



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Δομοστατικής  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

### Μάθημα : Σιδηρές Κατασκευές II

Διδάσκοντες : Ι. Βάγιας – Γ. Ιωαννίδης – Χ. Γαντές  
Φ. Καρυδάκης – Α. Αβραάμ – Ι. Μαλλής – Ξ. Λιγνός – Ι. Βασιλοπούλου – Α. Σπηλιόπουλος

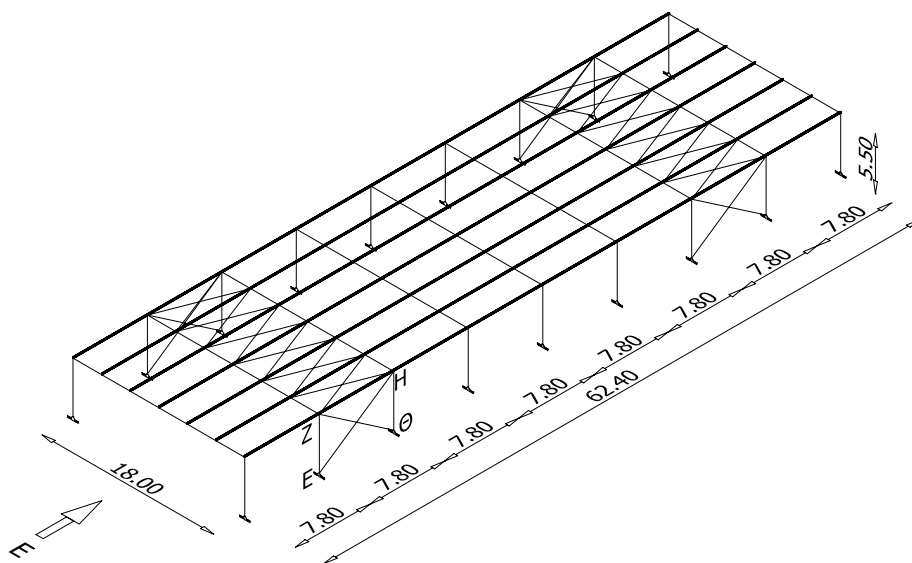
Διάρκεια 2 ώρες και 30 λεπτά

10 Ιουλίου 2009

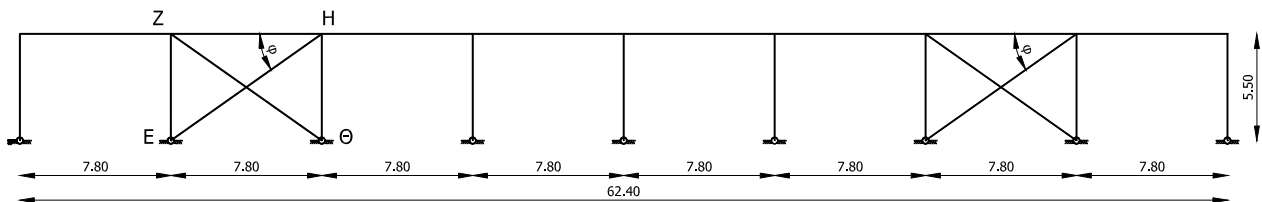
#### Τελική εξέταση

Ισόγειο κτίριο στάθμευσης οχημάτων, αξονικών διαστάσεων κάτοψης 18,0m x 62,40m και ύψους 5,50m έχει φέροντα οργανισμό από χάλυβα ποιότητας S275 αποτελούμενο από δίστηλα αμφιαρθρωτά πλαίσια που διατάσσονται ανά 7,80m, δοκούς οροφής, κεφαλοδοκούς (που συνδέουν τις κεφαλές των υποστυλωμάτων) και κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας (Σχ. 1, 2). Το κτίριο σχεδιάζεται ώστε να δέχεται στην οροφή του μόνιμα φορτία  $5,0 \text{ kN/m}^2$  και ωφέλιμα φορτία επίσης  $5,0 \text{ kN/m}^2$ , βρίσκεται δε σε περιοχή σεισμικότητας III. Ζητείται:

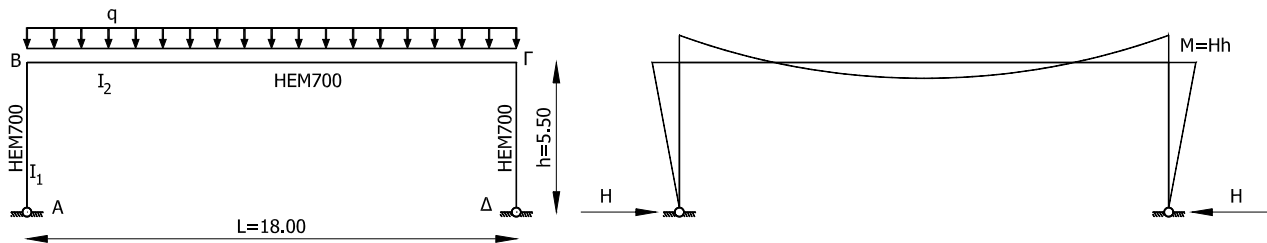
- Να προσδιοριστεί, για το σεισμικό συνδυασμό δράσεων η δύναμη που καταπονεί κάθε κατακόρυφο σύνδεσμο δυσκαμψίας. Οι συντελεστές σπουδαιότητας και θεμελίωσης θα ληφθούν ίσοι προς τη μονάδα. Ο σεισμικός έλεγχος γίνεται με τη μεγαλύτερη επιτρεπόμενη τιμή για το συντελεστή συμπεριφοράς. Ο συντελεστής συνδυασμού  $\psi_2$  θα ληφθεί ίσος προς 0,60. Το ποσοστό απόσβεσης θα ληφθεί ίσο προς 3%.
- Για τον ίδιο συνδυασμό να επιλεγεί η απαιτούμενη για τις διαγώνιες ράβδους των παραπάνω συνδέσμων διατομή (από τον Πίνακα 1). Οι διαγώνιες κάθε συνδέσμου θα συνδέονται μεταξύ τους στη θέση τομής τους.
- Να εκλεγεί, από τη σειρά HEB, η απαιτούμενη για την κεφαλοδοκό διατομή.
- Να προσδιοριστούν τα εντατικά μεγέθη του υποστυλώματος (ροπές κάμψης και αξονικές δυνάμεις) για τον συνδυασμό δράσεων μονίμων και κινητών κατακορύφων φορτίων. Δίδεται βοηθητικά το διάγραμμα ροπών του Σχ. 3.
- Να προσδιοριστούν τα εντατικά μεγέθη του υποστυλώματος (ροπές κάμψης και αξονικές δυνάμεις) για το σεισμικό συνδυασμό των ερωτημάτων α, β, γ, και να συγκριθούν με εκείνα του ερωτήματος δ.
- Να γίνει έλεγχος του υποστυλώματος σε οριακή κατάσταση αστοχίας για τον κρίσιμο συνδυασμό φόρτισης.



Σχήμα 1: Προοπτικό κτιρίου



Σχήμα 2: Όψη κτιρίου



$$H = \frac{qL^2}{4h(2k + 3)} \quad k = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{h}{L}$$

Σχήμα 3: Τυπικό πλαίσιο

b x b x t	b	b	t	A	I	W	i
mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
100x100x4	100	100	4	15.19	231.8	46.36	3.91
100x100x5	100	100	5	18.73	279.4	55.89	3.86
100x100x6.3	100	100	6.3	23.19	335.6	67.11	3.8
100x100x8	100	100	8	28.75	399.6	79.92	3.73
100x100x10	100	100	10	34.93	462.1	92.42	3.64
120x120x5	120	120	5	22.73	497.7	82.95	4.68
120x120x6.3	120	120	6.3	28.23	602.9	100.5	4.62
120x120x8	120	120	8	35.15	726.3	121.1	4.55
120x120x10	120	120	10	42.93	852.1	142	4.46
120x120x12.5	120	120	12.5	52.07	981.8	163.6	4.34
140x140x5	140	140	5	26.73	807.5	115.4	5.5
140x140x6.3	140	140	6.3	33.27	983.9	140.6	5.44
140x140x8	140	140	8	41.55	1195	170.7	5.36
140x140x10	140	140	10	50.93	1416	202.3	5.27
140x140x12.5	140	140	12.5	62.07	1653	236.1	5.16

Πίνακας 1: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά κοίλων τετραγωνικών διατομών

**ΛΥΣΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ****1. ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ**

$$\text{Διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης: } n = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} = \sqrt{\frac{7}{2+3}} = 1,183$$

Συντελεστής συμπεριφοράς για δικτυωτούς διαγώνιους συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα:  $q=3,00$  (μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή)

Οριζόντια φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού:

$$\Phi_d(T) = \gamma_1 \cdot A \cdot \frac{n \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} = 1,00 \times 0,36g \times \frac{1,183 \times 1,00 \times 2,50}{3,0} = 0,355g$$

Κατακόρυφα φορτία στέγης που συνδυάζονται με το σεισμό:

$$G + \psi_2 \cdot Q = 5,00 \text{ kN/m}^2 + 0,60 \times 5,00 \text{ kN/m}^2 = 8,00 \text{ kN/m}^2$$

Συνολικό κατακόρυφο φορτίο:  $8,00 \text{ kN/m}^2 \times 18 \times 62,40 \text{ m} = 8985,60 \text{ kN}$

Σεισμική δύναμη:  $Q_E = M \times \Phi_d(T) = 8985,60 \text{ kN} / g \times 0,355g = 3190 \text{ kN}$

Δύναμη σε κάθε κατακόρυφο σύνδεσμο:  $E = Q_E / 4 = 3190 \text{ kN} / 4 = 797,50 \text{ kN}$

**2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΙΑΓΩΝΙΟΥ**

$$\tan \varphi = \frac{5,50}{7,80} = 0,705 \Rightarrow \varphi = 35,19^\circ$$

$$N_{Ed} = \frac{797,50 \text{ kN}}{\cos 35,19^\circ} = 975,83 \text{ kN}$$

Θα πρέπει να ισχύει:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M2}} \geq N_{Ed} \Rightarrow A \geq \frac{975,84 \text{ kN} \cdot 1,00}{27,5 \text{ kN/cm}^2} = 35,5 \text{ cm}^2$$

και επίσης:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E \cdot I}} \cdot \ell^2 \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\ell}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{I}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{\ell}{\pi \cdot i} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \leq 1,50 \Rightarrow$$

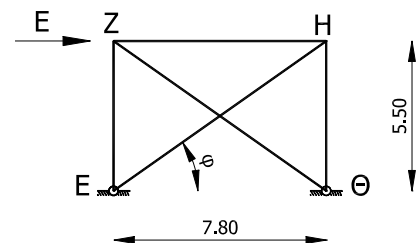
$$i \geq \frac{\ell}{1,5 \times \pi} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} \Rightarrow i \geq \frac{477 \text{ cm}}{1,5 \times 3,14} \times \sqrt{\frac{27,5 \text{ kN/m}^2}{21000 \text{ kN/m}^2}} = 3,66 \text{ cm}$$

όπου το μήκος λυγισμού είναι το μισό μήκος της διαγωνίου:  $\ell = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(7,8 \text{ m})^2 + (5,5 \text{ m})^2} = 4,77 \text{ m} = 477 \text{ cm}$

Επιλέγεται κοίλη τετραγωνική διατομή 120/120/10 με  $A=42,93 \text{ cm}^2$  και  $i=4,46 \text{ cm}$

Αντοχή διαρροής της διατομής της διαγωνίου:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{42,93 \text{ cm}^2 \times 27,5 \text{ kN/cm}^2}{1,00} = 1180,6 \text{ kN} > N_{Ed} = 975,83 \text{ kN}$$

**3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΕΦΑΛΟΔΟΚΟΥ**

Συντελεστής ικανοτικής μεγέθυνσης:

$$\alpha_{CD} = \frac{(1,20 \cdot N_{Pdi} - N_{vdi})}{N_{Edi}} \leq q \Rightarrow \alpha_{CD} = \frac{(1,20 \times 1180,60 \text{ kN} - 0)}{975,83 \text{ kN}} = 1,45 < q = 3,00 \Rightarrow \alpha_{CD} = 1,45$$

Επομένως:

$$N_{Ed} = \alpha_{CD} \cdot E = 1,45 \cdot 797,50 \text{ kN} = 1156,40 \text{ kN}$$

Υποθέτουμε αυθαίρετα  $\chi=0,35$ .

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \Rightarrow A \geq \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi f_y} \Rightarrow A \geq \frac{1156,40 \text{ kN} \times 1,00}{0,35 \times 27,5 \text{ kN/cm}^2} = 120,15 \text{ cm}^2$$

Επιλέγουμε διατομή HEB280 με  $A=131,4 \text{ cm}^2$  (κατηγορία 1).

Ισχύει:  $h/b=280/280=1,00 < 1,2$  και  $t_f=18\text{mm} < 100\text{mm}$

Επομένως η καμπύλη λυγισμού είναι η b για λυγισμό περί τον άξονα y-y και c περί τον άξονα z-z.

Το μήκος λυγισμού κατά τους δύο άξονες είναι ίσο με  $L_y=L_z=780\text{cm}$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα ασθενή άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_z}{i_z \times \lambda_1} = \frac{780\text{cm}}{7,09\text{cm} \times 86,81} = 1,27 \quad \text{όπου} \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000\text{MPa}}{275\text{MPa}}} = 86,81$$

Για ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_z = 1,27$  και για καμπύλη λυγισμού c, ο συντελεστής  $\chi_z$ , είναι ίσος με  $\chi_z=0,40$ .

Αντοχή θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,40 \times 131,4\text{cm}^2 \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 1445,40\text{kN} > N_{Ed} = 1156,40\text{kN}$$

Για μεγαλύτερη οικονομία ελέγχεται και η διατομή HEB260, για την οποία θα ισχύει:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_z}{i_z \times \lambda_1} = \frac{780\text{cm}}{6,58\text{cm} \times 86,81} = 1,37 \rightarrow \chi_z=0,36.$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,36 \times 118,4\text{cm}^2 \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 1172,16\text{kN} > N_{Ed} = 1156,40\text{kN}$$

Ικανοποιείται ο έλεγχος αντοχής σε λυγισμό για HEB260 και επιλέγεται αυτή η διατομή για την κεφαλοδοκό.

#### 4. ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ

##### Φορτία και εντατικά μεγέθη:

Συνδυασμός σε ΟΚΑ:  $1,35G + 1,50Q = 1,35 \times 5,00 \text{ kN/m}^2 + 1,50 \times 5,00 \text{ kN/m}^2 = 14,25\text{kN/m}^2$

Κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο ανά ζύγωμα:  $14,25\text{kN/m}^2 \times 7,80\text{m} = 111,15\text{kN/m}$

$$k = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{h}{L} = \frac{5,50\text{m}}{18,00\text{m}} = 0,31$$

Αντίδραση στη βάση του υποστυλώματος και τέμνουσα δύναμη:

$$H = \frac{qL^2}{4h(2k+3)} = \frac{111,15\text{kN/m} \cdot (18,0\text{m})^2}{4 \cdot 5,50\text{m} \cdot (2 \cdot 0,31 + 3)} = 452,19\text{kN}$$

Ροπή στην κορυφή του υποστυλώματος:  $M = Hh = 452,19\text{kN} \times 5,50\text{m} = 2487,05\text{kNm}$

Αξονικό φορτίο στο υποστυλωμα:  $N = 111,15\text{kN} \times 18,0\text{m}/2 = 1000,35\text{kN}$

#### 5. ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ

Κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο ανά ζύγωμα:  $8,0\text{kN/m}^2 \times 7,80\text{m} = 62,40\text{kN/m}$

Αναλογικά, τα εντατικά μεγέθη που αντιστοιχούν στα φορτία αυτά είναι:

Αντίδραση στη βάση του υποστυλώματος και τέμνουσα δύναμη:  $H = 452,19 \times 62,40 / 111,15 = 253,86\text{kN}$

Ροπή στην κορυφή του υποστυλώματος:  $M = 2487,05\text{kNm} \times 62,40 / 111,15 = 1396,24\text{kNm}$

Αξονικό φορτίο στο υποστυλωμα:  $N = 1000,35\text{kN} \times 62,40 / 111,15 = 561,60\text{kN}$

Για το φορτίο του σεισμού, θεωρώντας ότι δεν λαμβάνεται υπόψη ταυτόχρονη συνιστώσα του σεισμού κατά την εγκάρσια έννοια του κτιρίου, το δυσμενέστερο υποστυλωμα θα παραλάβει πρόσθετη θλιπτική δύναμη ίση με:  $N_E = 797,50\text{kN} \times \tan 35,19^\circ = 562,37\text{kN}$

Επομένως η συνολική θλιπτική δύναμη, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή ικανοτικής μεγέθυνσης, θα είναι:  $N = 1,45 \times 562,37\text{kN} + 561,60\text{kN} = 1377,04\text{kN}$

Σε σχέση με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από το μη σεισμικό συνδυασμό, η αξονική δύναμη είναι αυξημένη κατά 38%, ενώ η ροπή κάμψης είναι μειωμένη κατά 56%.

#### 6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ

##### Λυγηρότητες και μειωτικοί συντελεστές:

Για τον υπολογισμό του μήκους λυγισμού του υποστυλώματος κατά τον ισχυρό άξονα (για λυγισμό εντός επιπέδου), η δυσκαμψία του υποστυλώματος θα είναι:

$$K_c = \frac{I_c}{L_c} = \frac{I_y}{L_y} = \frac{329300\text{cm}^4}{550\text{cm}} = 598,73\text{cm}^3$$

ενώ η δυσκαμψία των δοκών είναι:

$$K_{11} = \frac{1,50 \times I_{12}}{L_{12}} = \frac{1,50 \times 329300\text{cm}^4}{1800\text{cm}} = 274,42\text{cm}^3 \text{ (διπλή καμπυλότητα)}$$

$$\eta_1 = \frac{K_c}{K_c + K_{11}} = \frac{598,73\text{cm}^3}{598,73\text{cm}^3 + 274,42\text{cm}^3} = 0,69$$

$\eta_2=1,00$  (άρθρωση)

Από το διάγραμμα για μεταθετά πλαίσια προκύπτει συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού:  $\beta=3$

Μήκος λυγισμού κατά τον ασθενή άξονα:  $L_z=5,50\text{m}=550\text{cm}$

Μήκος λυγισμού κατά τον ισχυρό άξονα:  $L_y=3 \times 550\text{cm}=1650\text{cm}$ .

Ισχύει:  $h/b=716/304=2,36 > 1,2$  και  $t_f=40\text{mm} < 100\text{mm}$

Επομένως η καμπύλη λυγισμού είναι η α για λυγισμό περί τον άξονα y-y και b περί τον άξονα z-z.

Λυγηρότητα κατά τον ασθενή άξονα:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_z}{i_z \times \lambda_1} = \frac{550\text{cm}}{7,01\text{cm} \times 86,81} = 0,90 \xrightarrow{b} \chi_z=0,66$$

Λυγηρότητα κατά τον ισχυρό άξονα:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\beta_y \times L}{i_y \times \lambda_1} = \frac{1650\text{cm}}{29,32\text{cm} \times 86,81} = 0,65 \xrightarrow{a} \chi_y=0,87$$

### Κρίσιμη ροπή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Η κρίσιμη ροπή για το υποστύλωμα θα είναι:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL_T)^2} \left\{ \left[ \frac{k}{k_w} \right]^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL_T)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} \right\}^{0,5}$$

$$M_{cr} = 1,879 \frac{\pi^2 \times 21000\text{kN/cm}^2 \times 18800\text{cm}^2}{(1,00 \times 550\text{cm})^2} \times \left\{ \left( \frac{1,00}{1,00} \right)^2 \frac{21400000\text{cm}^6}{18800\text{cm}^4} + \frac{(1,00 \times 550\text{cm})^2 \times 8077\text{kN/cm}^2 \times 1589\text{cm}^4}{\pi^2 \times 21000\text{kN/cm}^2 \times 18800\text{cm}^2} \right\}^{0,5} =$$

$$= 24203,51 \times 46,20 = 1118202,16\text{kNcm}$$

### Λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού θα είναι:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{10540\text{cm}^3 \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1118202,16\text{kNcm}}} = 0,51$$

Επειδή ισχύει  $\bar{\lambda}_{LT} = 0,51 > 0,20$  η επιρροή του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού δεν μπορεί να αγνοηθεί.

### Καμπύλες στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και μειωτικός συντελεστής $\chi_{LT}$

Ισχύει:  $h/b=716/304=2,36 > 2 \rightarrow$  καμπύλη πλευρικού λυγισμού  $b \rightarrow \chi_{LT} = 0,88$

### Κατηγορία διατομής:

Κατηγορία κορμού:  $c/t=d/t_w=582/21=27,71 < 33 \times 0,92=30,36$  (κατηγορία 1)

Κατηγορία πέλματος:  $\frac{c}{t} = \frac{(b-t_w)/2-r}{t_f} = \frac{(304-21)\text{mm}/2-27\text{mm}}{40\text{mm}} = 2,86 < 9 \times 0,92 = 8,28$  (κατηγορία 1)

Κατηγορία διατομής για καθαρή θλίψη: Κατηγορία 1

### Έλεγχος διάτμησης:

Δυσμενέστερος συνδυασμός για την τέμνουσα είναι ο μη σεισμικός συνδυασμός:

$$V_{Ed}=452,19\text{kN} < V_{pl,Rd} = A_{vz} \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 169,8\text{cm}^2 \frac{27,5\text{kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 2695,94\text{kN}$$

Δεν χρειάζεται απομείωση ροπής αντοχής λόγω παρουσίας τέμνουσας.

### Έλεγχος διατομής σε θλίψη και κάμψη:

Δυσμενέστερος συνδυασμός για την αξονική δύναμη είναι ο σεισμικός συνδυασμός:

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{383\text{cm}^2 \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 10532,5\text{kN}$$

$$0,25N_{pl,Rd} = 2633,13\text{kN} > 1377,04\text{kN}$$

$$N_{Ed} = 1377,04\text{kN} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times (716\text{cm} - 2 \times 40\text{cm}) \times 21\text{cm} \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 183645\text{kN}$$

Εφόσον πληρούνται και τα δύο κριτήρια δεν χρειάζεται απομείωση πλαστικής ροπής αντοχής λόγω αξονικής δύναμης.

Δυσμενέστερος συνδυασμός για την καμπτική ροπή είναι ο μη σεισμικός συνδυασμός:

$$M_{y,Ed} = 248705\text{kNcm} < M_{Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{10540\text{cm}^3 \times 27,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 289850\text{kNcm}$$

Επομένως ικανοποιείται ο έλεγχος διατομής του υποστυλώματος.

### Έλεγχος μέλους σε θλίψη και κάμψη:

Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο ισχύει για το μη σεισμικό συνδυασμό, που κρίνεται ως ο δυσμενέστερος:

$$c_{my} = 0,90 \text{ (λυγισμός από μετάθεση)}$$

$$\bar{\lambda}_y - 0,2 = 0,65 - 0,20 = 0,45 < 0,80$$

$$k_{yy} = c_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,90 \left( 1 + 0,45 \frac{1000,35\text{kN}}{0,87 \cdot 10532,5\text{kN}} \right) = 0,94$$

$$k_{yz} = 0,60 \times 0,94 = 0,56$$

Έλεγχος για τον μη σεισμικό συνδυασμό:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1000,35\text{kN}}{0,87 \times 10532,5\text{kN}} + 0,94 \frac{248705\text{kNcm}}{0,88 \times 289850\text{kNcm}} = 0,10 + 0,92 = 1,02 < 1,00 \text{ (δεν επαρκεί οριακά)}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1000,35\text{kN}}{0,66 \times 10532,5\text{kN}} + 0,56 \frac{248705\text{kNcm}}{0,88 \times 289850\text{kNcm}} = 0,14 + 0,55 = 0,69 < 1,00 \text{ (επαρκεί)}$$

Από τους συντελεστές εκμετάλλευσης του ελέγχου, παρατηρούμε ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό οφείλεται στην αξονική δύναμη ( $0,10/1,02=10\%$  για λυγισμό κατά τον ισχυρό άξονα και  $0,14/0,69=20\%$  για λυγισμό κατά τον ασθενή άξονα), επομένως, αυξάνοντας την αξονική δύναμη κατά 38% και ταυτόχρονα μειώνοντας τη ροπή κάμψης κατά 56%, περιμένουμε να επαρκεί το υποστυλόμετρο για τον σεισμικό συνδυασμό.

### Επαλήθευση

Για το σεισμικό συνδυασμό ισχύει:

$$k_{yy} = c_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,90 \left( 1 + 0,45 \frac{1377,04\text{kN}}{0,87 \cdot 10532,5\text{kN}} \right) = 0,96$$

$$k_{yz} = 0,60 \times 0,96 = 0,58$$

Έλεγχος για τον μη σεισμικό συνδυασμό:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1377,04\text{kN}}{0,87 \times 10532,5\text{kN}} + 0,96 \frac{139624\text{kNcm}}{0,88 \times 289850\text{kNcm}} = 0,15 + 0,53 = 0,68 < 1,00 \text{ (επαρκεί)}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1377,04\text{kN}}{0,66 \times 10532,5\text{kN}} + 0,58 \frac{139624\text{kNcm}}{0,88 \times 289850\text{kNcm}} = 0,20 + 0,32 = 0,52 < 1,00 \text{ (επαρκεί)}$$