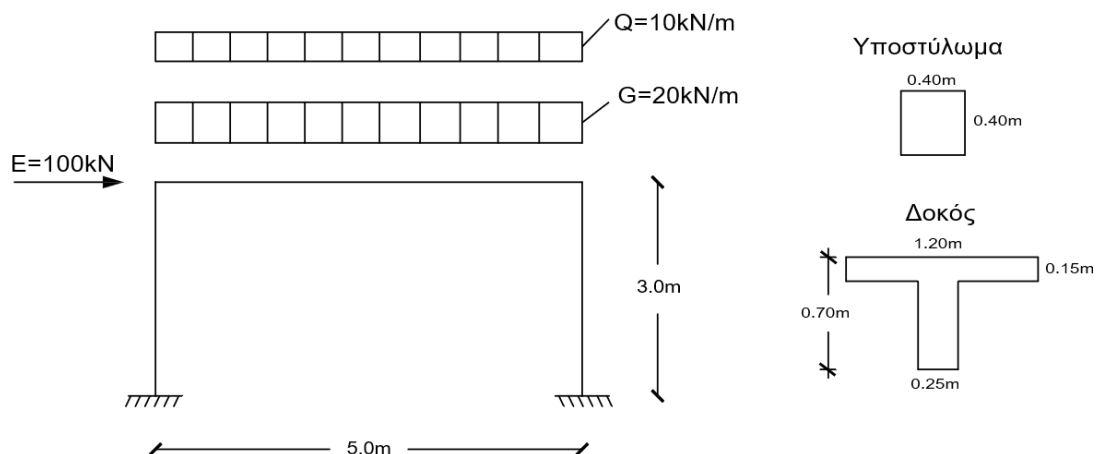


# Κεφάλαιο 1

## Δυναμική ανάλυση μονώροφου πλαισίου

### 1.1 Γεωμετρία φορέα - Δεδομένα

Χρησιμοποιείται ο φορέας του Παραδείγματος 3 από το βιβλίο *Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα Η/Υ* (Κίρτας & Παναγόπουλος, 2015) [1] και προσομοιώνεται στο πρόγραμμα SAP2000 [2].



Σχήμα 1.1: Γεωμετρία φορέα

#### Πρόσθετα δεδομένα

Να θεωρηθεί ότι η κατασκευή είναι συνήθους σπουδαιότητας (II), βρίσκεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II και το έδαφος είναι κατηγορίας αποθέσεις από πυκνά αμμοχάλικα. Η κατασκευή να θεωρηθεί μέσης κατηγορίας πλαστιμότητας.

#### Ζητούνται

- Να υπολογιστεί η μάζα της κατασκευής και να προσομοιωθεί στο SAP2000
- Να γίνει ιδιομορφική ανάλυση με το SAP2000 και να βρεθεί η ιδιοπερίοδος του φορέα

- Να υπολογιστεί η φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8
- Να υπολογιστεί η τέμνουσα βάσης της κατασκευής και τα σεισμικά φορτία με τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (απλοποιημένη φασματική)

## 1.2 Υπολογισμός μάζας

Η μάζα θεωρείται ότι βρίσκεται συγκεντρωμένη στη στάθμη των ορόφων και αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού ( $G+0.3Q$ ). Με δεδομένο ότι η επίλυση θα αντιστοιχεί μόνο στις οριζόντιες δράσεις και ότι υπάρχει η διαφραγματική λειτουργία της πλάκας, το σύνολο της μάζας μπορεί να οριστεί σημειακά σε οποιοδήποτε κόμβο στη στάθμη του ορόφου.

Η τιμή της μάζας υπολογίζεται ως εξής:

$$m = \frac{(G + 0.3Q) \cdot L}{g} = \frac{(20.0 \text{ kN/m} + 0.3 \cdot 10.0 \text{ kN/m}) \cdot 5.0 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 11.72 \text{ t} \quad (1.1)$$

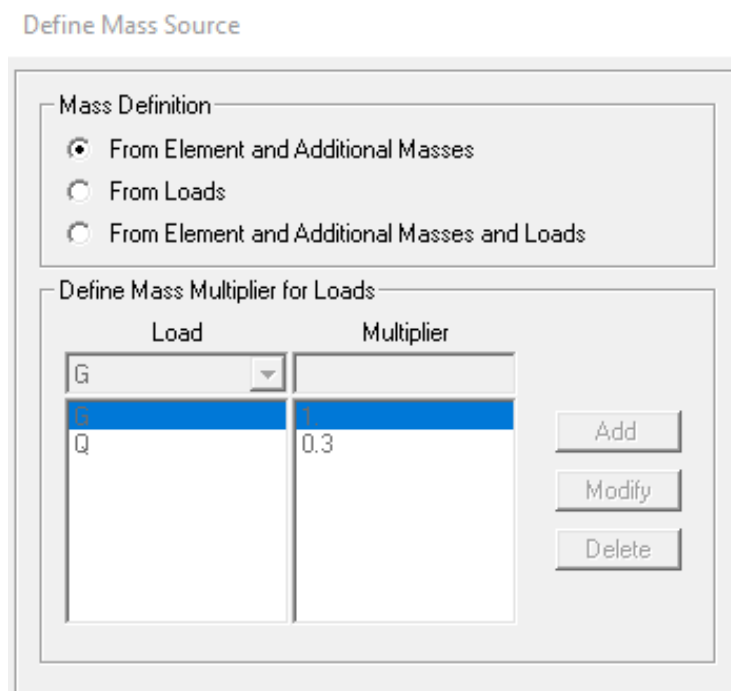
όπου:

**G** τα μόνιμα ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία της δοκού

**Q** τα μεταβλητά ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία της δοκού

**L** το μήκος της δοκού

**g** η επιτάχυνση της βαρύτητας



Σχήμα 1.2: Μέθοδος εισαγωγής της μάζας

Η εισαγωγή των μαζών στο πρόγραμμα 'Define->Mass Source' μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα εισάγοντας τιμές για τις μάζες 'From Element and Additional Masses' είτε

αυτόματα ζητώντας από το πρόγραμμα να υπολογίσει τη μάζα από τα κατακόρυφα φορτία της κατασκευής *'From Loads'* ενώ υπάρχει η δυνατότητα οι δύο παραπάνω επιλογές να συνδυαστούν (σχήμα 1.2).

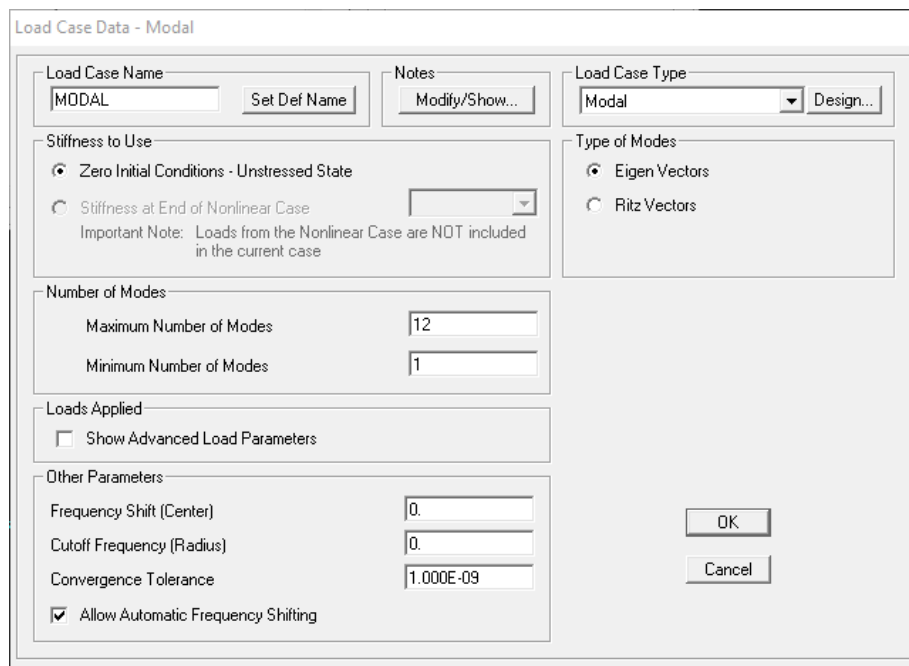
Αν επιλεχθεί η 1η περίπτωση τότε δίνεται η τιμή που υπολογίστηκε μέσω της σχέσης 1.1 στον αριστερό κόμβο του ορόφου, επιλέγοντάς τον και στη συνέχεια δίνοντας *'Assign->Joint->Masses'*. Στη φόρμα του σχήματος 1.3 η παραπάνω τιμή τίθεται ως μεταφορική μάζα κατά τη διεύθυνση 1 (τοπικός άξονας του κόμβου που συμπίπτει με τον καθολικό άξονα Χ).

Σχήμα 1.3: Εισαγωγή σημειακής μάζας σε κόμβους

### 1.3 Ιδιομορφική ανάλυση

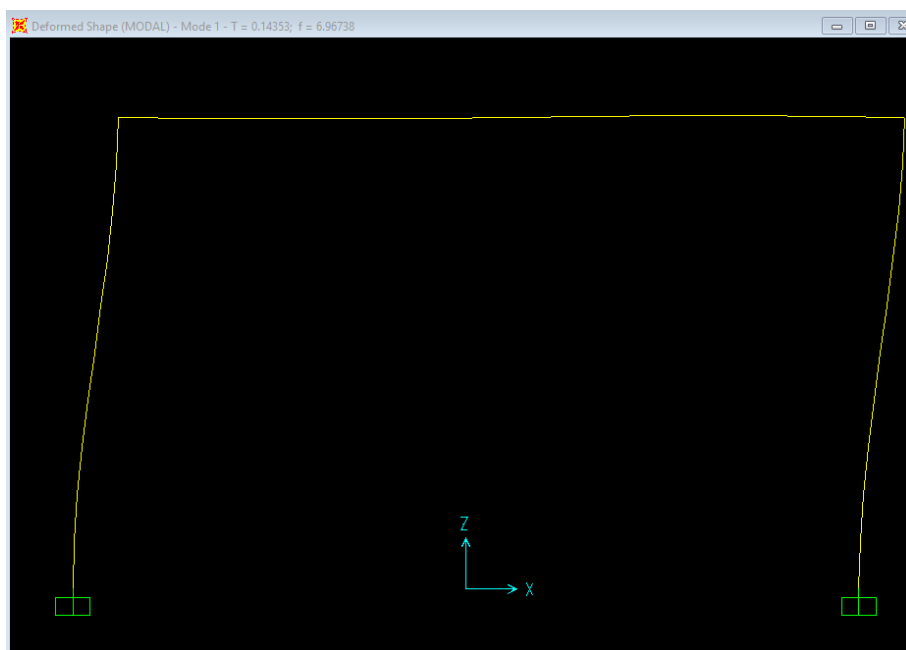
Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τις ιδιομορφές του φορέα αν στις φορτιστικές καταστάσεις (Load Cases) οριστεί και η MODAL όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Προφανώς ο φορέας που εξετάζεται δεν έχει 12 δυναμικούς βαθμούς ελευθερίας ώστε να υπολογιστούν 12 ιδιομορφές, δεν είναι απαραίτητο όμως να οριστεί ο ακριβής αριθμός αυτών που θα υπολογιστούν. Η συγκεκριμένη επιλογή έχει νόημα για πολύπλοκους φορείς με μεγάλο αριθμό ιδιομορφών όπου ο μηχανικός επιλέγει να χρησιμοποιήσει τόσες ώστε να ενεργοποιείται το απαιτούμενο ποσοστό της δρώσας μάζας που ορίζουν οι κανονισμοί.

Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας για την 1η (και μο-



Σχήμα 1.4: Ιδιομορφική φορτιστική κατάσταση

ναδική) ιδιομορφή του κτιρίου που εξετάζεται. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η ιδιοπερίοδος είναι  $T = 1435\text{sec}$



Σχήμα 1.5: 1η ιδιομορφή

## 1.4 Υπολογισμός επιτάχυνσης σχεδιασμού

Η επιτάχυνση σχεδιασμού υπολογίζεται βάσει του φάσματος σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 ([3]). Για αποθέσεις από πυκνά αμμοχάλικα το έδαφος είναι κατηγο-

ρίας C οπότε:  $S = 1.15$ ,  $T_B = 0.20\text{sec}$ ,  $T_C = 0.60\text{sec}$ ,  $T_D = 1.00\text{sec}$ .

Παρατηρείται ότι ισχύει  $T = 0.1435\text{sec} < T_B = 0.20\text{sec}$ , άρα βρισκόμαστε στον πρώτο κλάδο του φάσματος σχεδιασμού και η επιτάχυνση λαμβάνεται από τη σχέση:

$$S_d(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (1.2)$$

όπου:

$\alpha_g$  Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $\alpha_g = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} = 1.0 \cdot 0.24g$

$\gamma_I = 1.0$  για κατηγορία σπουδαιότητας II (συνήθη κτίρια)

$\alpha_{gR} = 0.24g$  για ζώνη II

$S = 1.15$  για έδαφος κατηγορίας C

$T = 0.1435\text{sec}$  η ιδιοπερίοδος της κατασκευής

$T_B = 0.20\text{sec}$  για έδαφος κατηγορίας C

$q$  ο συντελεστής συμπεριφοράς.  $q = q_0 \cdot k_w \geq 1.5 \Rightarrow q = 3.3$

$q_0 = 3.3$  για μονώροφα κτίρια ΚΠΜ, κανονικά καθύψος και σε κάτοψη

$k_w = 1.0$  για πλαισιακή κατασκευή

Από τη σχέση 1.2 η επιτάχυνση σχεδιασμού προκύπτει:  $S_d(T) = 0.202g$

## 1.5 Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης

Η σεισμική τέμνουσα δύναμη βάσης  $F_b$  δίνεται από τη σχέση:

$$F_b = S_d(T) \cdot m \cdot \lambda \quad (1.3)$$

όπου:

$S_d(T)$  Η επιτάχυνση σχεδιασμού όπως υπολογίστηκε από το φάσμα του ΕΚ8 [3]

$m$  Η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από την θεμελίωση ή πάνω από την άνω επιφάνεια άκαμπτης βάσης. Για το κτίριο που μελετάται υπολογίστηκε  $m = 11.72t$

$\lambda$  συντελεστής διόρθωσης.  $\lambda = 1.0$  για μονώροφα κτίρια

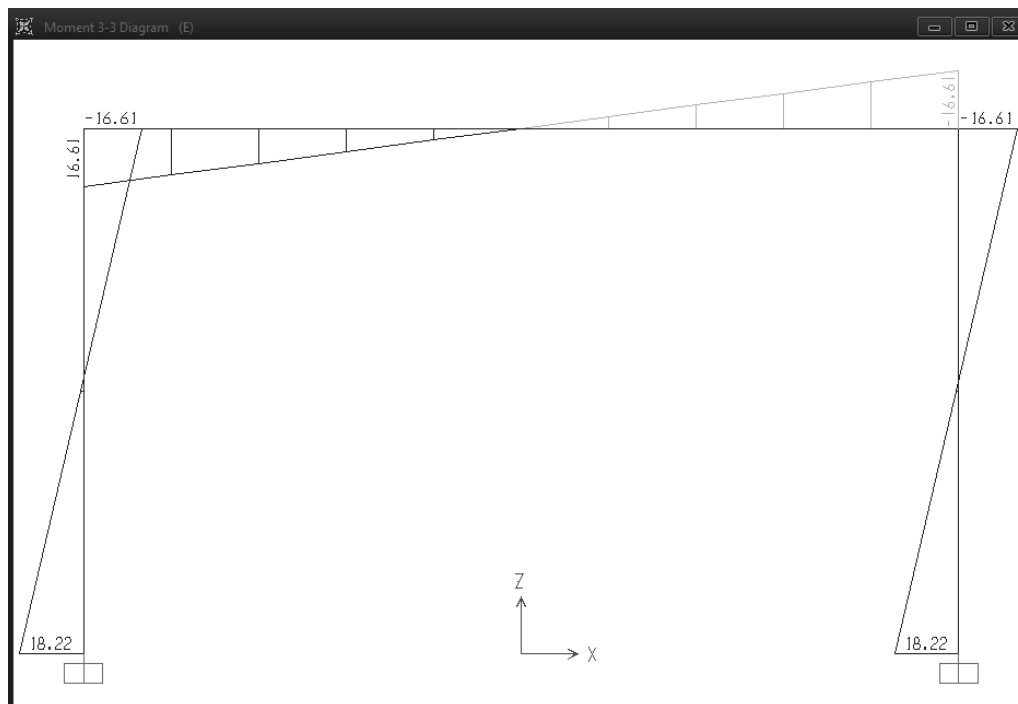
Από τα παραπάνω προκύπτει:  $F_b = 23.22kN$

Η τέμνουσα βάσης κατανέμεται καθύψος του κτιρίου βάσει της μάζας του κάθε ορόφου και της θεμελιώδους ιδιομορφής, όπως θα περιγραφεί στα επόμενα παραδείγματα, στην περίπτωση όμως ενός μονώροφου κτιρίου το σύνολό της εφαρμόζεται στη στάθμη του 1ου ορόφου. Έτσι, στον 1ο όροφο έχουμε:

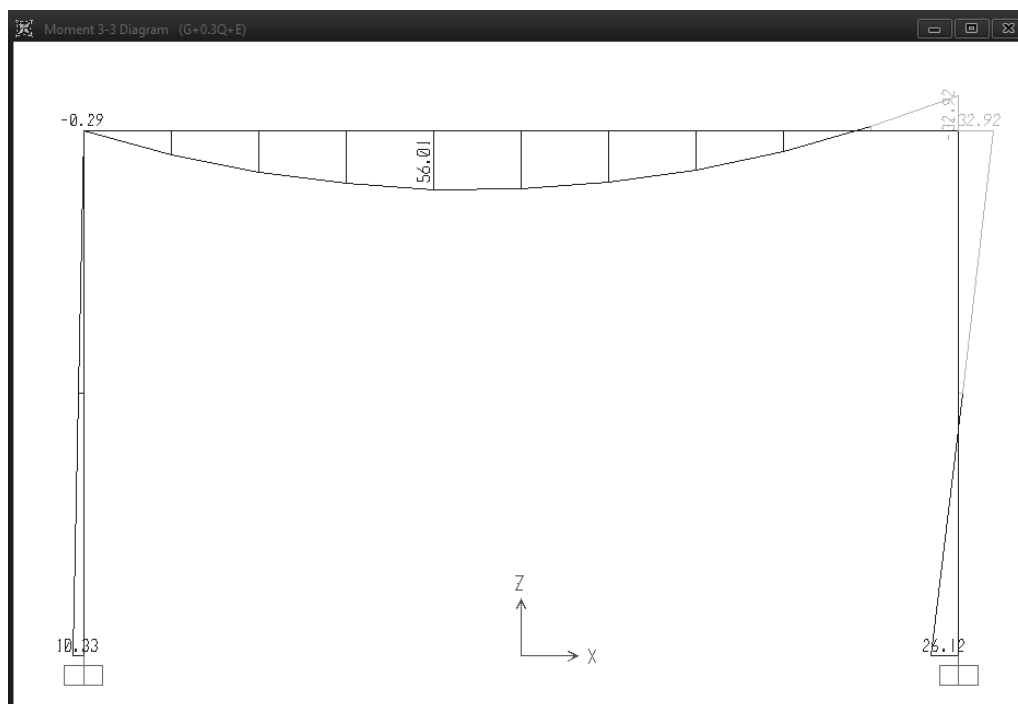
$$F_1 = F_b = 23.22kN \quad (1.4)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της οριζόντιας δύναμης  $E$  που είχε οριστεί στο πρόγραμμα με την τιμή της  $F_1$  μπορεί να γίνει η επίλυση με το πρόγραμμα σύμφωνα με τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης του ΕΚ8 [3].

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα από την επίλυση.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα ροπών για σεισμικά φορτία (μόνο E)



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα ροπών για τον σεισμικό συνδυασμό (G+0.3Q+E)

## 1.6 Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης

Στο SAP2000 υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί αυτόματα το πλήρες φάσμα σχεδιασμού του ΕΚ8 [3]. Επιλέγεται *Define->Functions->Response Spectrum* όπου ορίζονται οι παράμετροι του φάσματος σύμφωνα με την καρτέλα του σχήματος 1.8 και στη συνέχεια η αντίστοιχη φορτιστική κατάσταση (σχήμα 1.9) και ο συνδυασμός φόρτισης (σχήμα 1.10).

Period	Acceleration
0	1.805
0.0667	1.8871
0.1333	1.9691
0.2	2.0512
0.6	2.0512
0.8333	1.4769
1.0667	1.1538
1.3	0.9467
1.5333	0.8026

Σχήμα 1.8: Εισαγωγή του φάσματος σχεδιασμού του ΕΚ8 στο SAP2000

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	EC8_SPEC	1
Accel	U1	EC8_SPEC	1

Σχήμα 1.9: Φασματική φορτιστική κατάσταση στο SAP2000

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα από την επίλυση.

**Load Combination Data**

Load Combination Name (User-Generated):

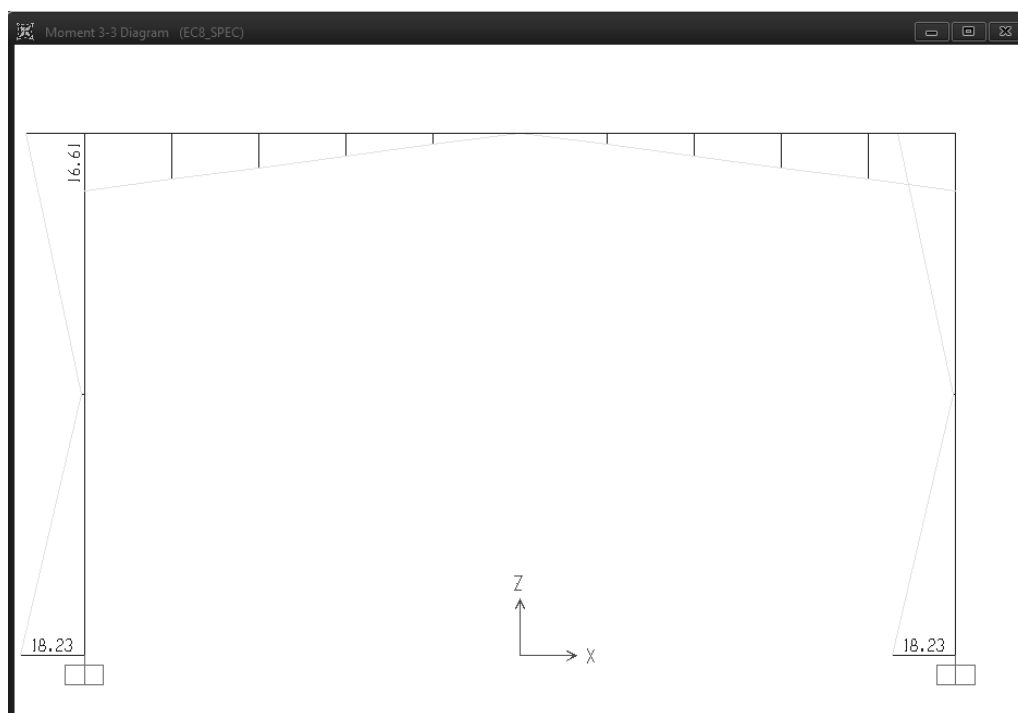
Notes:

Load Combination Type:

Options:

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
G	Linear Static	1.
Q	Linear Static	0.3
EC8_SPEC	Response Spectrum	1.

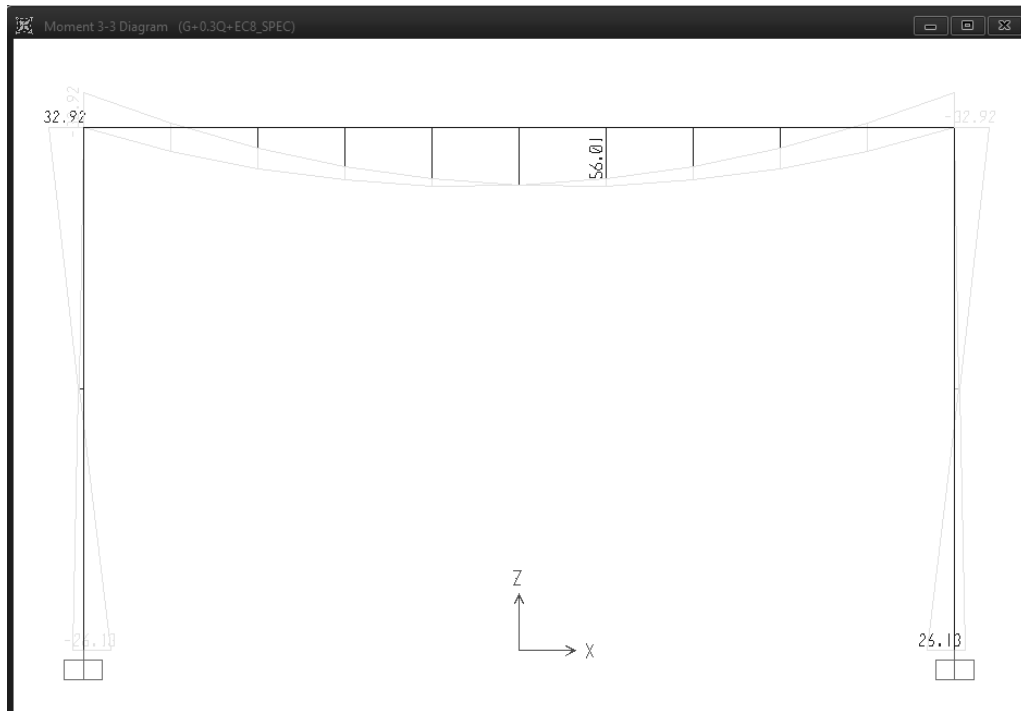
Σχήμα 1.10: Σεισμικός συνδυασμός  $G+0.3Q+EC8SPEC$ 

Σχήμα 1.11: Διάγραμμα ροπών για την φόρτιση με το φάσμα σχεδιασμού του EC8

Παρατηρείται ότι οι τιμές στο σχήμα 1.11 είναι μόνο θετικές και ότι το διάγραμμα δεν είναι συνεχές αλλά εμφανίζει μια καμπή στο μέσο των δομικών στοιχείων. Αυτό συμβαίνει γιατί τα αποτελέσματα της επίλυσης με το φάσμα σχεδιασμού μπορεί να έχουν είτε θετικές, είτε αρνητικές τιμές και το SAP2000 [2] παρουσιάζει σε κάθε θέση τις απόλυτες τιμές των αποτελεσμάτων. Με τη λογική αυτή στο σχήμα 1.12 όπου είναι η επαλληλία των κατακόρυφων φορτίων με το φάσμα



σχεδιασμού, ουσιαστικά παρουσιάζεται μια περιβάλλουσα όπου στη κάθε θέση εμφανίζονται 2 τιμές, η μία αντιστοιχεί στη σεισμική φόρτιση με φορά προς τα δεξιά και η άλλη στη σεισμική φόρτιση με φορά προς τα αριστερά.



Σχήμα 1.12: Διάγραμμα ροπών για τον σεισμικό συνδυασμό (G+0.3Q+EC8SPEC)

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές στα σχήματα 1.6 και 1.11 είναι όμοιες. Αυτό συμβαίνει γιατί ο φορέας λειτουργεί ουσιαστικά ως μονοβάθμιος (έχει μόνο μία ιδιομορφή) οπότε τα αποτελέσματα της μέθοδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης και της ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης πρακτικά συμπίπτουν, κάτι που δε συμβαίνει βέβαια σε πολυβάθμιους φορείς.

## 1.7 Υπολογισμός της ιδιοπεριόδου χωρίς τη χρήση λογισμικού

Όπως είναι γνωστό, η ιδιοπερίοδος ενός μονοβάθμιου συστήματος με μάζα  $m$  και δυσκαμψία  $K$  δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (1.5)$$

Θεωρώντας ότι το σύστημα συμπεριφέρεται ως αμφίπακτο, η δυσκαμψία του κάθε υποστυλώματος θα δίνεται από τη σχέση

$$K_{\nu\pi} = \frac{12 \cdot E \cdot I}{H^3} \quad (1.6)$$

όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  $I = \frac{b^4}{12}$  η ροπή αδράνειας για τετραγωνική διατομή και  $H$  το ύψος του υποστυλώματος

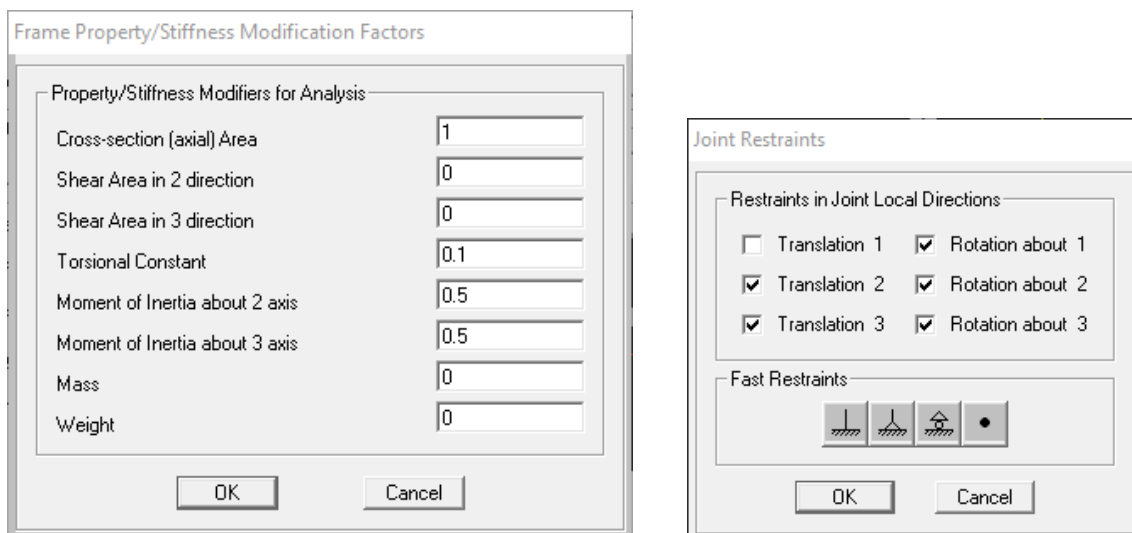
Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις ( $E = 28GPa$ ,  $b = 0.40m$ ,  $H = 3m$  και  $m = 11.72t$ ) προκύπτουν:

- $I = 2.133 \cdot 10^{-3} m^4$
- $K_{v\pi} = 26548.15 kN/m$
- $K_{cr} = 0.5 \cdot K_{v\pi} = 13274.07 kN/m$  (υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιήθηκαν ρηγματωμένες διατομές οπότε η δυσκαμψία μειώθηκε στο 50% της πλήρους διατομής)
- $K = 2 \cdot K_{cr} = 26548.15 kN/m$  (για 2 υποστυλώματα)

και τελικά  $T = 0.132 sec$

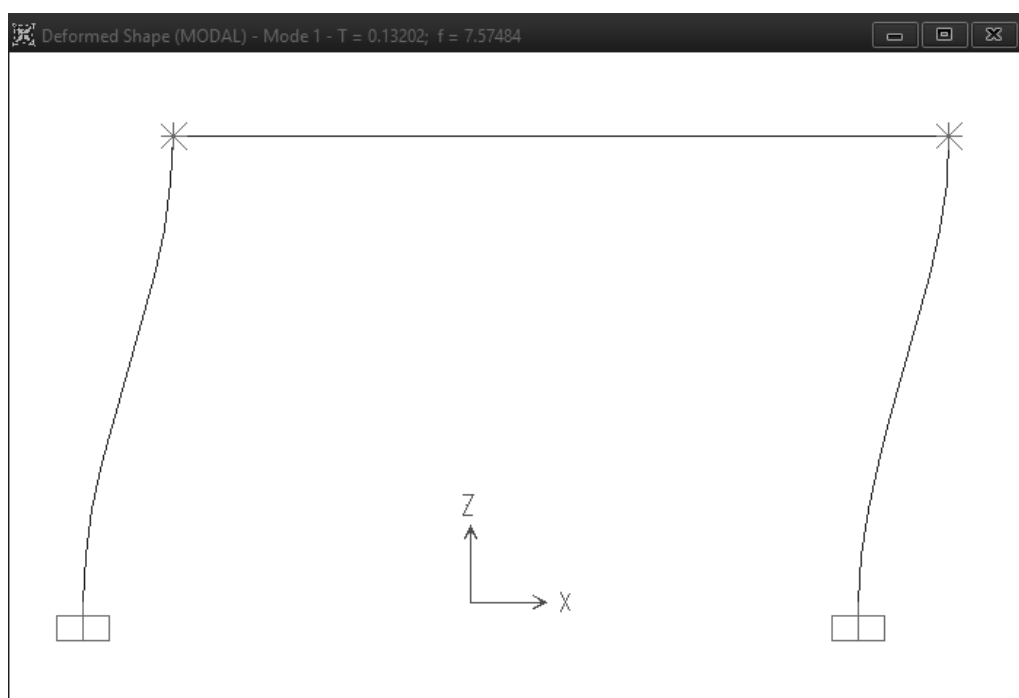
Παρατηρείται ότι η τιμή της ιδιοπεριόδου δεν ταυτίζεται με αυτήν που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα (ήταν  $T = 0.1435 sec$ ). Για να προκύψουν οι ίδιες τιμές και από την ανάλυση με το SAP2000 [2] πρέπει να γίνουν τα εξής ώστε οι δύο υπολογισμοί να είναι πλήρως συμβατοί:

- Να οριστεί μηδενικός συντελεστής (modifier) στους όρους που αφορούν τις τέμνουσες
- Να δεσμευτούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας στη στάθμη του ορόφου, εκτός από την οριζόντια μετακίνηση



Σχήμα 1.13: Μηδενισμός της συμμετοχής των έργων των τεμνουσών δυνάμεων (αριστερά) και παγίωση ελευθεριών κίνησης πλην της οριζόντιας μετακίνησης (δεξιά)

Τρέχοντας και πάλι την ανάλυση η ιδιομορφή φαίνεται στο σχήμα 1.14 όπου παρατηρείται ότι η τιμή της ιδιοπεριόδου προκύπτει  $T = 0.132 sec$ , όμοια ακριβώς με την τιμή που υπολογίστηκε από τη σχέση 1.6



Σχήμα 1.14: Ιδιομορφή του φορέα ώστε να προσομοιώνεται η επίλυση "με το χέρι"



# Βιβλιογραφία

- [1] Εμ. Κίρτας & Γ. Παναγόπουλος. *Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα Η/Υ. [ηλεκτρ. βιβλ.].* Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, 2015.
- [2] Computers and Structures Inc. *SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design*, 2010.
- [3] CEN. *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.* European Committee for Standardisation, Brussels, 2004.