\right)\left(Z_{2FL2}-H+\frac{d_1}{h}\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-\right.$$

$$-0,5\chi_5\left[Z_{2FL2}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{\xi_{FL2}\left(1-d_1/h\right)}\right]+\frac{\chi_5\left[Z_{FL2}^3-\left(H-d_1/h\right)^3\right]}{3\xi_{FL2}\left(1-d_1/h\right)}-$$

$$-0,5\left(H-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)+0,5Z_{2FL2}\left(1-2\frac{d_1}{h}-Z_{2FL2}\right)\Bigg\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left[1+\chi_5\left(1-\lambda\frac{d_1/h}{H}\right)\right]\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+0,5H\left[1-H\right], \qquad (10)$$

– **права E** – минава през т. B и е с параметри: $\varepsilon_c=\varepsilon_{cu3}=-3,5‰$;

$$\xi_E=\frac{\left|\varepsilon_{cu3}\right|/\left(\left|\varepsilon_{cu3}\right|-\left|\varepsilon_{yd}\right|\right)}{\left(d_1/h\right)^{-1}-1}; \quad \varepsilon_{s1}=\left|\varepsilon_{cu3}\right|\frac{1-\xi_E}{\xi_E}>\varepsilon_{yd}; \quad \left|\varepsilon_{s2}\right|=\left|\varepsilon_{yd}\right|;$$

$$\sigma_{s1}=\sigma_{s2}=f_{yd}; \;\; \sigma_{sE}=E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left[1-\frac{Z+d_1/h}{\xi_E\left(1-d_1/h\right)}\right]\le f_{yd}; \;\; Z_{2E}=\frac{2\,d_1/h}{\chi_5-1};$$

$$N_{Rd,E}=-\int_{h_f-d_1}^{z_{2E}}\sigma_{sE}\,dA_s+f_{yd}\int_{z_{2E}}^{h-d_1-h_f}dA_s-b\lambda x_E\eta f_{cd}-\left(b_f-b\right)\min\left(h_f;\lambda x_E\right)\eta f_{cd};$$

$$M_{Rd,E}=\int_{h_f-d_1}^{z_{2E}}\sigma_{sE}\left(0,5h-d_1-z\right)dA_s-f_{yd}\int_{z_{2E}}^{h-d_1-h_f}\left(0,5h-d_1-z\right)dA_s+\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}\left(h-2d_1\right)+$$

$$+0,5b\lambda x_E\eta f_{cd}\left(h-\lambda x_E\right)+0,5\left(b_f-b\right)\min\left(h_f;\lambda x_E\right)\eta f_{cd}\left[h-\min\left(h_f;\lambda x_E\right)\right];$$

От (1), като се използват бездимензионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left[1+\left(\chi_5-1\right)H+\chi_5\frac{\left(Z_{2E}+d_1/h\right)^2-H^2}{2\xi_E\left(1-d_1/h\right)}-\right.$$

$$\left.-\left(\chi_5+1\right)\left(Z_{2E}+\frac{d_1}{h}\right)\right]-\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)/B-(1-1/B)\min\left[H;\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)\right], \qquad (11)$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\Bigg\{\chi_5\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_E\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(Z_{2E}-H+\frac{d_1}{h}\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-$$

$$-0,5\chi_5\left[Z_{2E}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{\xi_E\left(1-d_1/h\right)}\right]+\frac{\chi_5\left[Z_{2E}^3-\left(H-d_1/h\right)^3\right]}{3\xi_E\left(1-d_1/h\right)}-$$

$$-0,5\left(H-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)+0,5Z_{2E}\left(1-2\frac{d_1}{h}-Z_{2E}\right)\Bigg\}+\frac{1}{3}\left(1-2\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+$$

$$+0,5\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)\left[1-\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)\right]/B+$$

$$+0,5\left(1-1/B\right)\min\left[H;\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)\right]\left\{1-\min\left[H;\lambda\xi_E\left(1-d_1/h\right)\right]\right\}, \qquad (12)$$

– **права E1 -** характеризира се от:

$$\xi_{E1}=\frac{0,5}{1-d_1/h}; \qquad \sigma_{sE1}=E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left[1-2\left(Z+\frac{d_1}{h}\right)\right]\le f_{yd}; \qquad Z_{1E1}=0,5\frac{\chi_5-1}{\chi_5}-\frac{d_1}{h};$$

$$n_{Ed}=-\frac{\lambda\xi_{E1}\left(1-d_1/h\right)}{B}-\left(1-\frac{1}{B}\right)H, \qquad (13)$$

- при $Z_{1E1}\le H-d_1/h$:

Второто равновесно условие от (1) може да се представи във вида

$$m_{Ed}=\frac{2\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\int_{H-d_1/h}^{0,5-d_1/h}\frac{\sigma_{sE1}}{f_{yd}}\left(0,5-\frac{d_1}{h}-Z\right)dZ+\frac{\omega_{tot}}{3}\left(1-2d_1/h\right)+$$

$$+\frac{0,5\lambda\xi_{E1}\left(1-d_1/h\right)\left[1-\lambda\xi_{E1}\left(1-d_1/h\right)\right]}{B}+0,5\left(1-\frac{1}{B}\right)H\left(1-H\right) \text{ или}$$

$$m_{Ed}=\frac{2\omega_{tot}\chi_5}{3\left(1-2H\right)}\left\{\frac{2}{3}\left[\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)^3-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^3\right]-\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-2H\right)\left(H-\frac{d_1}{h}\right)\right\}+$$

$$+\frac{\omega_{tot}}{3}\left(1-2d_1/h\right)+\frac{0,25\lambda\left(1-0,5\lambda\right)}{B}+0,5\left(1-\frac{1}{B}\right)H\left(1-H\right), \qquad (14a)$$

- при $Z_{1E1}>H-d_1/h$:

Второто равновесно условие от (1) се представя във вида

$$m_{Ed}=\frac{2\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\int_{H-d_1/h}^{Z_{1E1}}\left(0,5-\frac{d_1}{h}-Z\right)dZ+\int_{Z_{1E1}}^{0,5-d_1/h}\frac{\sigma_{sE1}}{f_{yd}}\left(0,5-\frac{d_1}{h}-Z\right)dZ\right\}+$$

$$+\frac{\omega_{tot}}{3}\left(1-2d_1/h\right)+\frac{0,25\lambda\left(1-0,5\lambda\right)}{B}+0,5\left(1-\frac{1}{B}\right)H\left(1-H\right) \text{ или}$$

$$m_{Ed}=\frac{2\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(0,5\frac{\chi_5-1}{\chi_5}-H\right)-0,5\left[Z_{1E1}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\right\}+$$

$$+\frac{2\omega_{tot}\chi_5}{3(1-2H)}\left\{\frac{2}{3}\left[\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)^3-Z_{1E1}^3\right]-\frac{0,5-d_1/h}{\chi_5}\left(0,5-\frac{d_1}{h}-\frac{0,5}{\chi_5}\right)\right\}+$$

$$+\frac{\omega_{tot}}{3}\left(1-2d_1/h\right)+\frac{0,25\lambda(1-0,5\lambda)}{B}+0,5\left(1-\frac{1}{B}\right)H(1-H), \tag{14b}$$

– **права F** – минава през т. B и е с параметри: $\varepsilon_c=\varepsilon_{cu3}$; $\xi_F=\chi_5/(\chi_5+1)$;

$$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{yd};\ |\varepsilon_{s2}|=|\varepsilon_{yd}|\frac{\xi_F-(d_1/h)/(1-d_1/h)}{1-\xi_F}>|\varepsilon_{yd}|;\ \sigma_{s1}=\sigma_{s2}=f_{yd};$$

$$\sigma_{sF}=E_s|\varepsilon_{cu3}|\left[1-\frac{Z+d_1/h}{\xi_F(1-d_1/h)}\right]\le f_{yd};\ Z_{1F}=\frac{\chi_5-1}{\chi_5+1}\left(1-\frac{d_1}{h}\right)-\frac{d_1}{h};$$

- при $H-d_1/h<Z_{1F}$:

$$N_{Rd,F}=-f_{yd}\int_{h_f-d_1}^{z_{1F}}dA_s-\int_{z_{1F}}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sF}\,dA_s-b\lambda x_F\eta f_{cd}-(b_f-b)h_f\eta f_{cd};$$

$$M_{Rd,F}=f_{yd}\int_{h_f-d_1}^{z_{1F}}(0,5h-d_1-z)\,dA_s+\int_{z_{1F}}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sF}(0,5h-d_1-z)\,dA_s+$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}(h-2d_1)+0,5b\lambda x_F\eta f_{cd}(h-\lambda x_F)+0,5(b_f-b)h_f\eta f_{cd}(h-h_f);$$

От (1), като се използват бездименсионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left\{-\chi_5+H(1+\chi_5)+(\chi_5-1)\left(Z_{1F}+\frac{d_1}{h}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{\chi_5\left[(1-H)^2-(Z_{1F}+d_1/h)^2\right]}{2\xi_F(1-d_1/h)}\right\}-\lambda\xi_F(1-d_1/h)/B-(1-1/B)H, \tag{15a}$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left\{\chi_5\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_F(1-d_1/h)}\right]\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1F}\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-\right.$$

$$-0,5\chi_5\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-Z_{1F}^2\right]\left[1+\frac{0,5-2d_1/h}{\xi_F(1-d_1/h)}\right]+\frac{\chi_5\left[(1-d_1/h-H)^3-Z_{1F}^3\right]}{3\xi_F(1-d_1/h)}-$$

$$-0,5\left(H-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)+0,5Z_{1F}\left(1-2\frac{d_1}{h}-Z_{1F}\right)\Bigg\}+\frac{1}{3}\left(1-2\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+$$

$$+0,5\lambda\xi_F\left(1-d_1/h\right)\left[1-\lambda\xi_F\left(1-d_1/h\right)\right]\Big/B+0,5\left(1-1/B\right)H\left(1-H\right), \qquad (16a)$$

- при $H-d_1/h\geq Z_{1F}$: $\quad N_{Rd,F}=-\int\limits_{h_f-d_1}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sF}\,dA_s-b\lambda x_F\eta f_{cd}-\left(b_f-b\right)h_f\eta f_{cd}$;

$$M_{Rd,F}=\int\limits_{h_f-d_1}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sF}\left(0,5h-d_1-z\right)dA_s+\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}\left(h-2d_1\right)+$$

$$+0,5b\lambda x_F\eta f_{cd}\left(h-\lambda x_F\right)+0,5\left(b_f-b\right)h_f\eta f_{cd}\left(h-h_f\right);$$

От (1), като се използват бездимесионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}\chi_5}{3}\left[\frac{1}{2\xi_F\left(1-d_1/h\right)}-1\right]-\lambda\xi_F\left(1-d_1/h\right)\Big/B-\left(1-1/B\right)H, \qquad (15b)$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\chi_5\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_F\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(1-2H\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-\right.$$

$$-0,5\chi_5\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\left[1+\frac{0,5-2d_1/h}{\xi_F\left(1-d_1/h\right)}\right]+$$

$$\left.+\frac{\chi_5\left[\left(1-d_1/h-H\right)^3-\left(H-d_1/h\right)^3\right]}{3\xi_F\left(1-d_1/h\right)}\right\}+\frac{1}{3}\left(1-2\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+$$

$$+0,5\lambda\xi_F\left(1-d_1/h\right)\left[1-\lambda\xi_F\left(1-d_1/h\right)\right]\Big/B+0,5\left(1-1/B\right)H\left(1-H\right), \qquad (16b)$$

– **права G** − правата минава през т. В и се характеризира от параметрите:

$$\varepsilon_c=\varepsilon_{cu3}=-3,5‰;\ \ \xi_G=1;\ \varepsilon_{s1}=0;\ \ \left|\varepsilon_{s2}\right|>\left|\varepsilon_{yd}\right|;\ \ \sigma_{s1}=0;\ \ \sigma_{s2}=f_{yd};$$

$$\sigma_{sG}=E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left[1-\frac{Z+d_1/h}{1-d_1/h}\right]\leq f_{yd};\ Z_{1G}=\frac{\chi_5-1}{\chi_5}\left(1-\frac{d_1}{h}\right)-\frac{d_1}{h};$$

- при $H<1-\lambda\left(1-d_1/h\right)$:

$$N_{Rd,G}=\frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}\left[-f_{yd}\int_{h_f-d_1}^{z_{1G}}dz-\int_{z_{1G}}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sG}dz\right]-b\lambda\left(h-d_1\right)\eta f_{cd}-\left(b_f-b\right)h_f\eta f_{cd}\ ;$$

$$M_{Rd,G}=\frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}\left[f_{yd}\int_{h_f-d_1}^{z_{1G}}\left(0,5h-d_1-z\right)dz+\int_{z_{1G}}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sG}\left(0,5h-d_1-z\right)dz\right]+$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}\left(h-2d_1\right)+\frac{b\lambda\left(h-d_1\right)\eta f_{cd}\left[h-\lambda\left(h-d_1\right)\right]}{2}+\frac{\left(b_f-b\right)h_f\eta f_{cd}\left(h-h_f\right)}{2}\ ;$$

От (1), като се използват бездименсионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}^{\bullet}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{-\left(Z_{1G}-H+\frac{d_1}{h}\right)-\chi_5\left(1-\frac{d_1/h}{1-d_1/h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1G}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{\chi_5\left[\left(1-d_1/h-H\right)^2-Z_{1G}^2\right]}{2\left(1-d_1/h\right)}\right\}-\frac{\omega_{tot}}{3}-\frac{\lambda\left(1-d_1/h\right)}{B}-\left(1-\frac{1}{B}\right)H\ , \tag{17a}$$

$$m_{Ed}^{\bullet}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\chi_5\left(1-\frac{d_1/h}{1-d_1/h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1G}\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-\right.$$

$$-0,5\chi_5\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-Z_{1G}^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{1-d_1/h}\right]+\frac{\chi_5\left[\left(1-d_1/h-H\right)^3-Z_{1G}^3\right]}{3\left(1-d_1/h\right)}-$$

$$\left.-0,5\left(H-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)+0,5Z_{1G}\left(1-2\frac{d_1}{h}-Z_{1G}\right)\right\}+\frac{1}{3}\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+$$

$$+0,5\lambda\left(1-d_1/h\right)\left[1-\lambda\left(1-d_1/h\right)\right]/B+0,5\left(1-1/B\right)H\left(1-H\right)\ , \tag{18a}$$

•• при $H\geq 1-\lambda\left(1-d_1/h\right)$:

$$n_{Ed}^{\bullet\bullet}=n_{Ed}^{\bullet}-\left(1-1/B\right)\left[\lambda\left(1-d_1/h\right)-1+H\right], \tag{17b}$$

$$m_{Ed}^{\bullet\bullet}=m_{Ed}^{\bullet}-0,5\left(1-1/B\right)\left[\lambda\left(1-d_1/h\right)-1+H\right]\left[\lambda\left(1-d_1/h\right)-H\right], \tag{18b}$$

– **права H** − правата минава през т. B и се характеризира от параметрите:

$$\xi_H=1/\left(1-d_1/h\right)\ ;\quad \left|\varepsilon_{s1}\right|=\left|\varepsilon_{cu3}\right|d_1/h<\left|\varepsilon_{yd}\right|\ ;\quad \left|\varepsilon_{s2}\right|=\left|\varepsilon_{cu3}\right|\left(1-d_1/h\right)>\left|\varepsilon_{yd}\right|\ ;$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu3} = -3,5‰ ; \quad \sigma_{s1} = E_s \left|\varepsilon_{cu3}\right| d_1/h < f_{yd} ; \quad \sigma_{s2} = f_{yd} ;$$

$$\sigma_{sH} = E_s \left|\varepsilon_{cu3}\right| \left[1-\left(Z+d_1/h\right)\right] \le f_{yd} ; \quad Z_{1H} = \frac{\chi_5 - 1}{\chi_5} - \frac{d_1}{h} ;$$

• при $H < 1-\lambda$:

$$n^{\bullet}_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)} \left\{ -\left(Z_{1H} - H + \frac{d_1}{h} \right) - \chi_5 \left(1 - \frac{d_1}{h} \right) \left(1 - \frac{d_1}{h} - H - Z_{1H} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\chi_5 \left[\left(1-d_1/h-H\right)^2 - Z_{1H}^2 \right]}{2} \right\} - \frac{\omega_{tot}}{3} \left(1 + \chi_5 \frac{d_1}{h} \right) - \frac{\lambda}{B} - \left(1 - \frac{1}{B} \right) H , \tag{19a}$$

$$m^{\bullet}_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)} \left\{ \chi_5 \left(1 - \frac{d_1}{h} \right) \left(1 - \frac{d_1}{h} - H - Z_{1H} \right) \left(0,5 - \frac{d_1}{h} \right) - \right.$$

$$-0,5\chi_5 \left[\left(1 - \frac{d_1}{h} - H \right)^2 - Z_{1H}^2 \right] \left(1,5 - 2\frac{d_1}{h} \right) + \frac{\chi_5 \left[\left(1-d_1/h-H\right)^3 - Z_{1H}^3 \right]}{3} -$$

$$\left. -0,5 \left(H - \frac{d_1}{h} \right) \left(1 - \frac{d_1}{h} - H \right) + 0,5 Z_{1H} \left(1 - 2\frac{d_1}{h} - Z_{1H} \right) \right\} +$$

$$+ \frac{1}{3} \left(1 - \chi_5 \frac{d_1}{h} \right) \left(0,5 - \frac{d_1}{h} \right) \omega_{tot} + \frac{0,5\lambda(1-\lambda)}{B} + 0,5 \left(1 - \frac{1}{B} \right) H(1-H) , \tag{20a}$$

•• при $H \ge 1-\lambda$:

$$n^{\bullet\bullet}_{Ed} = n^{\bullet}_{Ed} - (1-1/B)(\lambda - 1 + H) , \tag{19b}$$

$$m^{\bullet\bullet}_{Ed} = m^{\bullet}_{Ed} - 0,5(1-1/B)(\lambda - 1 + H)(\lambda - H) , \tag{20b}$$

– **права FL1** – характеризира се с $\xi_{FL1} = (1-H) \big/ \left[\lambda \left(1 - d_1/h \right) \right]$

• при $H < 1-\lambda$ т.е. правата минава през т. С и $\xi_{FL1} > \xi_H$:

$$\sigma_{sFL1} = \frac{E_s \left|\varepsilon_{c3}\right|}{1-3\lambda/(7-7H)} \left[1 - \frac{\lambda\left(Z + d_1/h\right)}{1-H} \right] ; \quad Z_{1FL1} = \frac{1-H}{\lambda} - \frac{1-H-3\lambda/7}{\lambda\chi_4} - \frac{d_1}{h} ;$$

$$N_{Rd,FL1} = \frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)} \left[-f_{yd} \int_{h_f - d_1}^{z_{1FL1}} dz - \int_{z_{1FL1}}^{h-d_1-h_f} \sigma_{sFL1} dz \right] -$$

$$-\frac{A_{s,tot}}{3} f_{yd} \left\{1+\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[1-\frac{\lambda(1-d_1/h)}{1-H}\right]\right\} - b\left(h-h_f\right)\eta f_{cd} - \left(b_f - b\right) h_f \eta f_{cd} \,;$$

$$M_{Rd,FL1} = \frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}\left[f_{yd} \int_{h_f-d_1}^{z_{1FL1}} \left(0,5h-d_1-z\right)dz + \int_{z_{1FL1}}^{h-d_1-h_f} \sigma_{sFL1}\left(0,5h-d_1-z\right)dz \right] +$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3} f_{yd}\left(0,5h-d_1\right)\left\{1-\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[1-\frac{\lambda(1-d_1/h)}{1-H}\right]\right\} + \frac{b_f h_f \eta f_{cd}\left(h-h_f\right)}{2}\,.$$

От (1), като се използват бездименсионните величини (2), се получава

$$n_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left[-\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left(1-\frac{\lambda\, d_1/h}{1-H}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1FL1}\right)-\right.$$

$$\left. -\left(Z_{1FL1}-H+\frac{d_1}{h}\right)+\frac{\lambda}{1-H}\cdot\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\cdot\frac{\left(1-d_1/h-H\right)^2-Z_{1FL1}^2}{2}\right]-$$

$$-\frac{1}{3}\left\{1+\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[1-\frac{\lambda(1-d_1/h)}{1-H}\right]\right\}\omega_{tot} - \frac{1-H}{B} - \frac{B-1}{B}H\,, \qquad (21a)$$

където $\chi_4 = E_s\left|\varepsilon_{c3}\right| / f_{yd}$;

$$m_{Ed} = \frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left\{\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(Z_{1FL1}-H+\frac{d_1}{h}\right)-0,5\left[Z_{1FL1}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]+\right.$$

$$+\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1FL1}\right)-$$

$$-0,5\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-Z_{1FL1}^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\right]+$$

$$\left.+\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\cdot\frac{1}{3\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^3-Z_{1FL1}^3\right]\right\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left(0,5-d_1/h\right)\left\{1-\frac{\chi_4(7-7H)}{7-7H-3\lambda}\left[1-\frac{\lambda(1-d_1/h)}{1-H}\right]\right\}\omega_{tot}+\frac{H(1-H)}{2}\,, \qquad (22a)$$

• при $H \geq 1-\lambda$ т. е. правата минава през т. B и $\xi_{FL1} \leq \xi_H$:

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left\{-\left(Z_{1FL1}-H+\frac{d_1}{h}\right)-\chi_5\left(1-\frac{\lambda\, d_1/h}{1-H}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1FL1}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{\lambda\chi_5\left[\left(1-d_1/h-H\right)^2-Z_{1FL1}^2\right]}{2(1-H)}\right\}-\frac{\omega_{tot}}{3}\left\{1+\chi_5\left[1-\frac{\lambda\left(1-d_1/h\right)}{1-H}\right]\right\}-\frac{1-2H}{B}-H, \qquad (21b)$$

където $\chi_5=E_s\left|\varepsilon_{cu3}\right|/f_{yd}$;

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left\{\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(Z_{1FL1}-H+\frac{d_1}{h}\right)-0,5\left[Z_{1FL1}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]+\right.$$

$$+\chi_5\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1FL1}\right)\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)-$$

$$\left.-\frac{\chi_5}{2}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-Z_{1FL1}^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\right]+\frac{\chi_5\left[\left(1-d_1/h-H\right)^3-Z_{1FL1}^3\right]}{3\xi_{FL1}\left(1-d_1/h\right)}\right\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left[1-\chi_5\frac{1-H-\lambda\left(1-d_1/h\right)}{1-H}\right]\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\omega_{tot}+0,5H\left(1-H\right), \qquad (22b)$$

– **права I** − минава през т. С и се характеризира от следните параметри:

$$\xi_I=\frac{1}{\lambda\left(1-d_1/h\right)}\ ;\quad \left|\varepsilon_{s1}\right|=\frac{7\left|\varepsilon_{c3}\right|\left[1-\lambda\left(1-d_1/h\right)\right]}{\left(7-3\lambda\right)}<\left|\varepsilon_{yd}\right|;\quad \left|\varepsilon_{c3}\right|=\left|-2,0\right|‰\,;$$

$$\left|\varepsilon_{s2}\right|=\frac{\left|\varepsilon_{c3}\right|\left[\xi_I-\left(d_2/h\right)/\left(1-d_1/h\right)\right]}{\xi_I-3/\left[7\left(1-d_1/h\right)\right]}>\left|\varepsilon_{yd}\right|;\quad \sigma_{s1}=\left|\varepsilon_{s1}\right|E_s<f_{yd}\ ;\ \sigma_{s2}=f_{yd}\ ;$$

$$\sigma_{sI}=\frac{E_s\left|\varepsilon_{c3}\right|}{1-3\lambda/7}\left[1-\frac{Z+d_1/h}{\xi_I\left(1-d_1/h\right)}\right];\quad Z_{1I}=\frac{\chi_4+3\lambda/7-1}{\lambda\chi_4}-\frac{d_1}{h}\ ;$$

$$n_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3(1-2H)}\left[-\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\left(1-\lambda\, d_1/h\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1I}\right)-\right.$$

$$\left.-\left(Z_{1I}-H+\frac{d_1}{h}\right)+\frac{\lambda\chi_4}{1-3\lambda/7}\cdot\frac{\left(1-d_1/h-H\right)^2-Z_{1I}^2}{2}\right]-$$

$$-\frac{1}{3}\left\{1+\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\left[1-\lambda\left(1-d_1/h\right)\right]\right\}\omega_{tot}-\frac{1}{B}\left[1+2H\left(B-1\right)\right], \tag{23}$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\left\{\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(Z_{1I}-H+\frac{d_1}{h}\right)-0,5\left[Z_{1I}^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]+\right.$$

$$+\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_I\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-\frac{d_1}{h}-H-Z_{1I}\right)-$$

$$-0,5\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-Z_{1I}^2\right]\left[1+\frac{0,5-2d_1/h}{\xi_I\left(1-d_1/h\right)}\right]+$$

$$\left.+\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\cdot\frac{1}{3\xi_I\left(1-d_1/h\right)}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^3-Z_{1I}^3\right]\right\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left(0,5-d_1/h\right)\left\{1-\frac{\chi_4}{1-3\lambda/7}\left[1-\lambda\left(1-d_1/h\right)\right]\right\}\omega_{tot}, \tag{24}$$

– **права J (Ст B500)** − минава през т. C и се характеризира от величините:

$$\xi_J=\frac{3-7\chi_4\,d_1/h}{7\left(1-\chi_4\right)\left(1-d_1/h\right)};\ \varepsilon_{s2}=\varepsilon_{yd}=-2{,}174‰;\ \sigma_{s2}=f_{yd};$$

$$\left|\varepsilon_{s1}\right|=\frac{7\left(1-2d_1/h\right)\left|\varepsilon_{c3}\right|-\left(4-7d_1/h\right)\left|\varepsilon_{yd}\right|}{3-7d_1/h}<\left|\varepsilon_{yd}\right|;\ \sigma_{s1}<f_{yd};$$

$$\sigma_{sJ}=\frac{f_{yd}\left(3-7\chi_4\,d_1/h\right)}{3-7d_1/h}\left[1-\frac{Z+d_1/h}{\xi_J\left(1-d_1/h\right)}\right]\le f_{yd};\ Z_{1J}=0<H-\frac{d_1}{h};$$

$$N_{Rd,J}=-\frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}\int_{h_f-d_1}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sJ}\,dz-$$

$$-\frac{A_{s,tot}}{3}f_{yd}\left[1+\frac{7\left(1-2d_1/h\right)\chi_4-\left(4-7d_1/h\right)}{3-7d_1/h}\right]-bh\eta f_{cd}-2\left(b_f-b\right)h_f\eta f_{cd};$$

$$M_{Rd,J}=\frac{A_{s,tot}}{3\left(h-2h_f\right)}\int_{h_f-d_1}^{h-d_1-h_f}\sigma_{sJ}\left(0,5h-d_1-z\right)dz+$$

$$+\frac{A_{s,tot}}{3} f_{yd}\left(0,5h-d_1\right)\left[1-\frac{7\left(1-2\,d_1/h\right)\chi_4-\left(4-7\,d_1/h\right)}{3-7\,d_1/h}\right].$$

От (1), като се използват бездимензионните величини (2), се получава

$$n_{Ed}=-\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\cdot\frac{3-7\chi_4\,d_1/h}{3-7\,d_1/h}\left\{\left[1-\frac{7\left(1-\chi_4\right)d_1/h}{3-7\chi_4\,d_1/h}\right]\left(1-2H\right)-\right.$$

$$\left.-\frac{7\left(1-\chi_4\right)}{3-7\chi_4\,d_1/h}\cdot\frac{\left(1-d_1/h-H\right)^2-\left(H-d_1/h\right)^2}{2}\right\}-$$

$$-\frac{1}{3}\left[1+\frac{7\left(1-2\,d_1/h\right)\chi_4-\left(4-7\,d_1/h\right)}{3-7\,d_1/h}\right]\omega_{tot}-\frac{1}{B}\left[1+2H\left(B-1\right)\right], \qquad (25)$$

$$m_{Ed}=\frac{\omega_{tot}}{3\left(1-2H\right)}\cdot\frac{3-7\chi_4\,d_1/h}{3-7\,d_1/h}\left\{\left[1-\frac{d_1/h}{\xi_J\left(1-d_1/h\right)}\right]\left(0,5-\frac{d_1}{h}\right)\left(1-2H\right)-\right.$$

$$-0,5\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^2-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^2\right]\left[1+\frac{0,5-2\,d_1/h}{\xi_J\left(1-d_1/h\right)}\right]+$$

$$\left.+\frac{1}{3\xi_J\left(1-d_1/h\right)}\left[\left(1-\frac{d_1}{h}-H\right)^3-\left(H-\frac{d_1}{h}\right)^3\right]\right\}+$$

$$+\frac{1}{3}\left(0,5-d_1/h\right)\left[1-\frac{7\left(1-2\,d_1/h\right)\chi_4-\left(4-7\,d_1/h\right)}{3-7\,d_1/h}\right]\omega_{tot}, \qquad (26)$$

– **права К** − минава през т. С и се характеризира от следните параметри:

$$\xi_K=\infty;\qquad \varepsilon_{s1}=\varepsilon_{c3}=-2‰;\qquad \varepsilon_{s2}=\varepsilon_{c3}=-2‰;$$

$$\left|\varepsilon_c\right|=\left|\varepsilon_{c3}\right|<\left|\varepsilon_{cu3}\right|=\left|-3,5\right|‰;\;\; \sigma_{s1}\le f_{yd};\;\; \sigma_{s2}\le f_{yd};$$

$$n_{Ed}=-\chi_4\omega_{tot}-\left[1+2H\left(B-1\right)\right]/B, \qquad (27)$$

$$m_{Ed}=0. \qquad (28)$$

3. Номограми и пример

Като се използват зависимостите от (3) до (28), за фиксирани стойности на d_1/h, $B = b_f/b$ и $H = h_f/h$ се получават поредица от фамилии от криви за различни стойности на ω_{tot}. На базата на фамилиите от криви, по аналогична методика на разгледаната в [3], са съставени номограми за оразмеряване на нецентричен натиск и нецентричен опън на разглеждания тип сечения за различни стойности на отношението d_1/h, $B = b_f/b$ и $H = h_f/h$, които важат за стомана $\mathrm{B}500$ и бетон клас от $\mathrm{C}12/15$ до $\mathrm{C}50/60$ включително. Номограми от разглеждания вид са показани на фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4.

Пример. Да се оразмери симетрично двойно Т-образно напречно сечение от колона с параметри $\dfrac{d_1}{h} = \dfrac{100\,\mathrm{mm}}{1000\,\mathrm{mm}} = 0,1$, $\dfrac{b_f}{b} = \dfrac{450\,\mathrm{mm}}{300\,\mathrm{mm}} = 1,5$, $\dfrac{h_f}{h} = \dfrac{200\,\mathrm{mm}}{1000\,\mathrm{mm}} = 0,2$ при огъващ момент $M_{Ed} = 570\,\mathrm{kNm}$, натискова нормална сила $N_{Ed} = -4600\,\mathrm{kN}$. Използва се бетон клас $\mathrm{C}20/25\ \left(f_{cd} = 11,33\,\mathrm{MPa}\right)$ и стомана клас $\mathrm{B}500\ \left(f_{yd} = 435\,\mathrm{MPa}\right)$.

1. Определяне на n_{Ed} и m_{Ed}

$$n_{Ed} = -\frac{N_{Ed}}{b_f h \eta f_{cd}} = -\frac{4600.10^3}{450.10^3.11,33} = -0,902\ ;$$

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_f h^2 \eta f_{cd}} = \frac{570.10^6}{450.1000^2.11,33} = 0,112\,;$$

2. Отчет на ω_{tot}

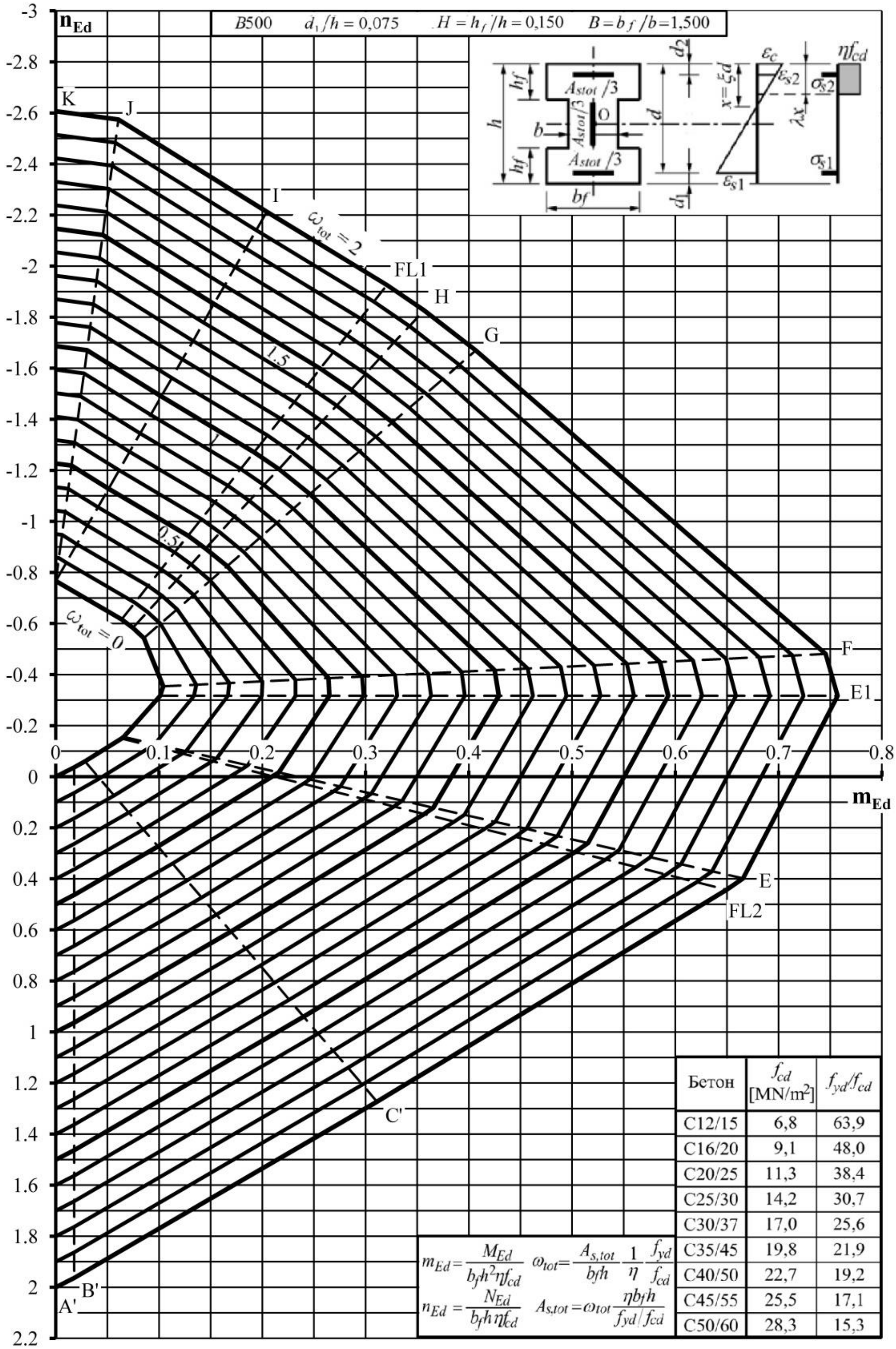
За $n_{Ed} = -0,902$; $m_{Ed} = 0,112$ при $d_1/h = 0,1$; $b_f/b = 1,5$; $h_f/h = 0,2$ от фиг. 3 се отчита $\omega_{tot} = 0,4$;

3. Определяне на $A_{s,\min}$ и $A_{s,tot}$

$$A_{s,\min} = \max\left(0,1N_{Ed}/f_{yd};\, 0,002A_c\right) = \max\left(1057,5;\, 720\right) = 1057,5\,\mathrm{mm}^2\,;$$

$$A_{s,tot} = \frac{\omega_{tot}\eta b_f h}{f_{yd}/f_{cd}} = 0,4\cdot\frac{1.450.1000}{38,4} = 4687,5\,\mathrm{mm}^2 > A_{s,\min} = 1057,5\,\mathrm{mm}^2\,.$$

При избрания начин на конструиране със симетрична армировка се приемат $3\times 8\varphi 16$ с напречно сечение $A_s = 3.8.201,1 = 4826,4\,\mathrm{mm}^2 > A_{s,tot} = 4687,5\,\mathrm{mm}^2$.

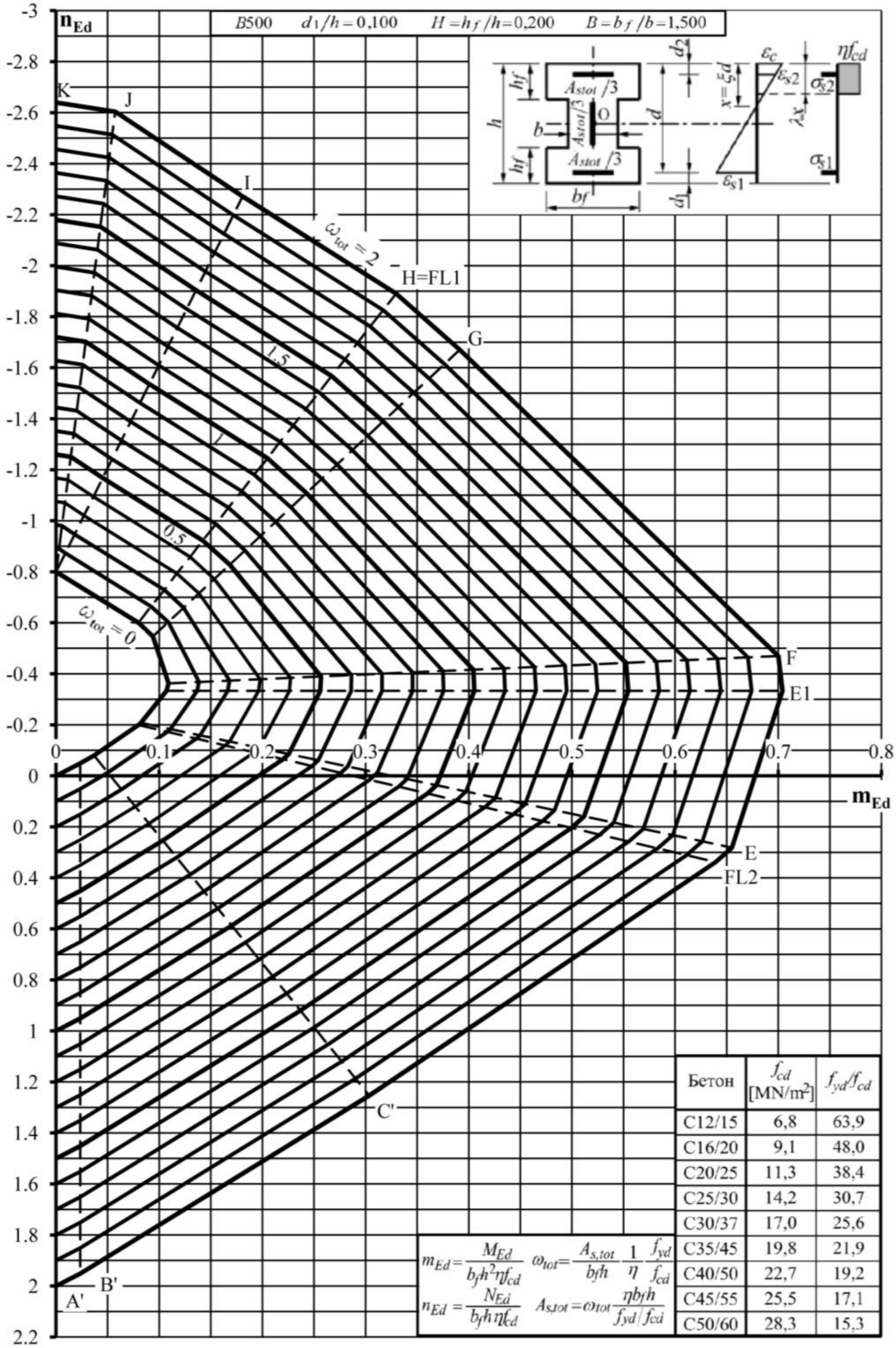


$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_f h^2 \eta f_{cd}} \quad \omega_{tot} = \frac{A_{s,tot}}{b_f h} \frac{1}{\eta} \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b_f h \eta f_{cd}} \quad A_{s,tot} = \omega_{tot} \frac{\eta b_f h}{f_{yd}/f_{cd}}$$

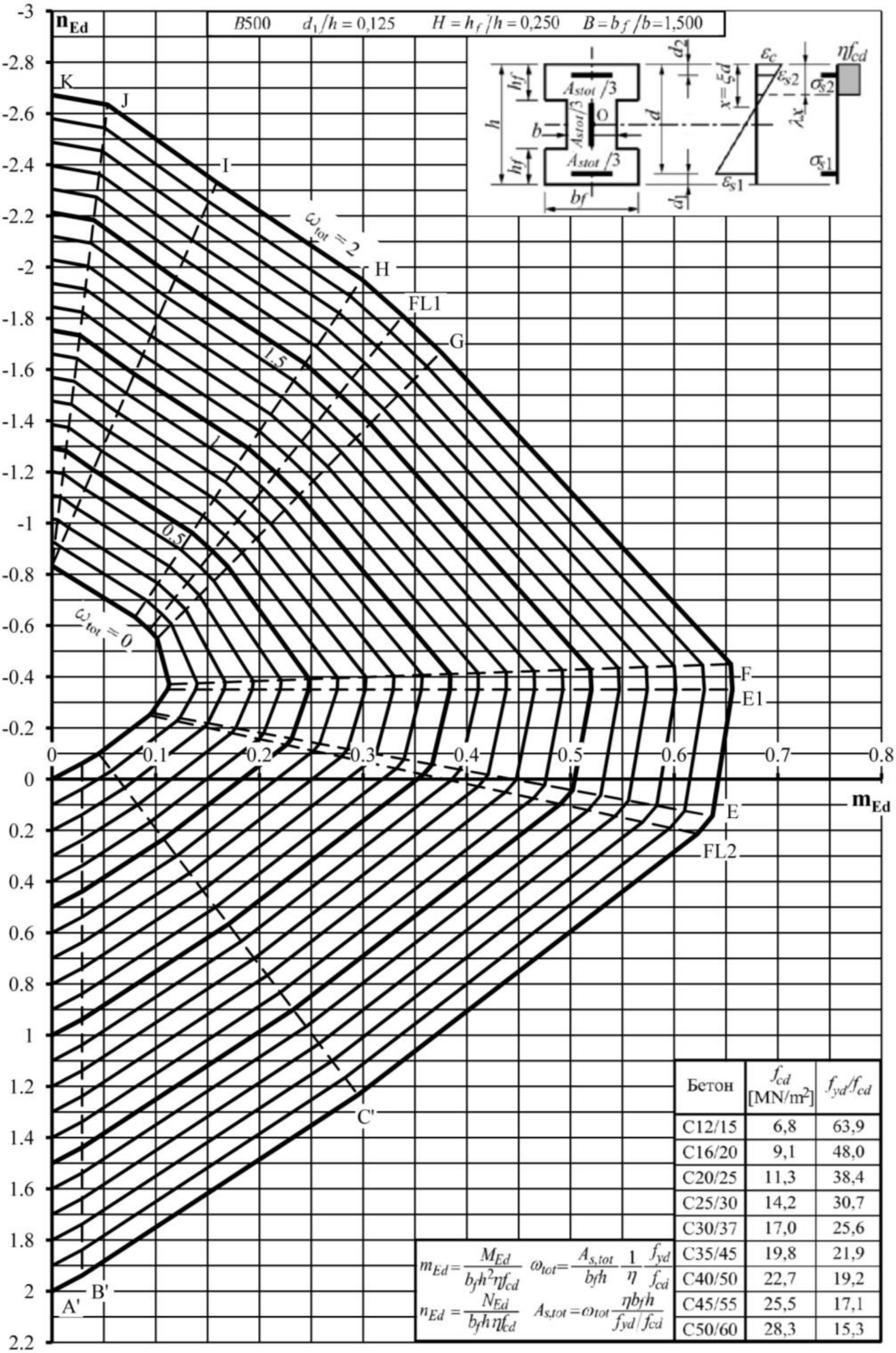
Бетон	f_{cd} [MN/m²]	f_{yd}/f_{cd}
C12/15	6,8	63,9
C16/20	9,1	48,0
C20/25	11,3	38,4
C25/30	14,2	30,7
C30/37	17,0	25,6
C35/45	19,8	21,9
C40/50	22,7	19,2
C45/55	25,5	17,1
C50/60	28,3	15,3

Фиг. 2. Номограма при d_1 / h = 0,075; $H = h_f / h$ = 0,150; $B = b_f / b$ = 1,500



Бетон	f_{cd} [MN/m²]	f_{yd}/f_{cd}
C12/15	6,8	63,9
C16/20	9,1	48,0
C20/25	11,3	38,4
C25/30	14,2	30,7
C30/37	17,0	25,6
C35/45	19,8	21,9
C40/50	22,7	19,2
C45/55	25,5	17,1
C50/60	28,3	15,3

Фиг. 3. Номограма при $d_1 / h = 0{,}100$; $H = h_f / h = 0{,}200$; $B = b_f / b = 1{,}500$



Бетон	f_{cd} [MN/m²]	f_{yd}/f_{cd}
C12/15	6,8	63,9
C16/20	9,1	48,0
C20/25	11,3	38,4
C25/30	14,2	30,7
C30/37	17,0	25,6
C35/45	19,8	21,9
C40/50	22,7	19,2
C45/55	25,5	17,1
C50/60	28,3	15,3

Фиг. 4. Номограма при $d_1/h = 0{,}125$; $H = h_f/h = 0{,}250$; $B = b_f/b = 1{,}500$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Янчев, В., Русев, К.* Номограми за оразмеряване на симетрични 2Т стоманобетонни сечения, подложени на действието на огъващ момент и осова сила по Еврокод 2. // Годишник на УАСГ, том 48, св. 12-1, част I, с. 141 – 151, София, 2016.

2. БДС EN 1992-1-1 Еврокод 2. Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1 Общи правила и правила за сгради, 2005.

3. *Русев, К., Янчев, В.* ЕС2. Оразмеряване на стоманобетонни конструкции по нормални сечения. АВС Техника, София, 2011.

DESIGN CHARTS FOR REINFORCED CONCRETE SYMMETRIC DOUBLE T CROSS-SECTIONS WITH DISTRIBUTED REINFORCEMENT UNDER BENDING MOMENT AND AXIAL FORCE ACCORDING TO EUROCODE 2

V. Yanchev[1]

Keywords: *design charts, strains, stresses*

ABSTRACT

To solve the set task a rectangular stress-strain diagram of the concrete, also known in the literature as “equivalent rectangular stress block”, and a bilinear stress-strain diagram of the reinforcement steel with a horizontal upper section are assumed. Design equations are derived to serve for determining the carrying capacity of reinforced concrete symmetric double T cross-sections with symmetricly distributed reinforcement under bending moment and axial force according to Eurocode 2. The reinforcement is distributed evenly in each of the flanges and in the web. To achieve economical solution entire embedded reinforcement is reported in the expressions $m_{Ed} = f(\omega_{tot})$ and $n_{Ed} = f(\omega_{tot})$ for each of the strain state lines, including uniformly distributed reinforcement in the web. Design charts are derived to serve for design of considered reinforced concrete cross-sections with different fixed values of parameters d_1/h, $B = b_f/b$ and $H = h_f/h$. A practical example is considered to show clearly the application of the design charts.

[1] Vladimir Yanchev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vladimir_yanchev@abv.bg