2017

Επισκευές-Ενισχύσεις Κτιρίων

ΒΟΗΘΗΜΑ ΑΣΚΗΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

ΓΙΩΡΓΟΣ ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ

1 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2 Δεδομένα - Εκφώνηση 4

2.1 Γεωμετρία φορέα 4

2.2 Ζήτημα 1ο. Προσομοίωση του φορέα 5

2.3 Ζήτημα 2ο. Δυναμικά χαρακτηριστικά – Σεισμικές φορτίσεις 6

2.4 Ζήτημα 3ο. Ανελαστική στατική ανάλυση βάσει SAP2000 (FEMA) 7

2.5 Ζήτημα 4ο. Ανελαστική στατική ανάλυση βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ. 8

3 Προσομοίωση του φορέα 9

3.1 Γεωμετρία φορέα 9

3.2 Συνθήκες στήριξης - Διαφράγματα 11

3.3 Υλικά 12

3.3.1 Σκυρόδεμα 12

3.3.2 Χάλυβας 12

3.4 Διατομές δομικών στοιχείων 13

3.5 Φορτία – Μάζες 14

3.6 Αποτελέσματα ανάλυσης 17

4 Δυναμικά χαρακτηριστικά – Σεισμικές φορτίσεις 18

4.1 Ιδιομορφές απόκρισης του φορέα 18

4.2 Σεισμικές δυνάμεις 19

4.3 Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης κατά EC8. Στατική ανάλυση 22

4.4 Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης 25

4.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων στατικής και δυναμικής ανάλυσης 27

5 Ανελαστική στατική ανάλυση βάσει SAP2000 (FEMA) 30

5.1 Διαγράμματα ροπών-στροφών σύμφωνα με την αυτόματη διαδικασία του SAP2000 30

5.1.1 Σκυρόδεμα 30

5.1.2 Χάλυβας 31

5.1.3 Εισαγωγή του οπλισμού των δομικών στοιχείων 33

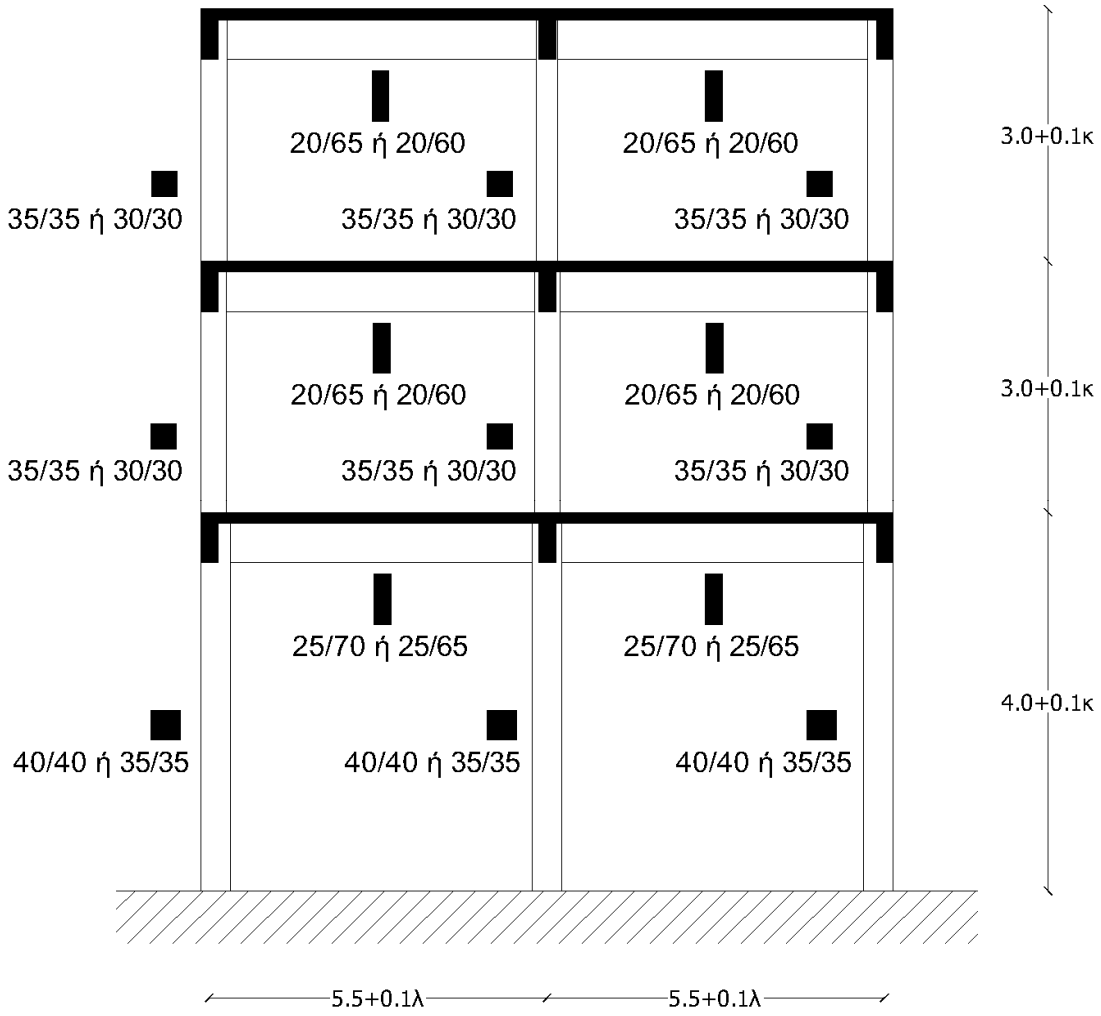
5.1.4 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς ... 35
5.1.5 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα ... 36
5.1.6 Εμφάνιση αυτόματων πλαστικών αρθρώσεων ... 37
5.2 Ανελαστικές στατικές αναλύσεις ... 38
5.2.1 Ανελαστική ανάλυση για τα κατακόρυφα φορτία ... 38
5.2.2 Αναλύσεις για τις οριζόντιες φορτίσεις ... 40
5.3 Αποτελέσματα ανελαστικών στατικών αναλύσεων ... 42
5.3.1 Καμπύλες αντίστασης ... 42
5.3.2 Πλαστικός μηχανισμός ... 42
5.3.3 Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης ... 44
5.3.4 Ανελαστική στατική ανάλυση μέχρι τη στοχευόμενη μετακίνηση δ_t ... 46
6 Ανελαστική στατική ανάλυση βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ. ... 49
6.1 Διαγράμματα ροπών-στροφών σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ ... 49
6.1.1 Παράδειγμα υπολογισμού δοκού ... 49
6.1.1.1 Στοιχεία διατομής ... 49
6.1.1.2 Υπολογισμός της καμπυλότητας και της ροπής διαρροής ... 51
6.1.1.3 Υπολογισμός της στροφής διαρροής ... 53
6.1.1.4 Υπολογισμός της στροφής αστοχίας ... 55
6.1.1.5 Υπολογισμός για τις θετικές ροπές ... 57
6.1.2 Παράδειγμα υπολογισμού υποστυλώματος ... 58
6.1.2.1 Στοιχεία διατομής ... 58
6.1.2.2 Υπολογισμός της καμπυλότητας και της ροπής διαρροής ... 60
6.1.2.3 Υπολογισμός της στροφής διαρροής ... 62
6.1.2.4 Υπολογισμός της στροφής αστοχίας ... 63

2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΕΚΦΩΝΗΣΗ

2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΟΡΕΑ

Δίνεται το παρακάτω πλαίσιο που αποτελεί τμήμα κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Να θεωρηθεί ότι για κάθε ομάδα **κ** είναι ο αριθμός του τμήματος και **λ** είναι ο αριθμός της ομάδας



2.2 **ΖΗΤΗΜΑ 1ο. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ**

Να γίνει η προσομοίωση του παραπάνω φορέα στο SAP2000.

Οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων να θεωρηθούν ως εξής:

	λ≤4	λ≥5
Στύλοι ισογείου	35/35	40/40
Στύλοι ορόφων	30/30	35/35
Δοκοί ισογείου	25/65	25/70
Δοκοί ορόφων	20/60	20/65

Τα φορτία των δοκών (σε kN/m) να θεωρηθούν ως εξής:

	λ≤4	λ≥5
Μόνιμα φορτία (g) ισογείου	30.00+0.3λ+0.2κ	34.00+0.3λ+0.2κ
Μόνιμα φορτία (g) ορόφων		
Ωφέλιμα φορτία (q) ισογείου	9.00+0.2λ+0.1κ	10.00+0.2λ+0.1κ
Ωφέλιμα φορτία (q) ορόφων		

Το σκυρόδεμα να θεωρηθεί ότι έχει μέση θλιπτική αντοχή f_{cm}=16+κ+0.5λ (MPa)

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος να θεωρηθεί ότι προκύπτει από τη σχέση του EC2. Να ληφθεί υπόψη μόνο ένα δεκαδικό ψηφίο χρησιμοποιώντας το E_{cm} σε GPa

$E_{cm}=22(f_{cm}/10)^{0.3}$ (όπου το f_{cm} σε MPa και το E_{cm} προκύπτει σε GPa)

2.3 ΖΗΤΗΜΑ 2ο. ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ – ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

- Να γίνει η κατανομή καθύψος των σεισμικών δυνάμεων για το ιδιομορφικό (βάσει της 1ης ιδιομορφής) και το ομοιόμορφο μοντέλο φόρτισης
- Να υπολογιστεί η τέμνουσα βάσης για το φάσμα σχεδιασμού του EC8 και στη συνέχεια να κατανεμηθούν οι σεισμικές δυνάμεις καθύψος του κτιρίου ώστε να εφαρμοστεί η ισοδύναμη στατική μέθοδος
- Να γίνει φασματική ανάλυση για το φάσμα σχεδιασμού του EC8

Να θεωρηθούν τα εξής:

	κ≤2	κ≥3
Επιτάχυνση εδάφους a_{gR}	0.16g	0.24g

	λ≤4	λ≥5
Κατηγορία πλαστιμότητας	ΚΠΜ	ΚΠΥ

	λ≤1	2≤λ≤3	4≤λ≤5	6≤λ≤7	λ≥8
Κατηγορία εδάφους	A	B	C	D	E

	λ≤1	2≤λ≤4	5≤λ≤7	λ≥8
Κατηγορία σπουδαιότητας	I	II	III	IV

2.4 ΖΗΤΗΜΑ 3ο. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΕΙ SAP2000 (FEMA)

Να γίνει ανελαστική στατική (pushover) ανάλυση για το ιδιομορφικό και το ομοιόμορφο μοντέλο φόρτισης, βάσει των διαγραμμάτων ροπών-στροφών που υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα.

- Να θεωρηθεί ο παρακάτω οπλισμός για τα δομικά στοιχεία

	λ≤4		λ≥5	
	Διαμήκης	Εγκάρσιος	Διαμήκης	Εγκάρσιος
Στύλοι ισογείου	8Ø18	Ø8/120	8Ø20	Ø8/120
Στύλοι ορόφων	8Ø16	Ø8/150	8Ø18	Ø8/150
Δοκοί ισογείου Ακραίες στηρίξεις	3Ø18	Ø8/160	3Ø20	Ø8/160
Δοκοί ισογείου Μεσαίες στηρίξεις	5Ø18	Ø8/140	5Ø20	Ø8/140
Δοκοί ορόφων Ακραίες στηρίξεις	3Ø16	Ø8/160	3Ø18	Ø8/160
Δοκοί ορόφων Μεσαίες στηρίξεις	5Ø16	Ø8/140	5Ø18	Ø8/140

- Ο οπλισμός των στηρίξεων των δοκών να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην άνω ίνα ενώ στην κάτω να τοποθετηθεί το ήμισυ αυτού, της ίδιας διαμέτρου (πχ όπου υπάρχουν άνω 5Ø18 τότε κάτω να τοποθετηθούν 5/2=2.5 οπότε 3Ø18).
- Για το σκυρόδεμα να θεωρηθούν οι τιμές παραμόρφωσης από το σχήμα 12.5 του βιβλίου «Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα ΗΥ»
- Για τον χάλυβα, να θεωρηθούν οι παράμετροι σύμφωνα με το σχήμα 12.9 του ίδιου βιβλίου, ως εξής:

  $f_y=(460+10\lambda)MPa$

  $f_u=1.25\ f_y$

  $f_{ye}=1.15\ f_y$

  $f_{ue}=1.10\ f_u$

Να υπολογιστεί η στοχευόμενη μετακίνηση και να αποτιμηθεί η απόκριση του φορέα για τη σεισμική δράση που αντιστοιχεί σε επιτάχυνση του εδάφους α_{gR} όπως αυτή υπολογίστηκε στο ζήτημα 2.

2.5 ΖΗΤΗΜΑ 4ο. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΕΙ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Να γίνει ανελαστική στατική (pushover) ανάλυση για το ιδιομορφικό και το ομοιόμορφο μοντέλο φόρτισης, βάσει των διαγραμμάτων ροπών-στροφών που υπολογίζονται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

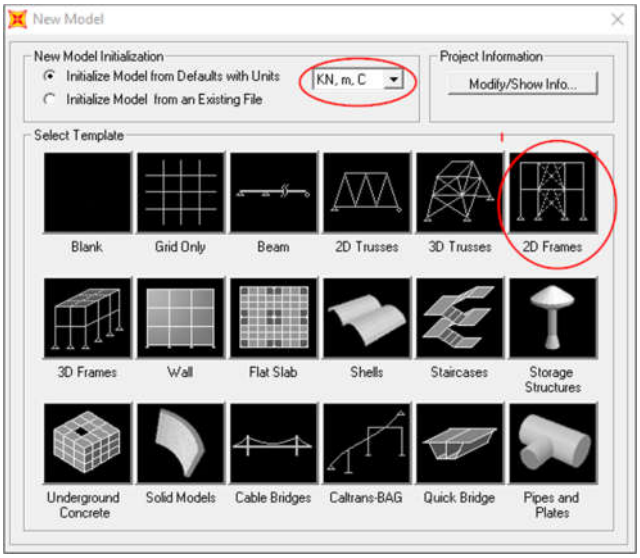
Να υπολογιστεί η στοχευόμενη μετακίνηση και να αποτιμηθεί η απόκριση του φορέα για τη σεισμική δράση που αντιστοιχεί σε επιτάχυνση του εδάφους α_{gR} όπως αυτή υπολογίστηκε στο ζήτημα 2.

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

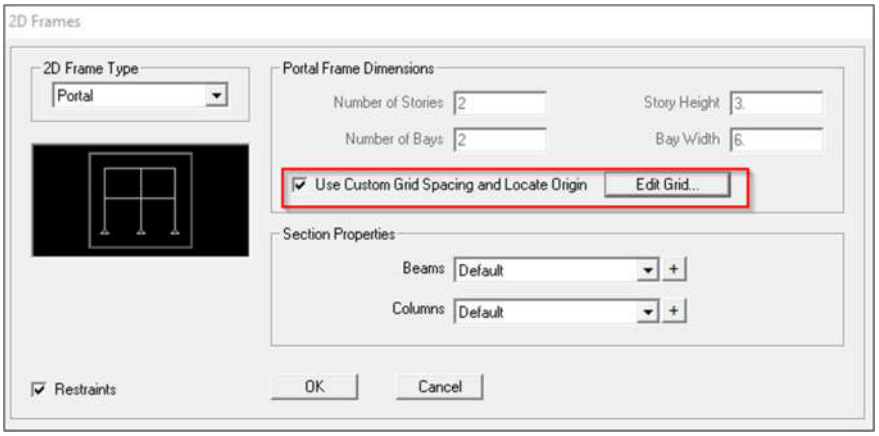
Το παράδειγμα που θα παρουσιαστεί βασίζεται στις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ενδεικτικά κατά τη διάρκεια των μαθημάτων του εργαστηρίου, χωρίς να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των **κ** και **λ** που αντιστοιχούν σε κάθε ομάδα.

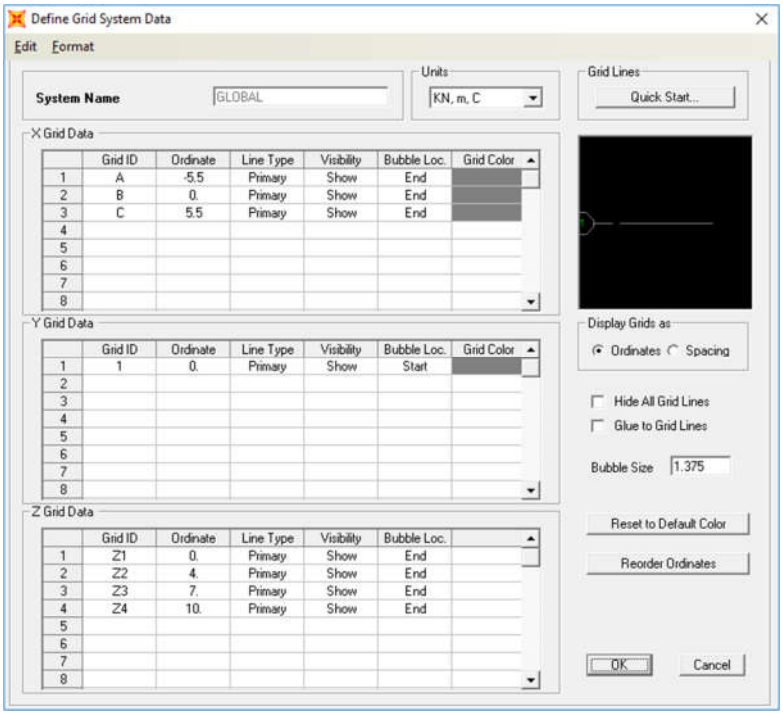
3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΟΡΕΑ

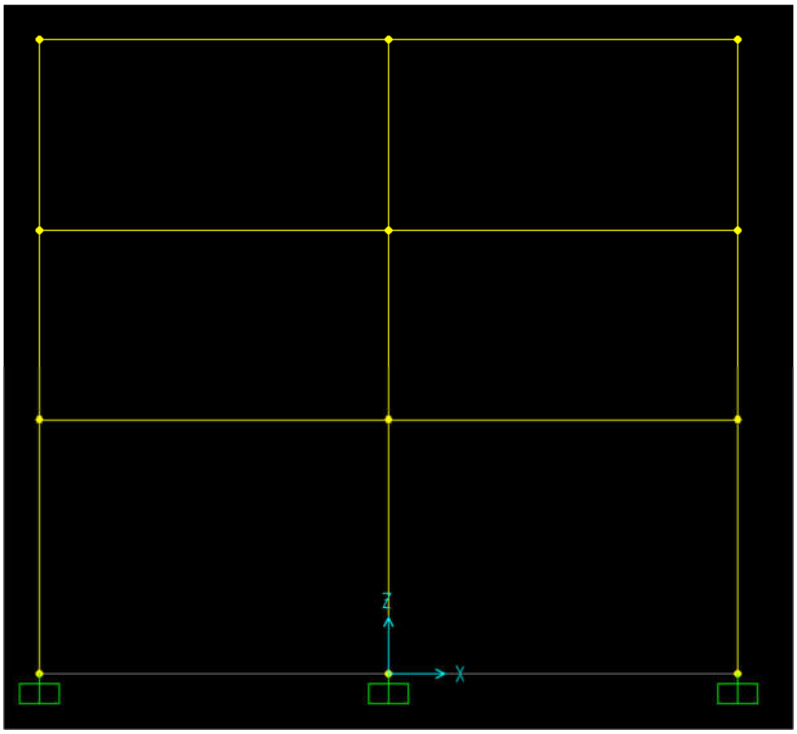
Εισάγεται νέο μοντέλο επίπεδου πλαισίου (2D frame) στο πρόγραμμα προσέχοντας να επιλεχθούν οι σωστές μονάδες μέτρησης.



Με δεδομένο ότι οι διαστάσεις των ορόφων δεν είναι κοινές είναι βολικό να γίνει εισαγωγή του κανάβου από τον χρήστη.



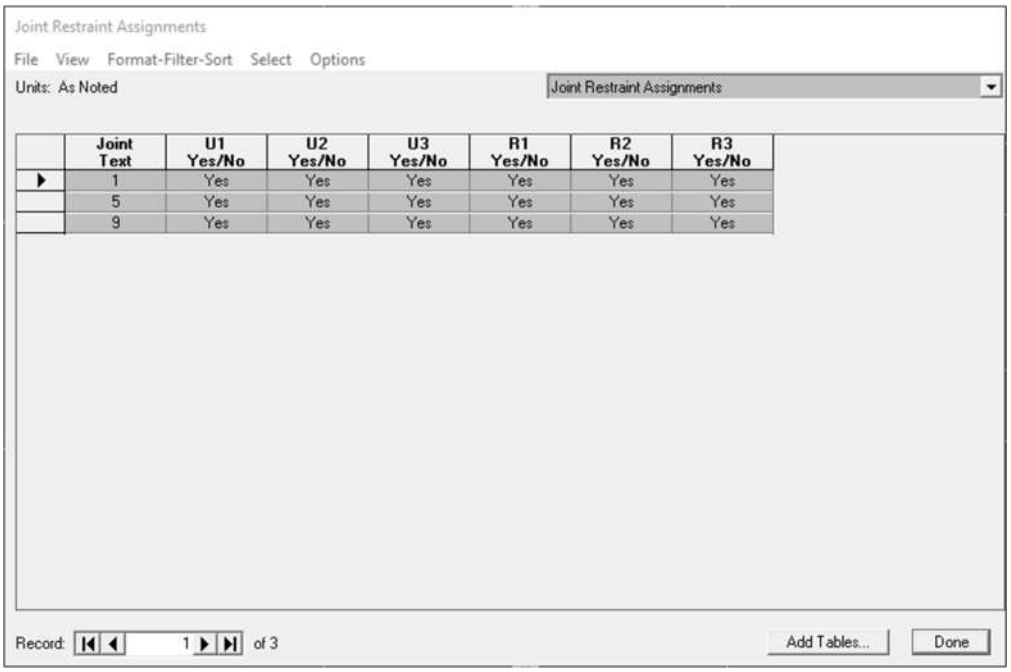


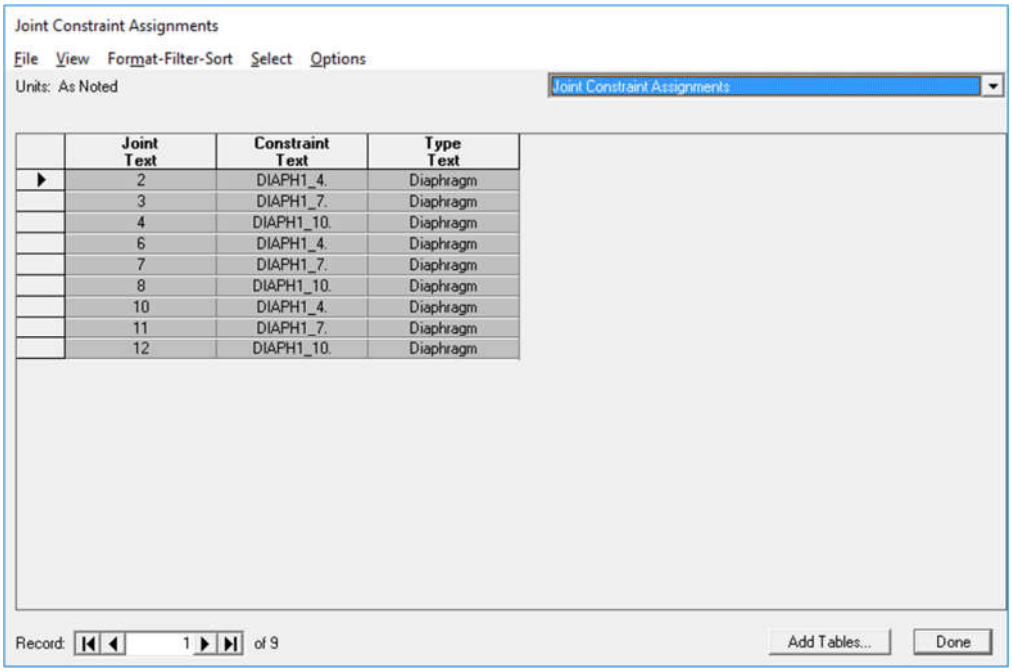


Στο παράδειγμα το μήκος του κάθε ανοίγματος είναι 5.50m ενώ τα ύψη των ορόφων είναι 4.0m για το ισόγειο και 3.0m για τους ανώτερους ορόφους.

3.2 **ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ - ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΑ**

Τα υποστυλώματα θεωρούνται πακτωμένα στη βάση τους (παγιώνονται όλοι βαθμοί ελευθερίας) ενώ θεωρούνται διαφράγματα στη στάθμη του κάθε ορόφου.

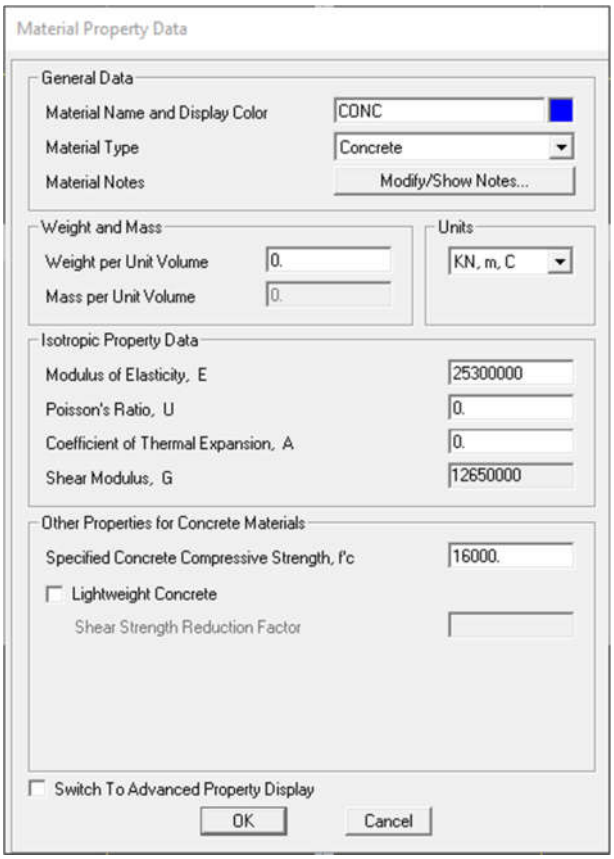




3.3 ΥΛΙΚΑ

3.3.1 Σκυρόδεμα

Για f_{cm}=16MPa είναι $E_{cm}=22\cdot(f_{cm}/10)^{0.3}$ =25.3GPa. Δίνεται μηδενικό βάρος στο υλικό καθώς και σε στοιχεία τα οποία δεν απασχολούν την επίλυση που θα πραγματοποιηθεί.



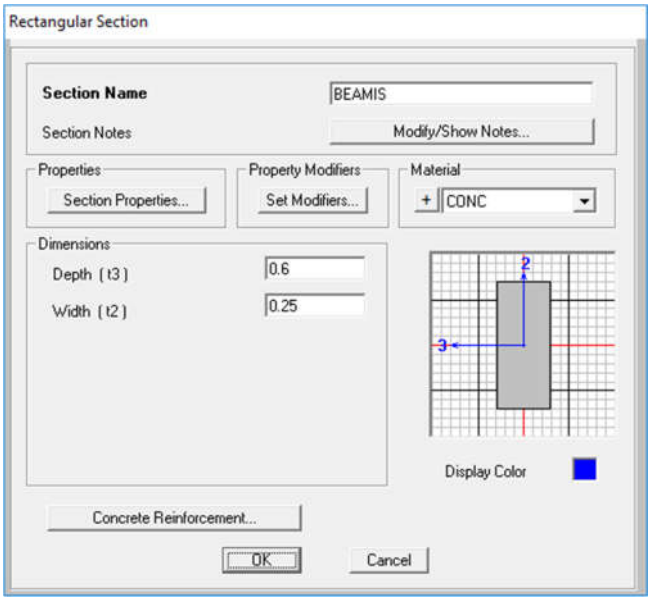
3.3.2 Χάλυβας

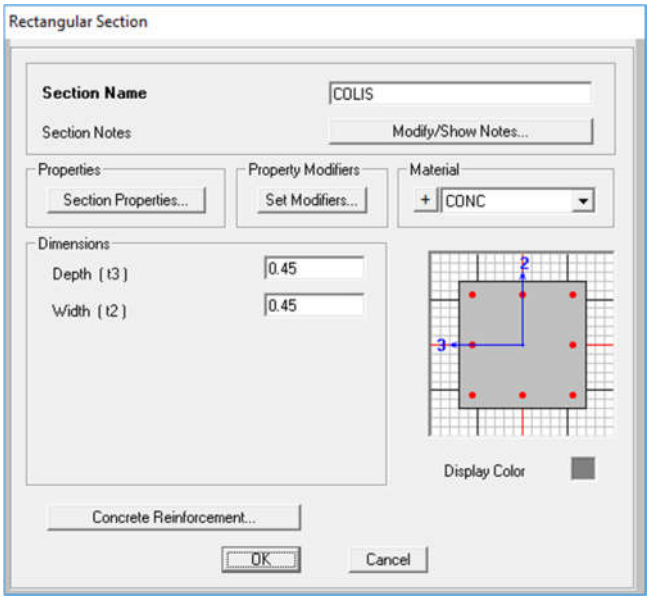
Τα δεδομένα του χάλυβα θα παρουσιαστούν σε επόμενη παράγραφο μαζί με τον οπλισμό των δομικών στοιχείων.

3.4 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

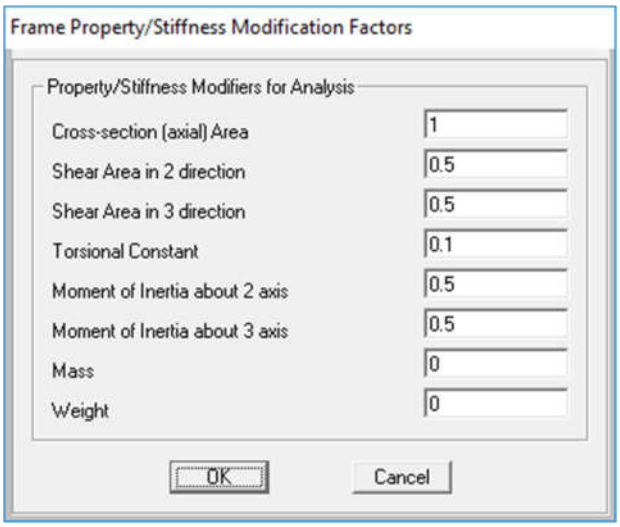
Δίνονται οι διατομές των δομικών στοιχείων με τις διαστάσεις των δεδομένων. Στις δοκούς γίνεται αντιγραφή των διατομών με την προσθήκη ενός δείκτη **r**, πχ για τις δοκούς του ισογείου θα υπάρχουν οι διατομές **BEAMIS** και **BEAMISr** καθώς αυτές θα χρειαστούν στη συνέχεια για την εισαγωγή των οπλισμών. Στο στάδιο αυτό οι **BEAMIS** και **BEAMISr** είναι όμοιες.

Ο οπλισμός θα τοποθετηθεί σε επόμενη παράγραφο.



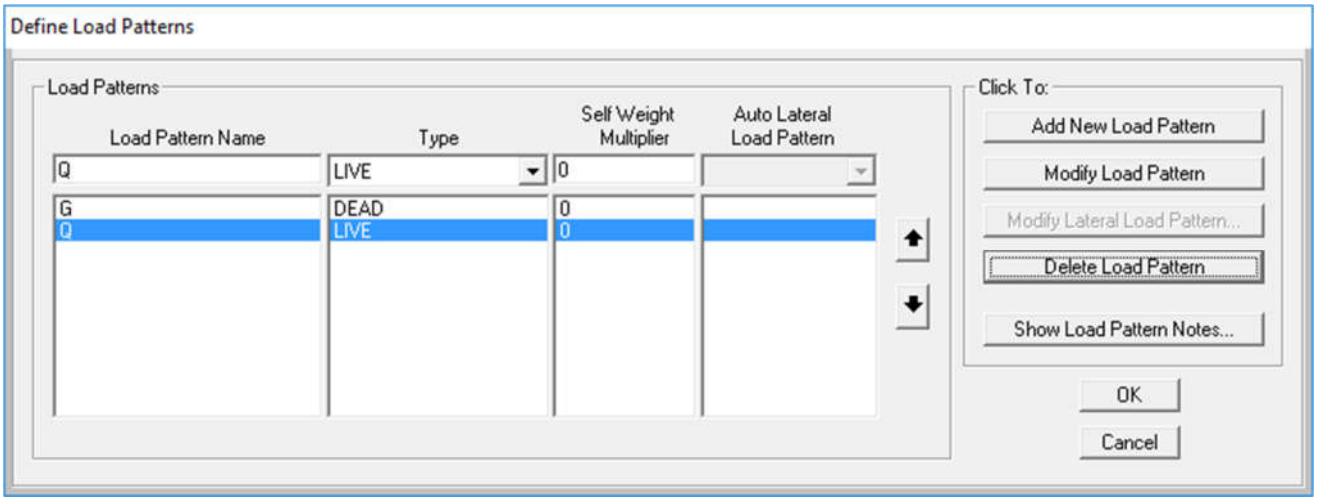


Η προσομοίωση των ρηγματωμένων διατομών γίνεται σε αυτό το στάδιο και σε δοκούς και σε στύλους ως εξής:

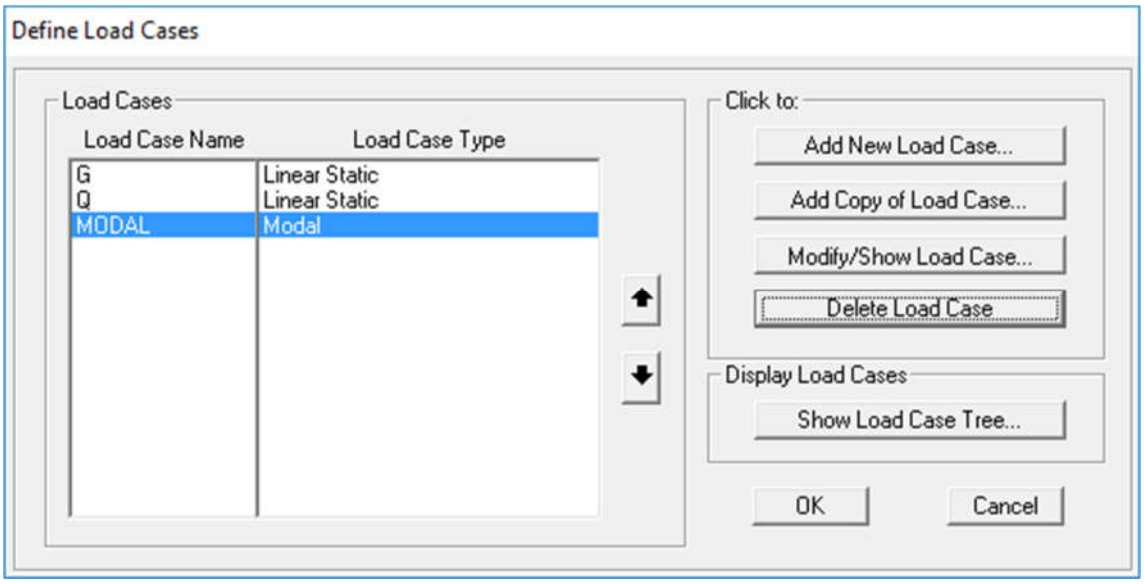


3.5 **ΦΟΡΤΙΑ – ΜΑΖΕΣ**

Δίνονται οι μορφές φόρτισης (load patterns) για τα μόνιμα και τα ωφέλιμα φορτία ως εξής:

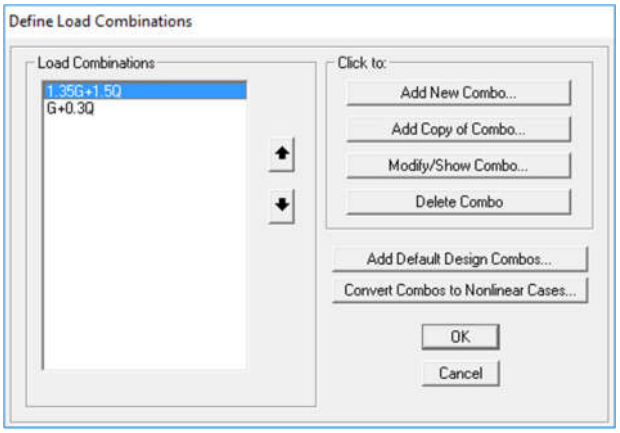


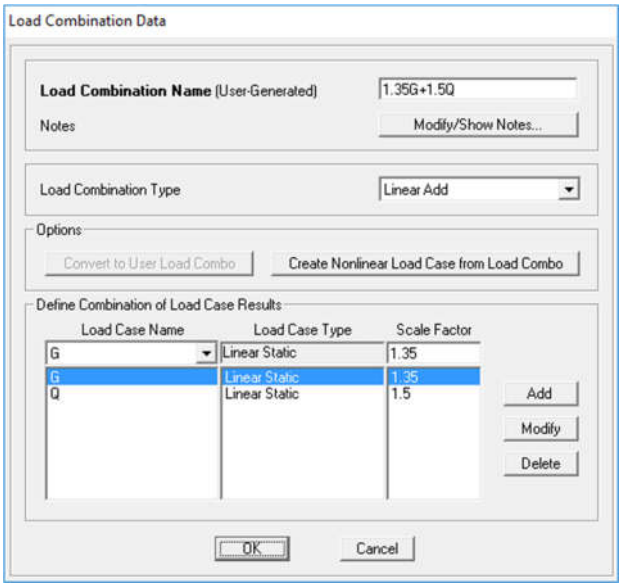
Και στη συνέχεια οι αντίστοιχες φορτιστικές καταστάσεις (load cases):

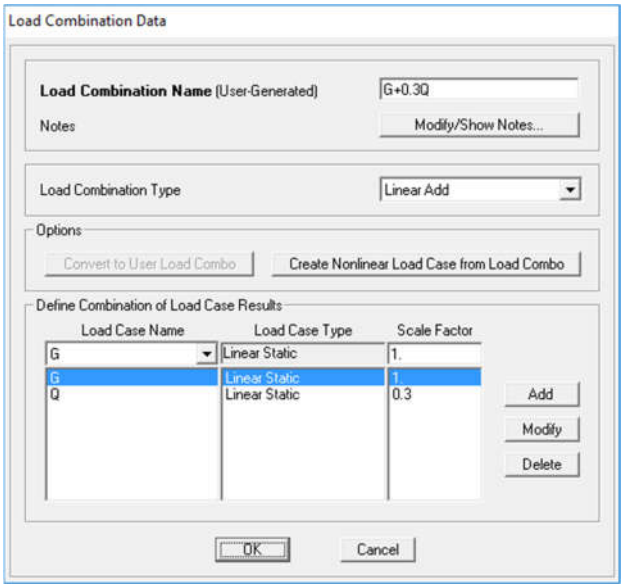


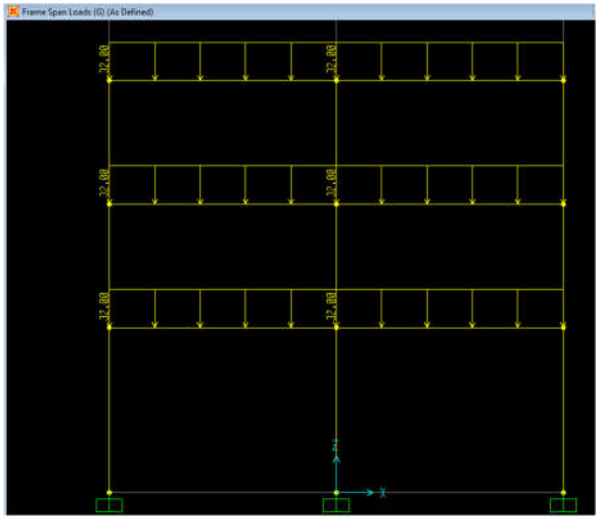
Οι τιμές των φορτίων υπολογίζονται σύμφωνα με την εκφώνηση και αντιστοιχούν μόνο στα ομοιόμορφα φορτία των δοκών. Για απλοποίηση αγνοούνται τα ίδια βάρη των υποστυλωμάτων. Στο παράδειγμα λαμβάνονται τιμές **G=32.00kN/m** και **Q=9.50kN/m**.

Ορίζονται οι συνδυασμοί φόρτισης (load combinations) που αντιστοιχούν στα κατακόρυφα φορτία (οι σεισμικοί σε επόμενη παράγραφο).

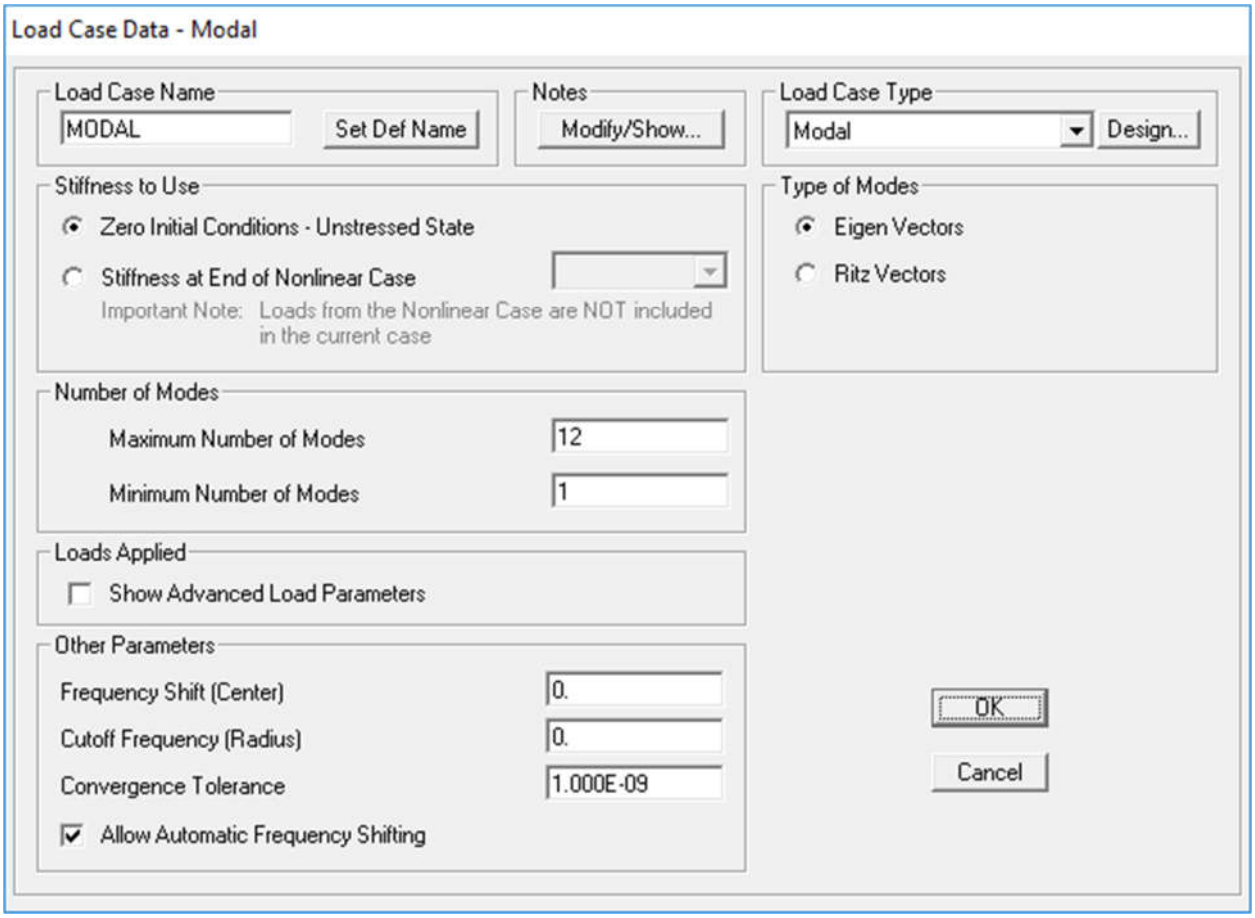








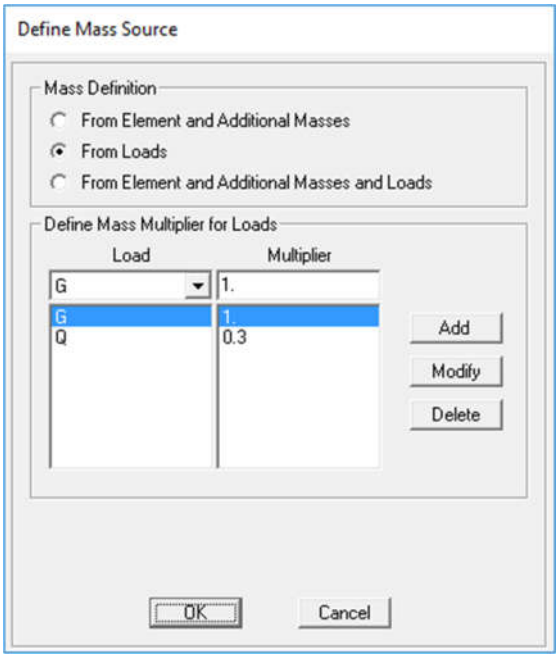
Για να γίνει ιδιομορφική ανάλυση του φορέα και να υπολογιστούν τα δυναμικά του χαρακτηριστικά θα πρέπει να θεωρηθεί η αντίστοιχη ιδιομορφική φορτιστική κατάσταση. Επιλέγονται οι προεπιλεγμένες παράμετροι σύμφωνα με την παρακάτω φόρμα (θα δειχθεί στη συνέχεια ότι ο αριθμός των ιδιομορφών είναι επαρκής).



Χρησιμοποιούνται οι μάζες που αντιστοιχούν στα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού, δηλαδή για G+0.3Q. Οι μάζες που αντιστοιχούν σε κάθε όροφο *i* θα μπορούσαν εύκολα να υπολογιστούν ως εξής.

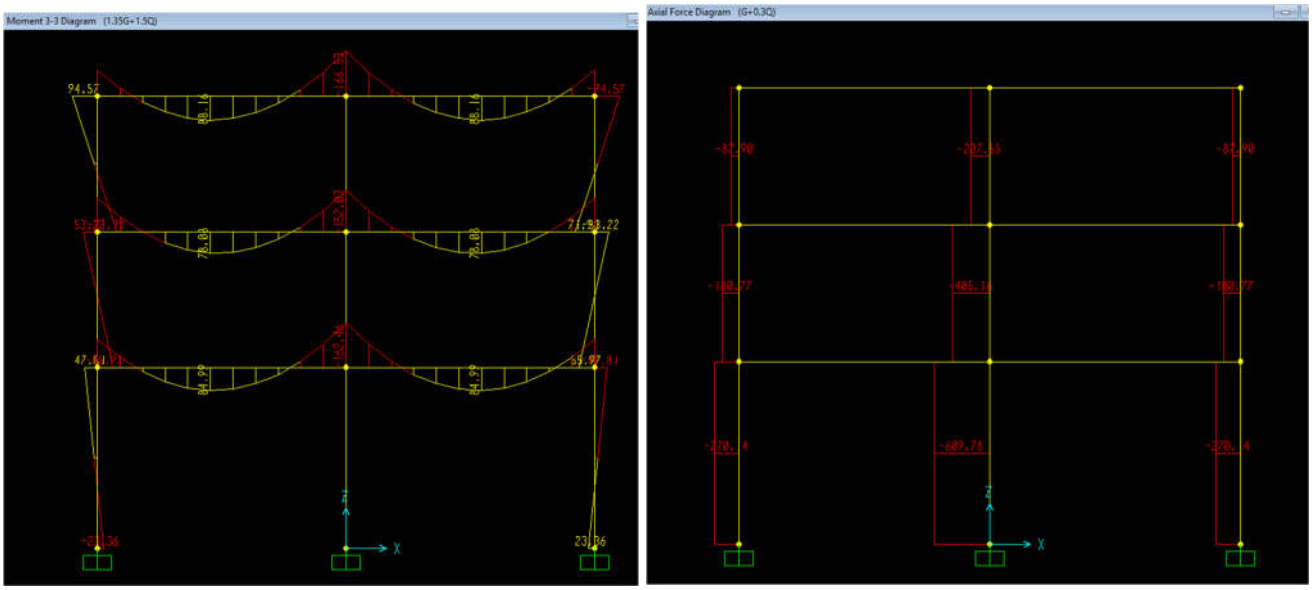
$$m_i = \frac{(G+0.3Q)\cdot L}{g} = \frac{(32.0+0.3\cdot 9.5)kN/m\cdot 11.0m}{9.81m/s^2} = 39.08t$$

Οι μάζες αυτές θα μπορούσαν να τοποθετηθούν από το χρήστη σε οποιοδήποτε κόμβο του κάθε ορόφου καθώς υπάρχει η διαφραγματική λειτουργία. Εναλλακτικά, στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε αν ζητήσουμε από το πρόγραμμα να υπολογίσει αυτόματα τις μάζες από τα φορτία ως εξής.



3.6 **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τα δεδομένα που έχουν μέχρι στιγμής τεθεί στο λογισμικό.

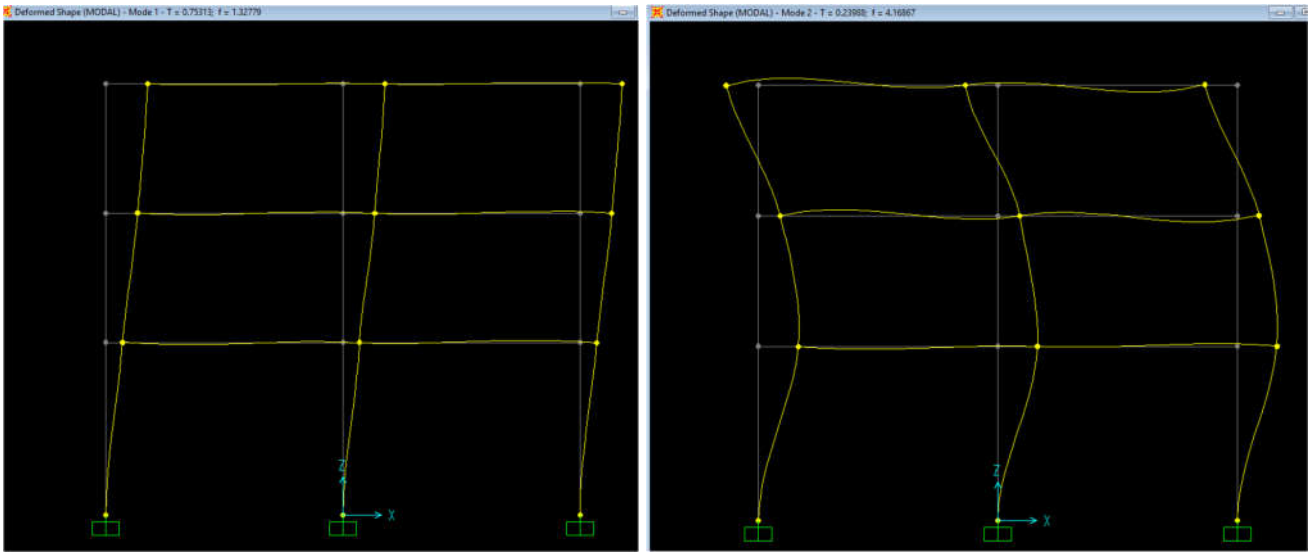


Διάγραμμα ροπών για 1.35G+1.50Q και αξονικών φορτίων για G+0.3Q

4 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ – ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

4.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Από την ανάλυση που ήδη πραγματοποιήθηκε υπολογίστηκαν οι ιδιομορφές του φορέα.



1η και 2η ιδιομορφή απόκρισης

Modal Participating Mass Ratios

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Modal Participating Mass Ratios

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless	RY Unitless	RZ Unitless	SumRX Unitless	SumRY Unitless	SumRZ Unitless
▶	MODAL	Mode	1	0.753131	0.89348	0	0	0.89348	0	0	0	0.78563	0	0	0.78563	0
	MODAL	Mode	2	0.239885	0.09238	0	0	0.98586	0	0	0	0.00027	0	0	0.7859	0
	MODAL	Mode	3	0.130498	0.01414	0	0	1	0	0	0	0.00092	0	0	0.78682	0
	MODAL	Mode	4	0.054089	0	0	0.4743	1	0	0.4743	0	0	0	0	0.78682	0
	MODAL	Mode	5	0.038439	0.0000009487	0	3.065E-19	1	0	0.4743	0	0.19586	0	0	0.98267	0
	MODAL	Mode	6	0.03839	0	0	0.44522	1	0	0.91952	0	1.349E-19	0	0	0.98267	0
	MODAL	Mode	7	0.019328	0	0	0.03554	1	0	0.95506	0	0	0	0	0.98267	0
	MODAL	Mode	8	0.013678	0.00000008725	0	1.261E-16	1	0	0.95506	0	0.01524	0	0	0.99791	0
	MODAL	Mode	9	0.013675	0	0	0.03535	1	0	0.9904	0	5.411E-17	0	0	0.99791	0
	MODAL	Mode	10	0.0133	0	0	0.00475	1	0	0.99516	0	0	0	0	0.99791	0
	MODAL	Mode	11	0.009408	0.00000001696	0	2.92E-14	1	0	0.99516	0	0.00209	0	0	1	0
	MODAL	Mode	12	0.009407	1.023E-19	0	0.00484	1	0	1	0	1.261E-14	0	0	1	0

Record: 1 of 12 Add Tables... Done

Ιδιοπερίοδοι και ποσοστά συμμετοχής των ιδιομορφών. Γίνεται εμφανές ότι στις 3 πρώτες ιδιομορφές ενεργοποιείται το σύνολο της μάζας του φορέα κατά Χ.

Οι συνιστώσες φ_i της κάθε ιδιομορφής σε όλους τους κόμβους του φορέα μπορούν να αναζητηθούν στα αποτελέσματα της επίλυσης για τη MODAL φορτιστική κατάσταση στις μετακινήσεις των κόμβων, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Είναι προφανές ότι όλοι οι κόμβοι κάθε ορόφου έχουν τις ίδιες μετακινήσεις κατά X (U1) λόγω της διαφραγματικής λειτουργίας.

Joint Displacements

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Filter: StepNum = 1

Joint Displacements

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
▶	1	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	0	0
	2	MODAL	LinModal	Mode	1	0.048264	0	0.000275	0	0.010455	0
	3	MODAL	LinModal	Mode	1	0.091953	0	0.000402	0	0.009637	0
	4	MODAL	LinModal	Mode	1	0.121641	0	0.000443	0	0.005239	0
	5	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	0	0
	6	MODAL	LinModal	Mode	1	0.048264	0	1.859E-17	0	0.006199	0
	7	MODAL	LinModal	Mode	1	0.091953	0	-5.494E-18	0	0.007314	0
	8	MODAL	LinModal	Mode	1	0.121641	0	-3.165E-18	0	0.003127	0
	9	MODAL	LinModal	Mode	1	0	0	0	0	0	0
	10	MODAL	LinModal	Mode	1	0.048264	0	-0.000275	0	0.010455	0
	11	MODAL	LinModal	Mode	1	0.091953	0	-0.000402	0	0.009637	0
	12	MODAL	LinModal	Mode	1	0.121641	0	-0.000443	0	0.005239	0

Record: 1 of 12 Add Tables... Done

Μετακινήσεις του φορέα κατά την 1η ιδιομορφή.

4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Αν V_0 είναι η τέμνουσα βάσης τότε η κατανομή των σεισμικών φορτίων καθύψος του κτιρίου γίνεται σύμφωνα με τις σχέσεις:

Ιδιομορφικό μοντέλο φόρτισης: $$F_i = V_0 \cdot \frac{m_i \cdot \varphi_i}{\sum(m_i \cdot \varphi_i)}$$

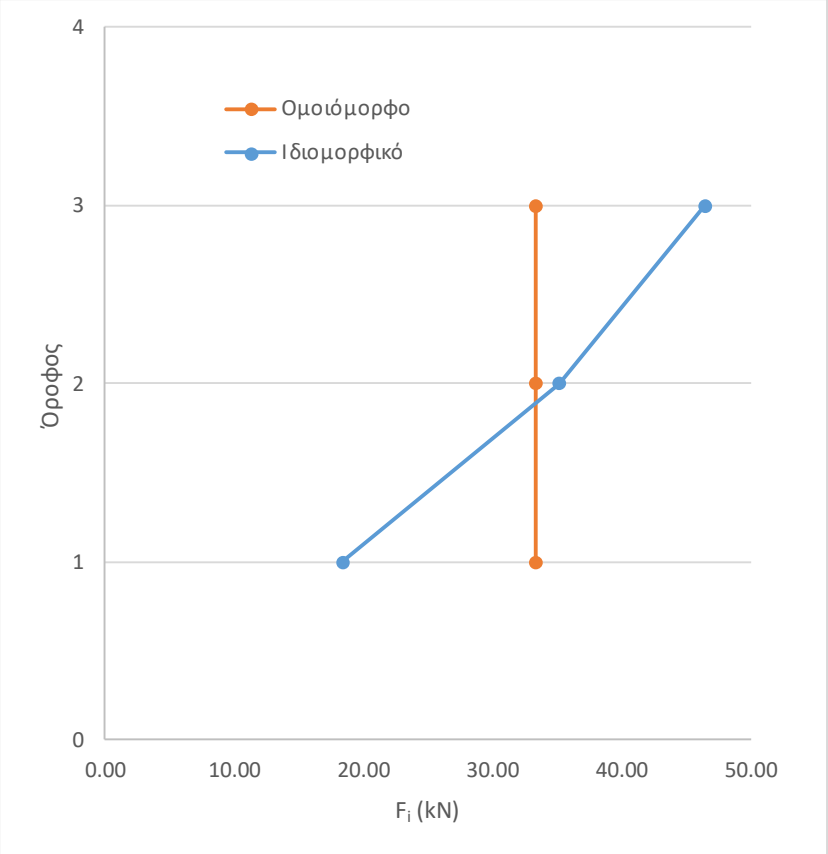
Ομοιόμορφο μοντέλο φόρτισης: $$F_i = V_0 \cdot \frac{m_i}{\sum m_i}$$

όπου m_i και φ_i οι συνιστώσες της μάζας και της 1ης ιδιομορφής στη στάθμη του κάθε ορόφου.

Για τις ανελαστικές στατικές (pushover) αναλύσεις που θα ακολουθήσουν δεν ενδιαφέρουν οι τιμές των δυνάμεων στις παραπάνω σχέσεις αλλά η αναλογία τους μεταξύ των ορόφων. Έτσι,

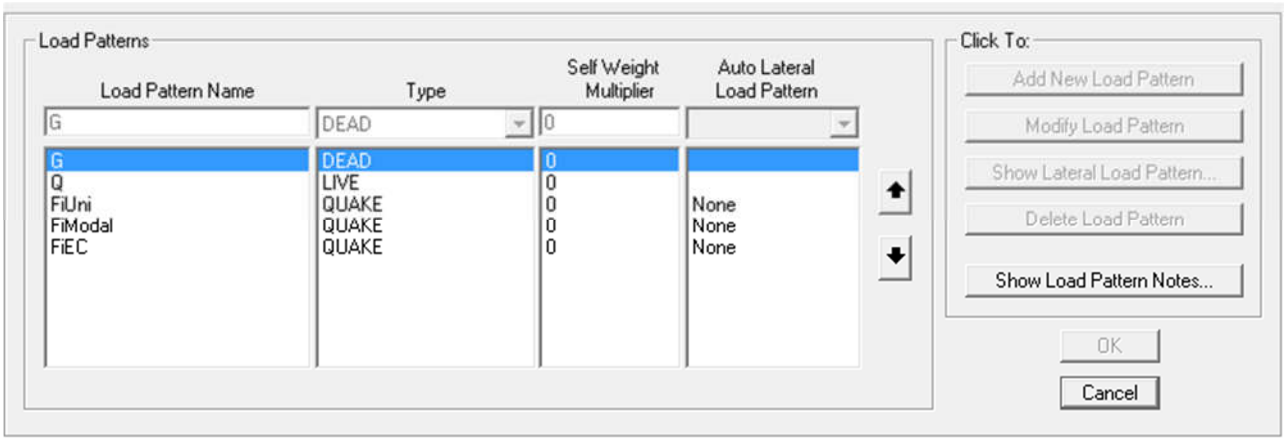
μπορεί να τεθεί οποιαδήποτε τιμή της τέμνουσας βάσης V_0 χωρίς να διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί η τιμή V_0=100.00kN. Βάσει των παραπάνω μπορεί να δημιουργηθεί ο πίνακας που ακολουθεί.

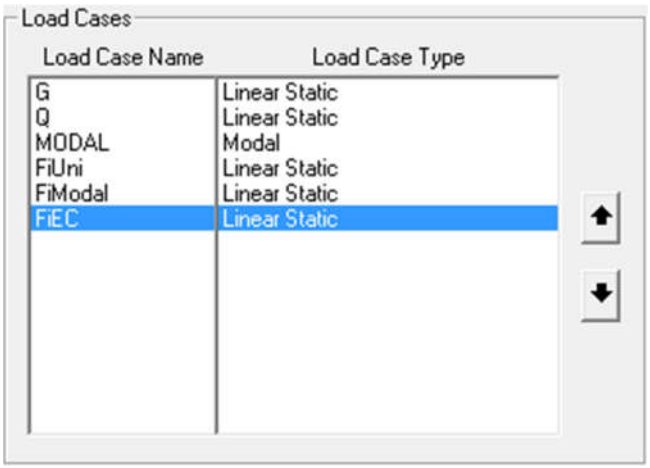
Όροφος	m_i	φ_i	$m_i*\varphi_i$	$F_{i,uni}$	$F_{i,modal}$
1	39.08	0.04826	1.89	33.33	18.43
2	39.08	0.09195	3.59	33.33	35.12
3	39.08	0.12164	4.75	33.33	46.45
Αθροίσματα	117.23		10.23	100.00	100.00

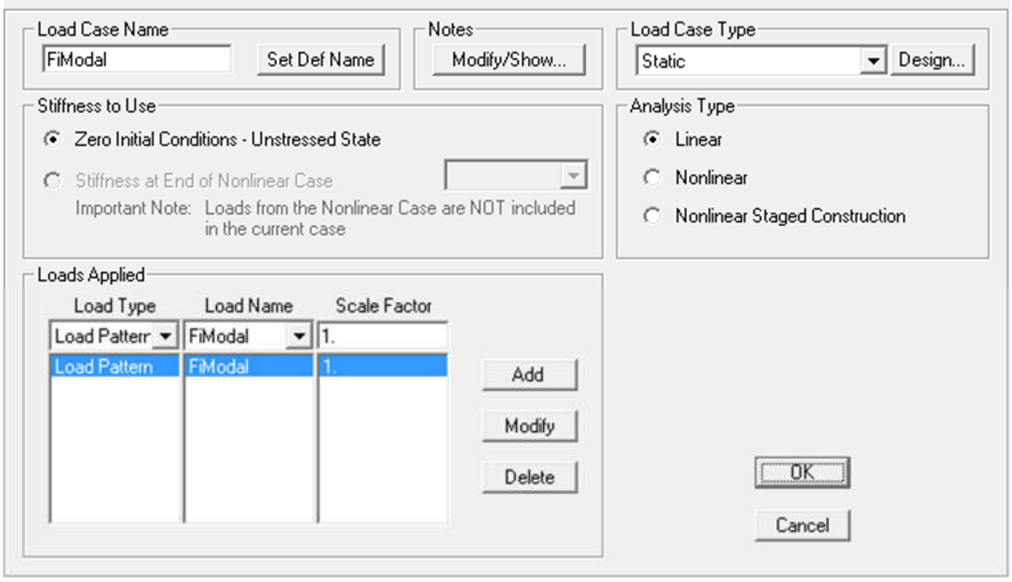


Σύγκριση ιδιομορφικού και ομοιόμορφου μοντέλου φόρτισης.

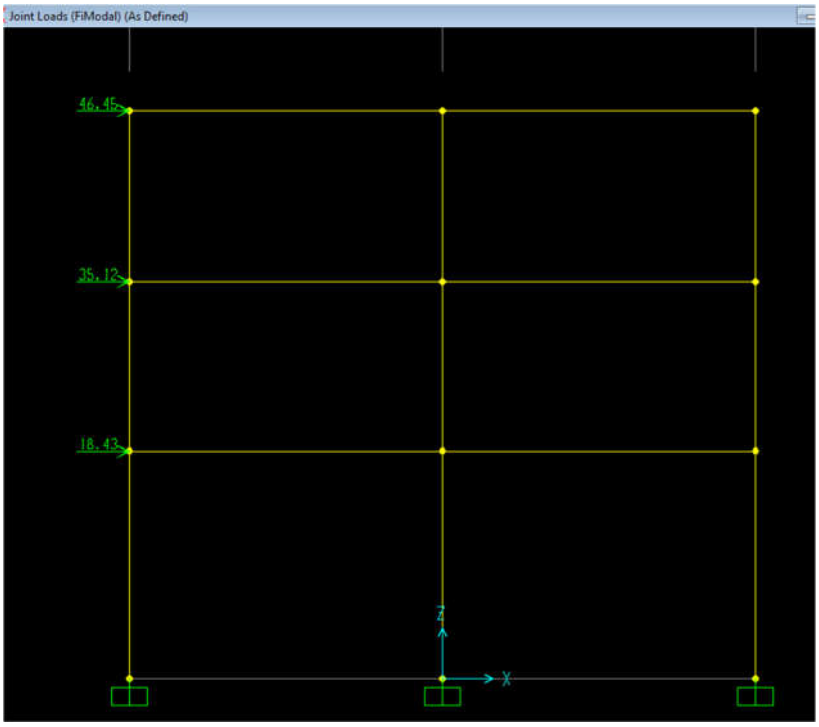
Οι τιμές αυτές εισάγονται σε νέες φορτιστικές καταστάσεις (FiUni, FiModal) στο SAP2000. Μια επιπλέον φορτιστική κατάσταση FiEC δημιουργείται για τη φόρτιση βάσει του EC8 που θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο.







Στις φορτιστικές καταστάσεις αυτές τοποθετούνται τα φορτία που υπολογίστηκαν.



4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑ EC8. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η κατανομή της τέμνουσας βάσης καθύψος του κτιρίου δίνεται και πάλι από τη σχέση

$F_i = V_0 \cdot \frac{m_i \cdot \varphi_i}{\sum(m_i \cdot \varphi_i)}$ (στον EC8 τα φ αναφέρονται ως s)

Η τέμνουσα βάσης V_0 υπολογίζεται μέσω του φάσματος σχεδιασμού ως εξής.

Έστω α_{gR}=0.16g, κατηγορία σπουδαιότητας II, έδαφος Β και μέση κατηγορία πλαστιμότητας.

Η ιδιοπερίοδος για την 1η ιδιομορφή της κατασκευής (με ποσοστό συμμετοχής της μάζας κοντά στο 90%) υπολογίστηκε T=0.753sec.

Για κατηγορία σπουδαιότητας II γ_I=1.0 από το Εθνικό Προσάρτημα του EC8.

Οπότε $\alpha_g = \alpha_{gR} \cdot \gamma_I$=1.5696m/sec^2.

Τιμές του Συντελεστή Σπουδαιότητας γ_I

Κατηγορία Σπουδαιότητας	I	II	III	IV
Συντελεστής Σπουδαιότητας γ_I	0,80	1,00	1,20	1,40

Για έδαφος Β χρησιμοποιείται ο πίν. 3.2 του EC8 οπότε S=1.2, T_B=0.15, T_C=0.5 και T_D=2.0sec.

Πίνακας 3.2: Τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1

Εδαφικός Τύπος	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q προκύπτει βάσει του q_0 που λαμβάνεται από τον πίνακα 5.1 του EC8.

Πίνακας 5.1: Βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, q_0, για συστήματα κανονικά σε όψη

ΤΥΠΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΚΠΜ	ΚΠΥ
Πλαισιωτό σύστημα, διπλό σύστημα, σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Σύστημα ασύζευκτων τοιχωμάτων	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Στρεπτικά εύκαμπτο σύστημα	2,0	3,0
Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς	1,5	2,0

Επιπλέον για

α) Πλαισιωτά συστήματα ή ισοδύναμα προς πλαισιωτά διπλά συστήματα.

- μονώροφα κτίρια: α_u/α_1=1,1;
- πολυώροφα δίστυλα πλαισιωτά κτίρια: α_u/α_1=1,2;
- πολυώροφα πολύστυλα πλαισιωτά κτίρια ή ισοδύναμα προς αυτά διπλά συστήματα: α_u/α_1=1,3.

Για ΚΠΜ q=3.0·1.3=3.9

Η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης σχεδιασμού προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις όπου φαίνεται ότι η κατασκευή μας βρίσκεται στον 3ο κλάδο του φάσματος

$$0 \le T \le T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3}\right)\right] \quad (3.13)$$

$$T_B \le T \le T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (3.14)$$

$$T_C \le T \le T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (3.15)$$

$$T_D \le T : \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] \\ \ge \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου

a_g, S, T_C and T_D	όπως ορίζονται στην **3.2.2.2**;
$S_d(T)$	είναι το φάσμα σχεδιασμού
q	είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς
β	είναι συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Η τιμή που αποδίδεται στον β για χρήση σε μια χώρα μπορεί να βρεθεί στο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή για τον β είναι 0,2.

Για $T_C \le T \le T_D$: $S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_g \end{cases} \} = 0.802 m/sec^2$

Τελικά η τέμνουσα βάσης προκύπτει ως:

$V_0 = S_d(T) \cdot m_{o\lambda} = 0.802 \cdot 117.23 = 93.99kN$

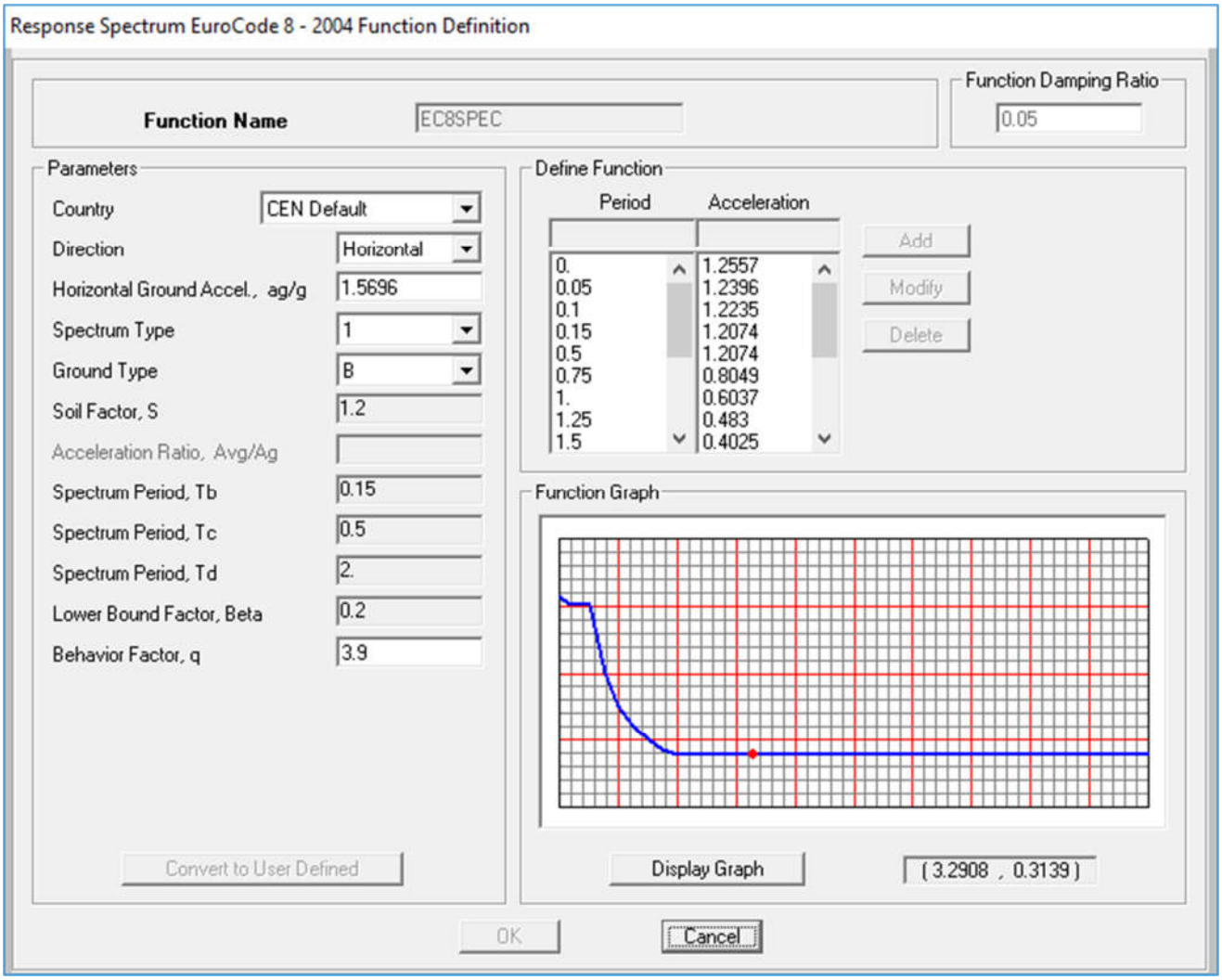
και κατανέμεται ως εξής

Όροφος	m_i	φ_i	$m_i * \varphi_i$	F_i (EC)
1	39.08	0.04826	1.89	17.32
2	39.08	0.09195	3.59	33.00
3	39.08	0.12164	4.75	43.66
Αθροίσματα	117.23		10.23	93.99

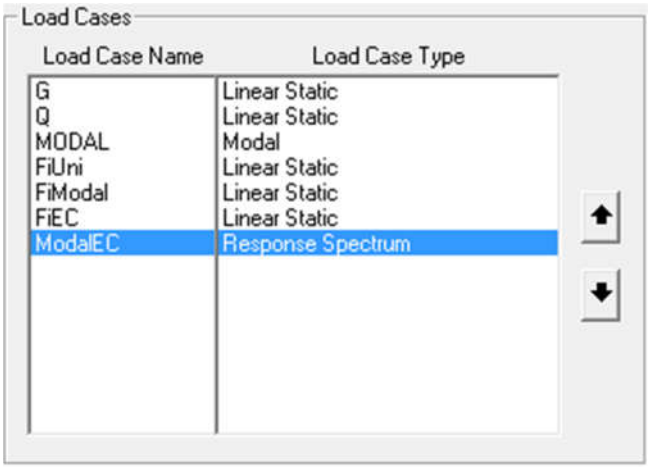
4.4 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

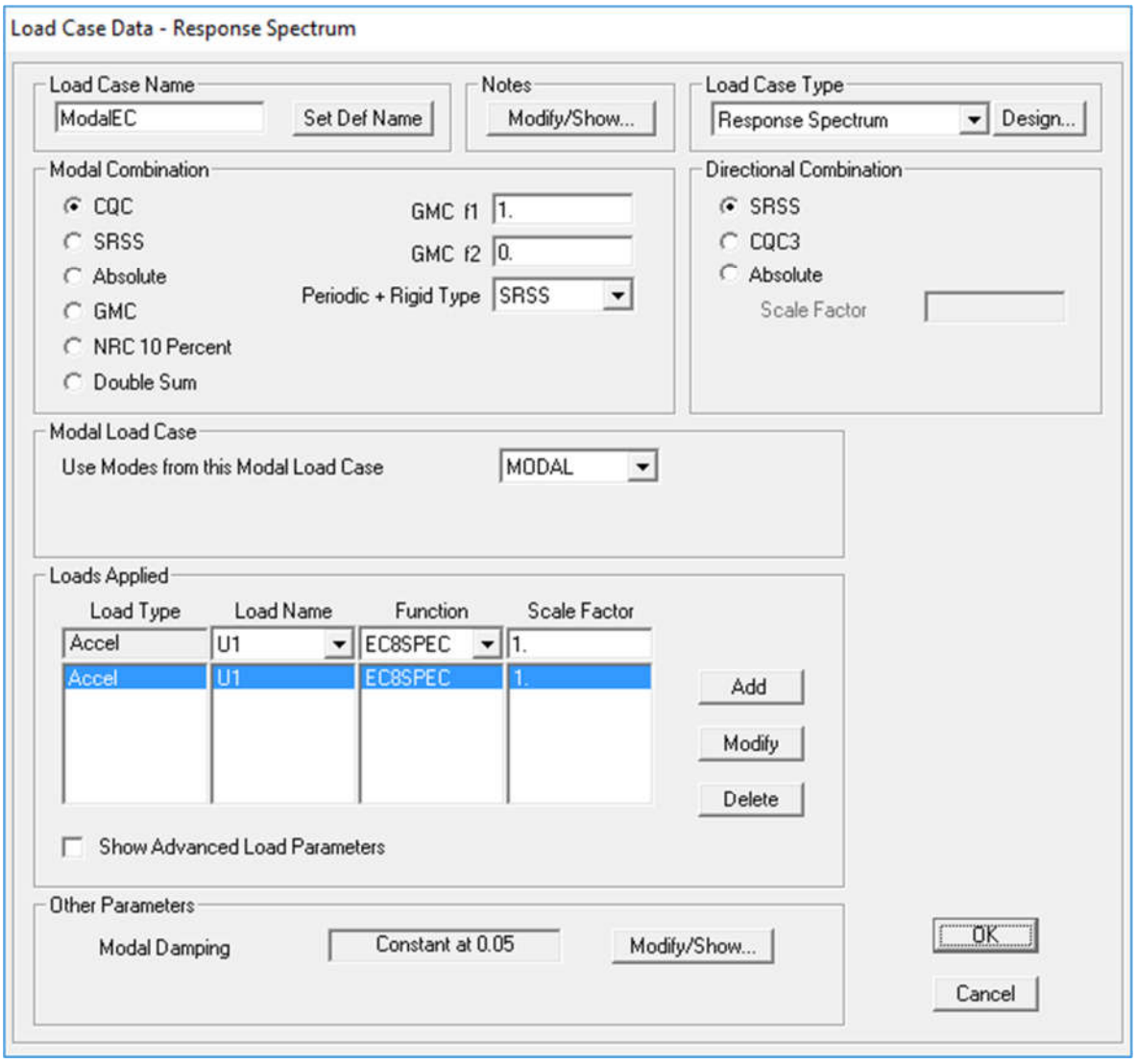
Η στατική ανάλυση που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο επιτρέπεται από τον EC8 να εφαρμόζεται σε κτίρια που πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις (τις πληροί το κτίριο που εξετάζεται). Η γενική περίπτωση που προτείνεται από τον κανονισμό είναι η ιδιομορφική φασματική ανάλυση.

Στο SAP2000 είναι δυνατό να δίνεται αυτόματα το φάσμα σχεδιασμού του EC8 ως Response Spectrum Function



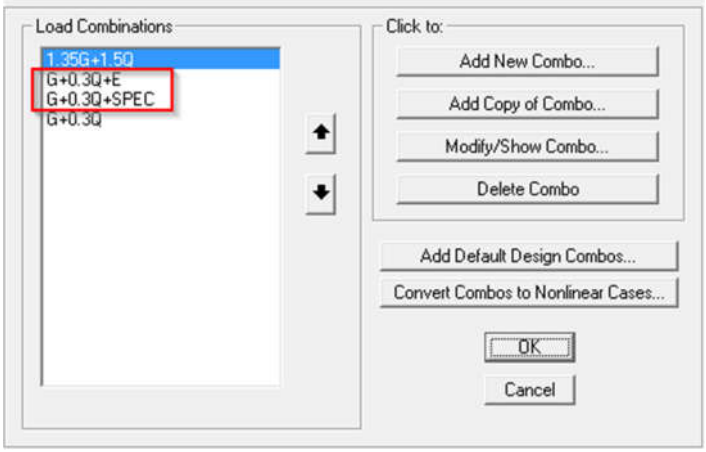
Επιπλέον, δίνεται μια νέα φορτιστική κατάσταση ως εξής

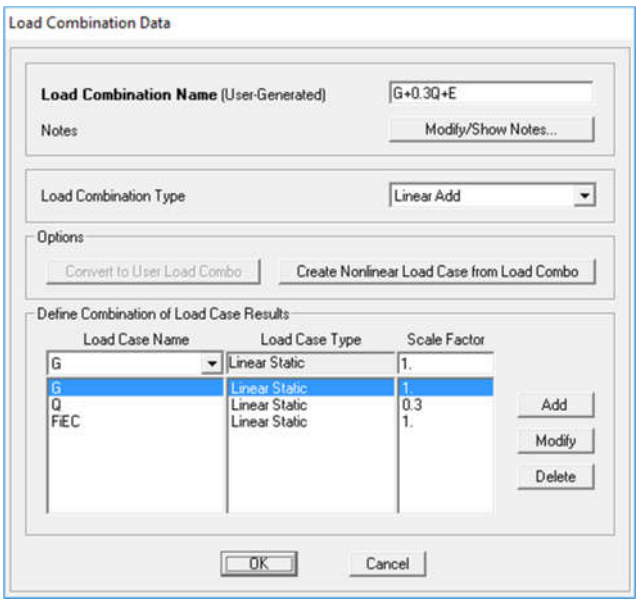


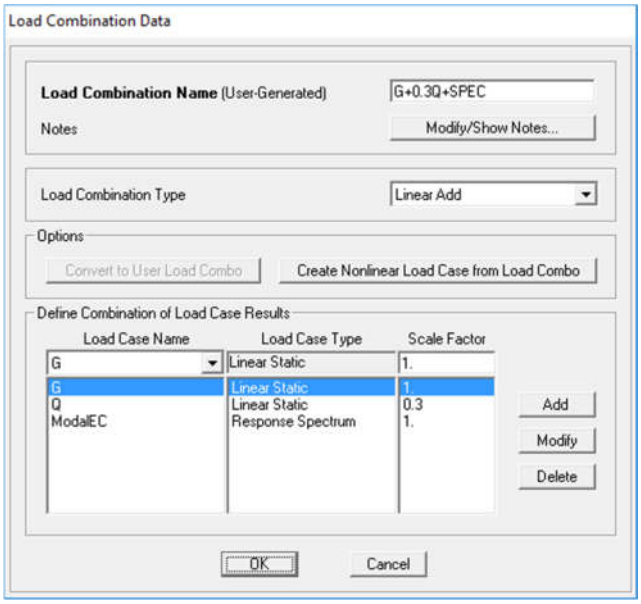


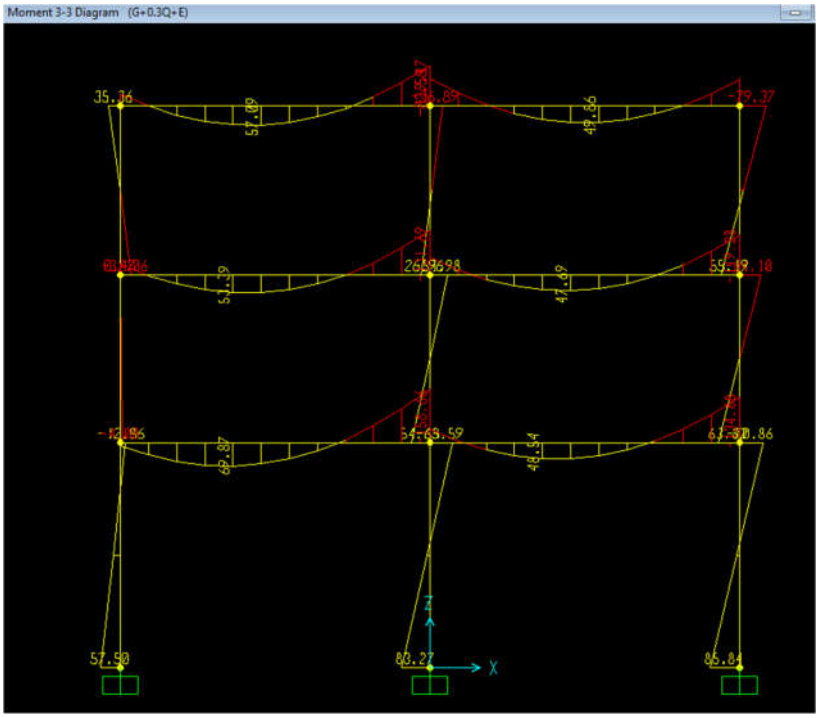
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Τόσο στην περίπτωση των στατικών αναλύσεων, όσο και των δυναμικών φασματικών, οι σεισμικές δράσεις συνδυάζονται με τα κατακόρυφα φορτία ως G+0.3Q+Σεισμική φόρτιση. Έτσι, δημιουργούνται 2 νέοι συνδυασμοί φόρτισης σύμφωνα με τα παρακάτω σχήματα. Ο πρώτος για τη στατική μέθοδο και ο δεύτερος για τη φασματική.

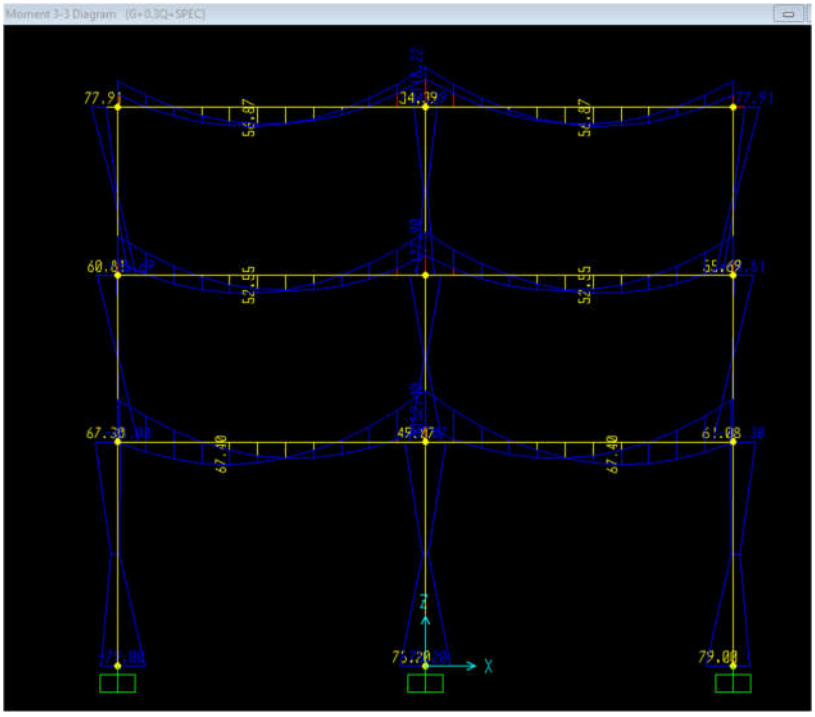




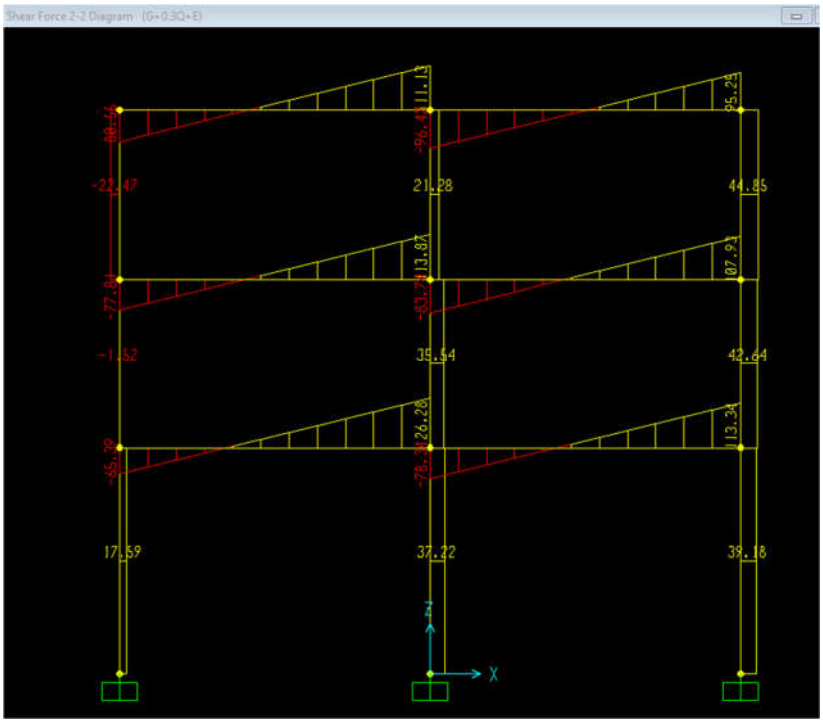




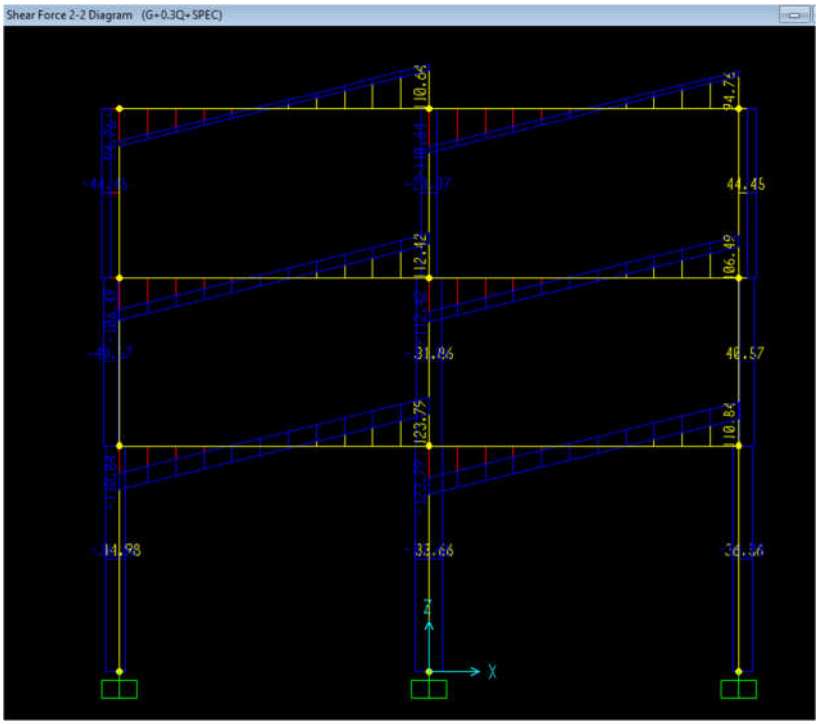
Ροπές κάμψης για G+0.3Q+E (στατική μέθοδος)



Ροπές κάμψης για G+0.3Q+SPEC (φασματική μέθοδος)



Τέμνουσες δυνάμεις για G+0.3Q+E (στατική μέθοδος)



Ροπές κάμψης για G+0.3Q+SPEC (φασματική μέθοδος)

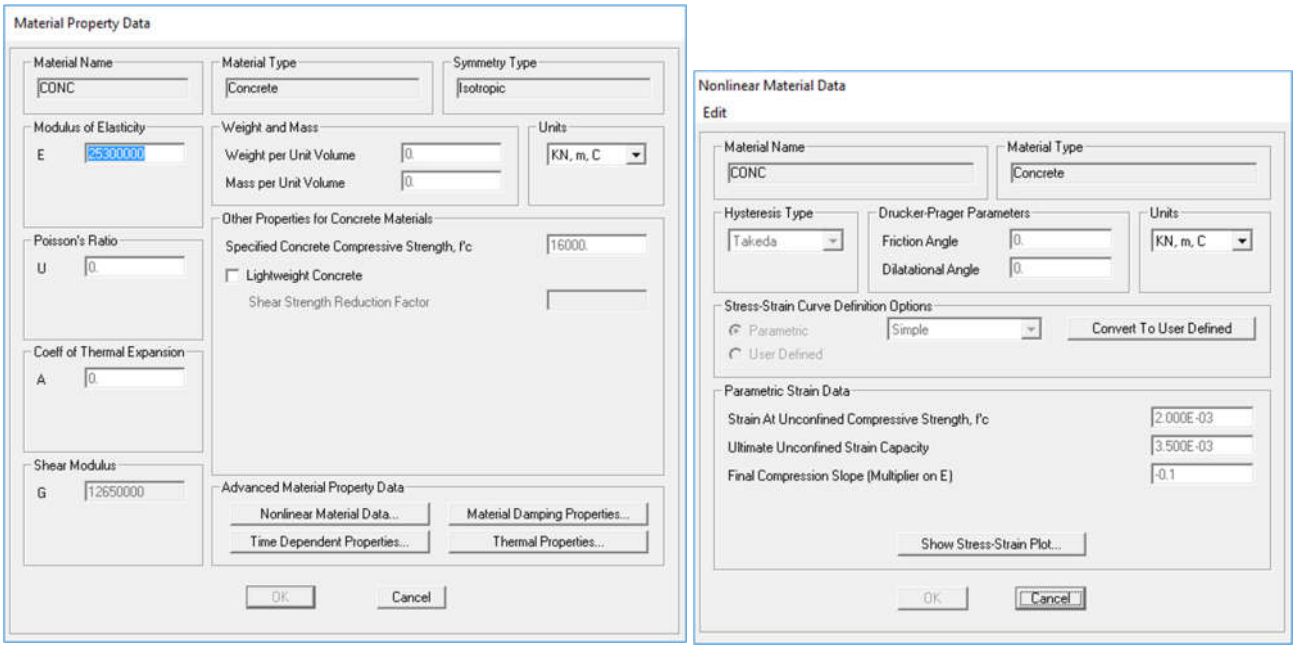
5 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΕΙ SAP2000 (FEMA)

5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΠΩΝ-ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ SAP2000

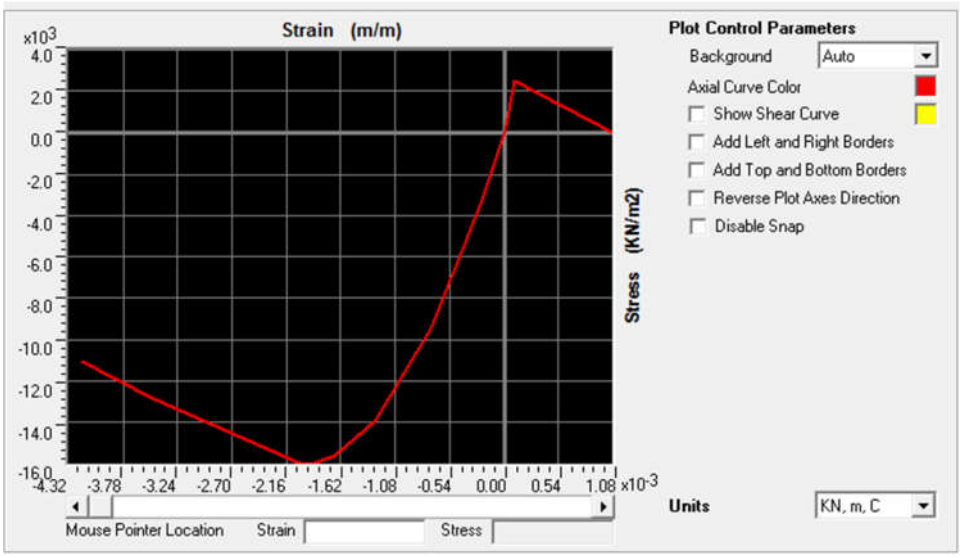
Για τον αυτόματο υπολογισμό των διαγραμμάτων ροπών-στροφών από το SAP2000 θα πρέπει να ενημερωθούν οι ιδιότητες των υλικών ώστε να περιλαμβάνουν τα πλήρη διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η ανάλυση των διατομών. Για να γίνει αυτό στη φόρμα επιλογής των υλικών επιλέγεται το “Show advanced properties”.

5.1.1 Σκυρόδεμα

Δίνονται οι παράμετροι σύμφωνα με το σχήμα 12.5 του βιβλίου «Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα ΗΥ»

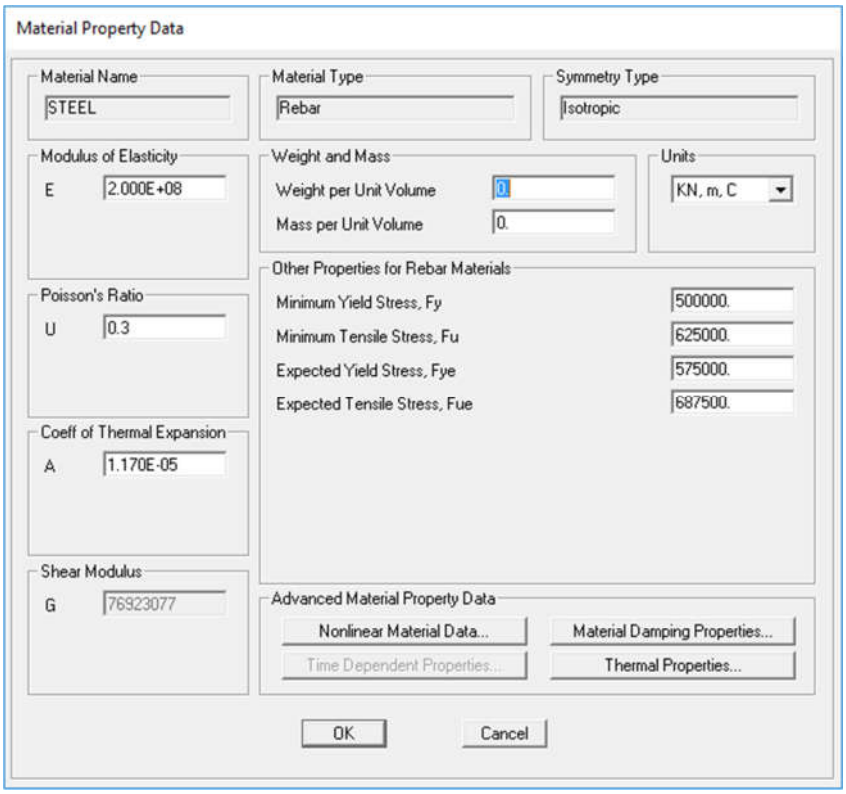


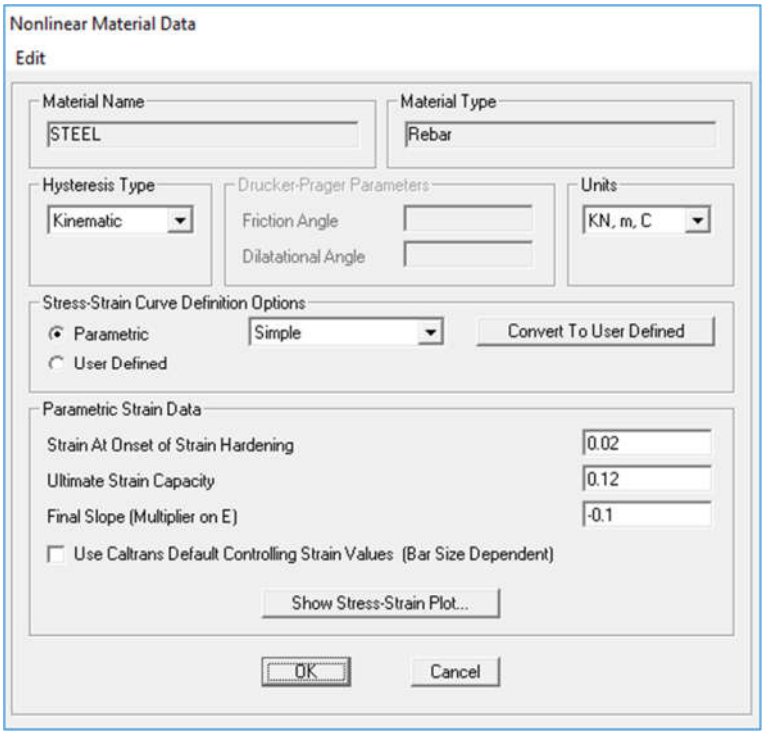
Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων που προκύπτει είναι το παρακάτω.



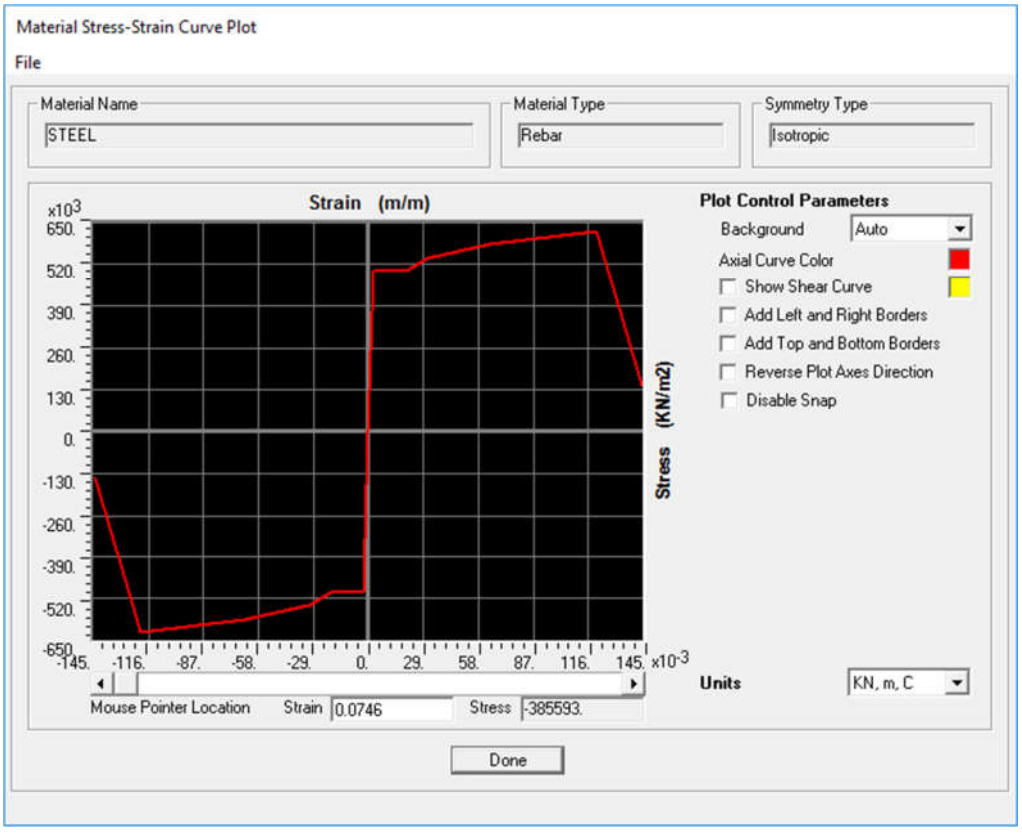
5.1.2 Χάλυβας

Ομοίως, για τις τιμές που υπολογίζονται σύμφωνα με τα δεδομένα της εκφώνησης δίνονται οι παράμετροι και για τον χάλυβα οπλισμού. Προσοχή δίνεται στο σημείο ότι ως Material Type επιλέγεται Rebar (Reinforcement bars) και όχι Steel που αντιστοιχεί σε μεταλλικές κατασκευές.



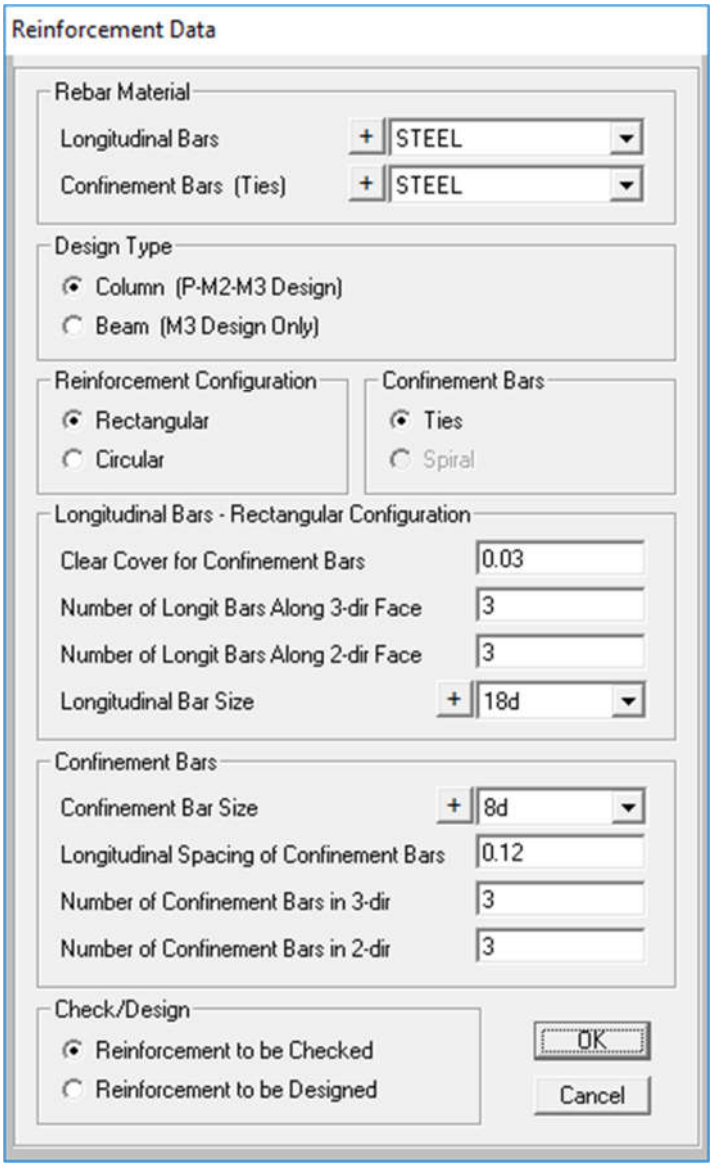


Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων που προκύπτει είναι το παρακάτω.



5.1.3 Εισαγωγή του οπλισμού των δομικών στοιχείων

Στα υποστυλώματα ο οπλισμός δίνεται σύμφωνα με τη φόρμα που ακολουθεί.

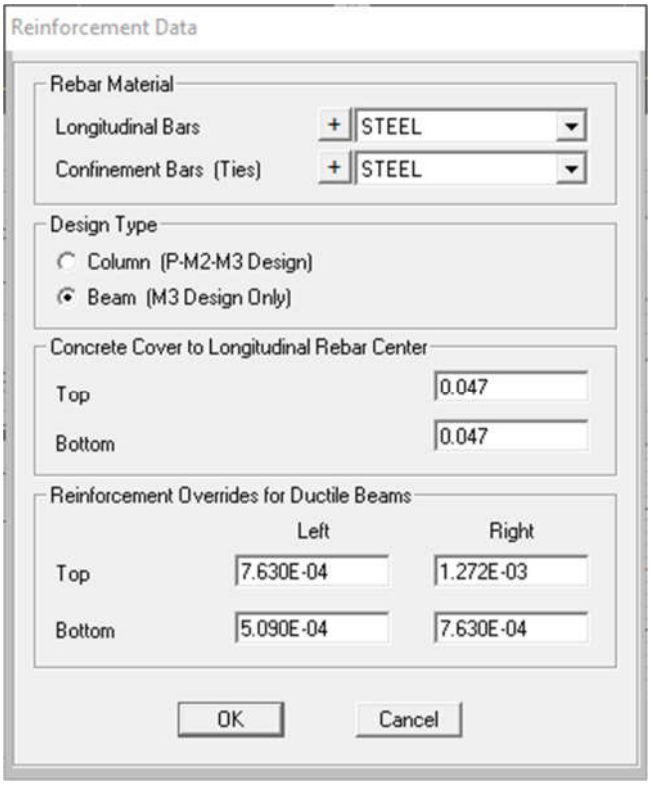


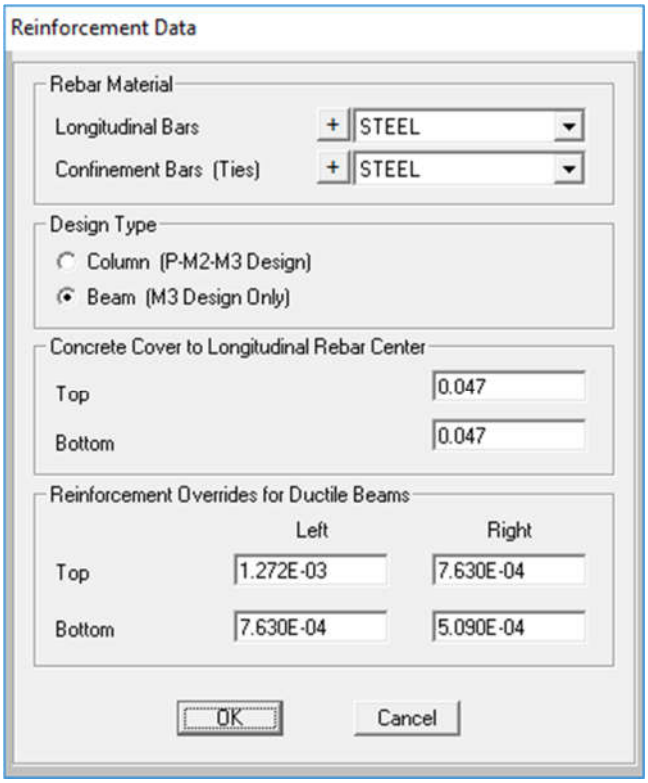
Θεωρείται καθαρή επικάλυψη c_{nom}=3cm

Οι συνδετήρες που τοποθετούνται θεωρούνται ότι είναι 3τμητοι (για 3 ή 5 ράβδους ανά παρειά γίνεται η παραδοχή ότι έχει τοποθετηθεί ο περιμετρικός συνδετήρας και 2 σιγμοειδείς).

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει η διάμετρος των ράβδων στις έτοιμες επιλογές του προγράμματος τότε δημιουργείται νέα σύμφωνα με το σχήμα 12.12 του βιβλίου «Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα ΗΥ».

Στις δοκούς ο οπλισμός δίνεται σύμφωνα με τις φόρμες που ακολουθούν με το παράδειγμα να αναφέρεται στις διατομές BEAMIS και BEAMISr. Παρατηρείται ότι η μόνη διαφορά αντιστοιχεί στις θέσεις τοποθέτησης του οπλισμού, δεξιά και αριστερά του δομικού στοιχείου.





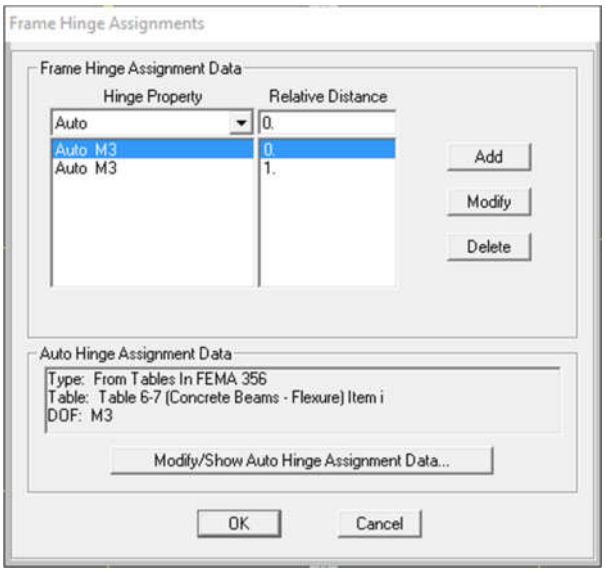
Η επικάλυψη εδώ είναι μέχρι το κέντρο βάρους των διαμήκων ράβδων, οπότε για Ø18 και συνδετήρες Ø8 έχουμε $d_1 = c_{nom} + Ø_w + 0.5 \cdot Ø_L = 30 + 8 + 0.5 \cdot 18 = 47mm = 0.047m$

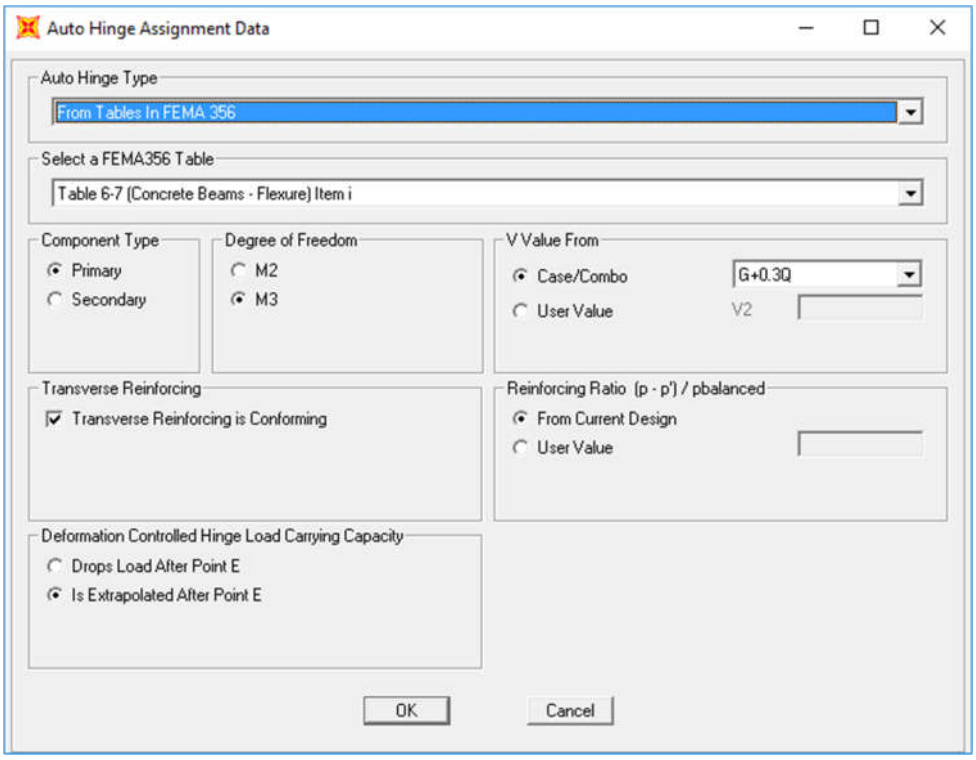
Ο διαμήκης οπλισμός δίνεται ως το συνολικό εμβαδόν των ράβδων στην άνω και κάτω ίνα των στηρίξεων. Έτσι για 3Ø18 έχουμε A_s=7.63cm^2=7.63·10^{-4}m^2

Στο SAP2000 δε ζητούνται δεδομένα για τον εγκάρσιο οπλισμό των δοκών.

5.1.4 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς

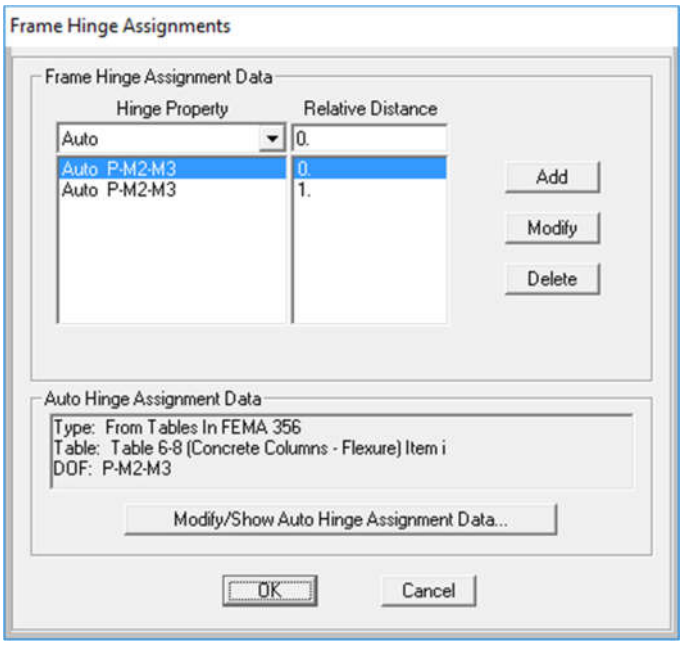
Οι πλαστικές αρθρώσεις υπολογίζονται με αυτόματο τρόπο σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνεται από τη FEMA. Στις δοκούς η ανελαστική συμπεριφορά αναφέρεται στη ροπή M3. Έτσι επιλέγονται όλες οι δοκοί και στη συνέχεια δίνεται Assign->Frame->Hinges και Auto M3 σην αρχή και στο τέλος του στοιχείου σύμφωνα με τα παρακάτω σχήματα.

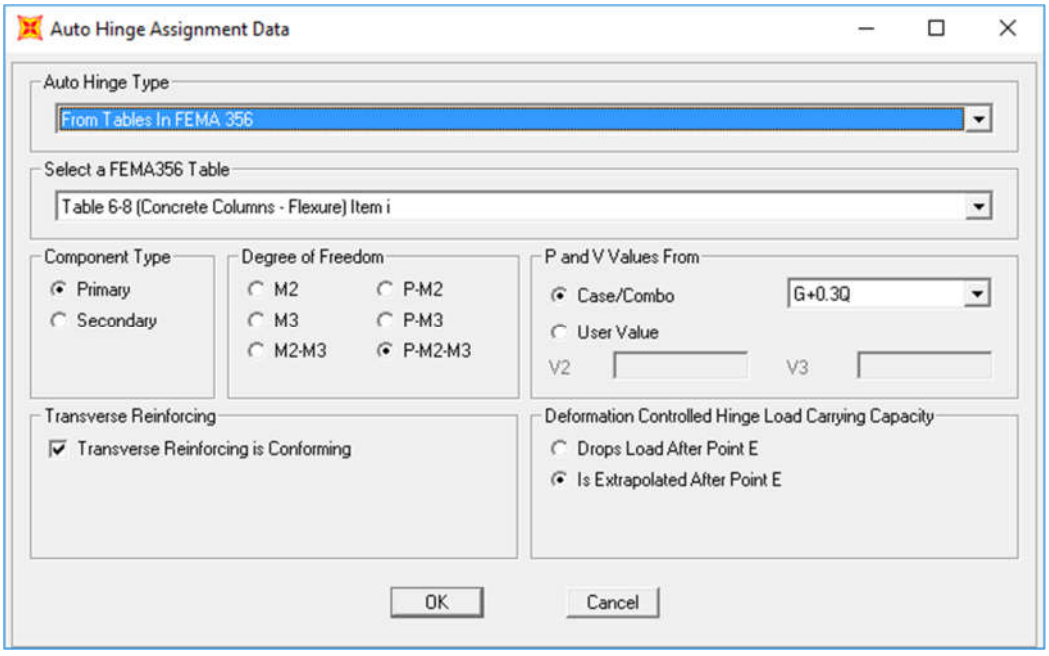




5.1.5 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα

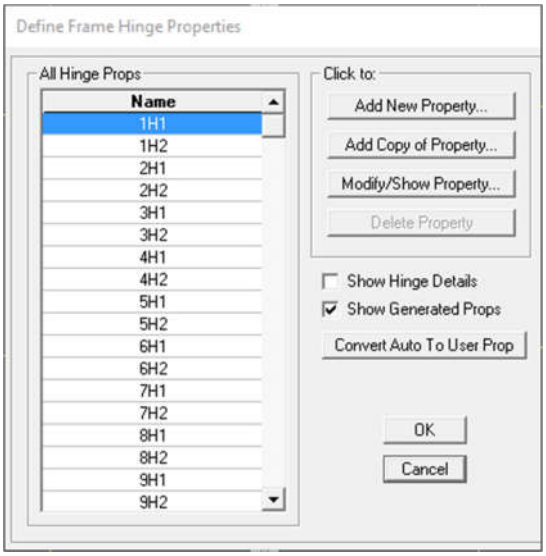
Με αντίστοιχο τρόπο δίνονται οι πλαστικές αρθρώσεις στα υποστυλώματα με τη διαφορά ότι για να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής-αξονικού φορτίου επιλέγεται η πλαστική άρθρωση τύπου PMM.



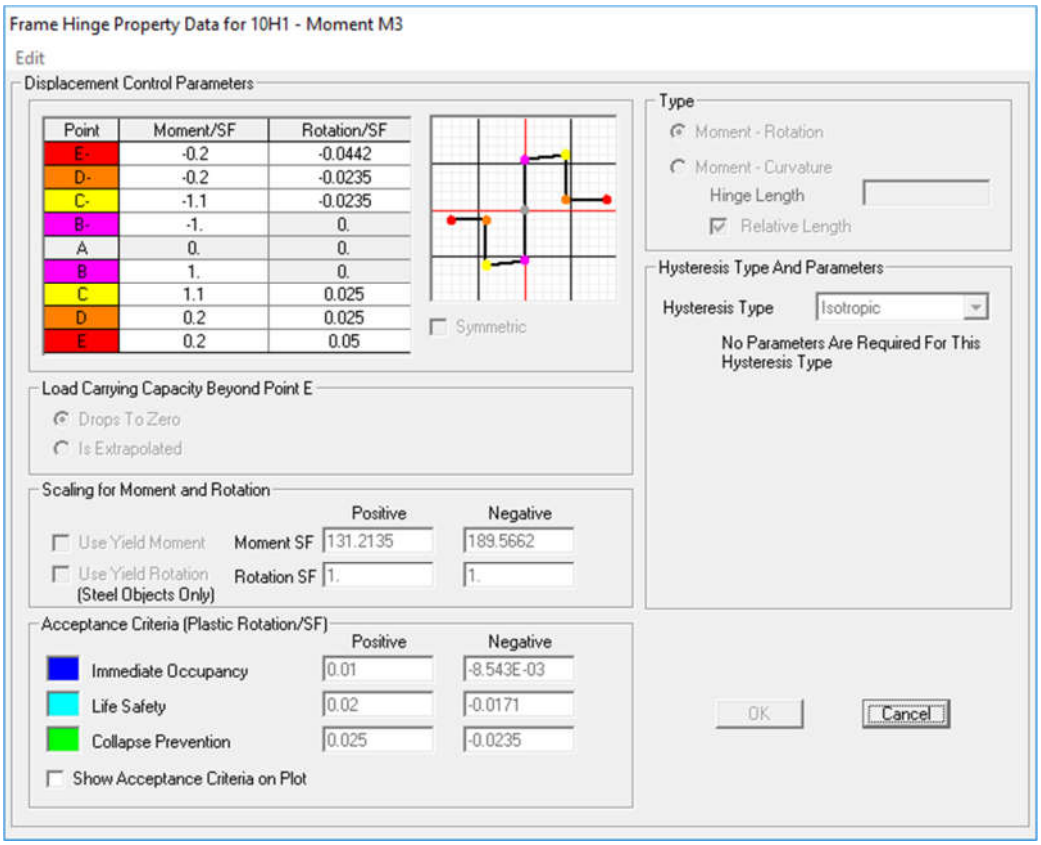


5.1.6 Εμφάνιση αυτόματων πλαστικών αρθρώσεων

Για να δει ο χρήστης τις πλαστικές αρθρώσεις που δημιουργήθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα επιλέγει Define->Frame->Hinge Properties και στη συνέχεια Show Generated Props



Ενδεικτικά ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για μια δοκό.

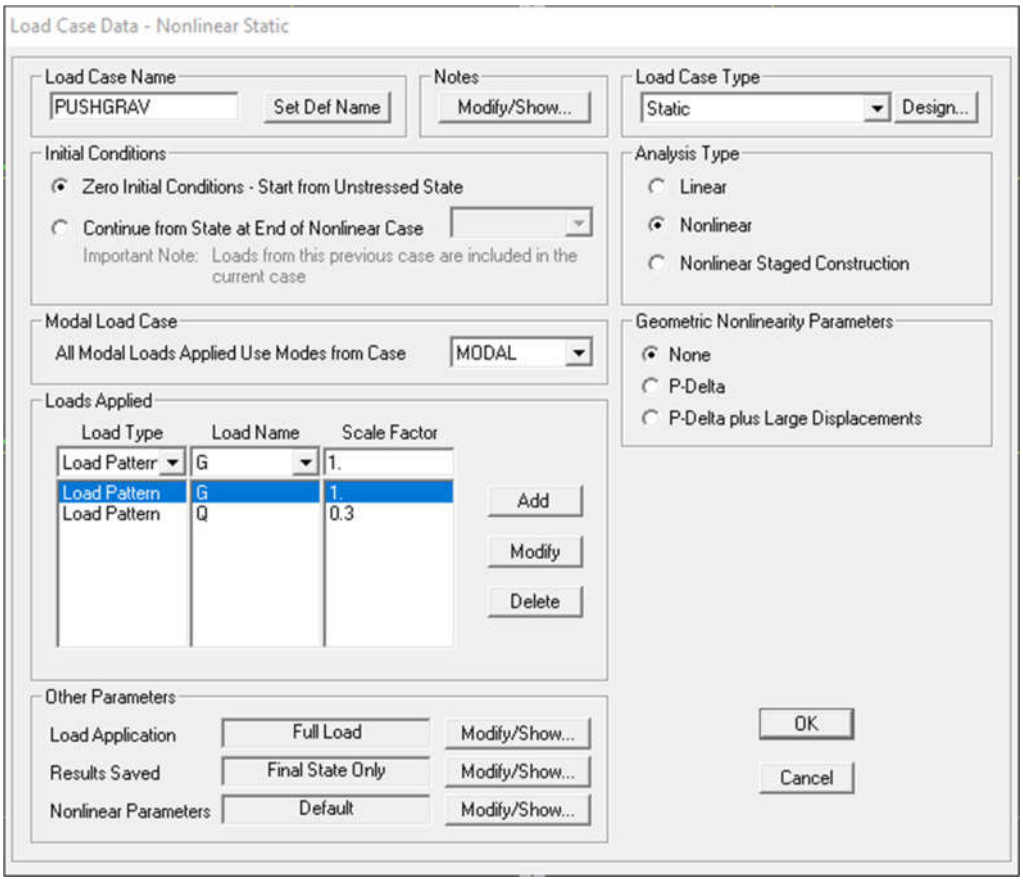


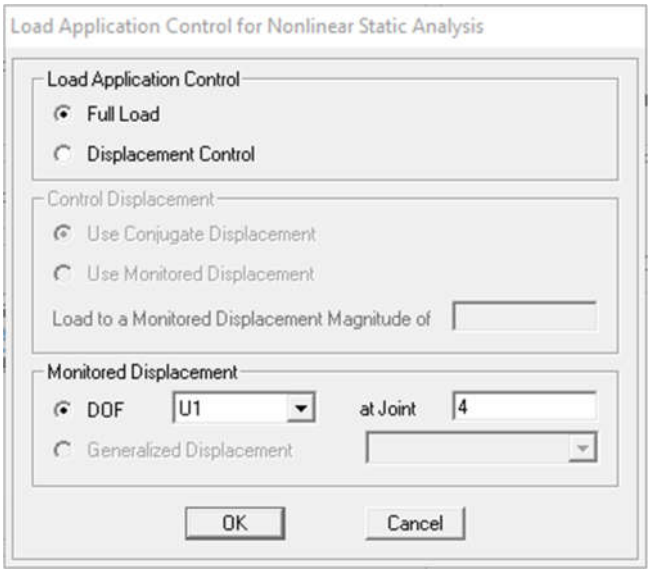
5.2 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

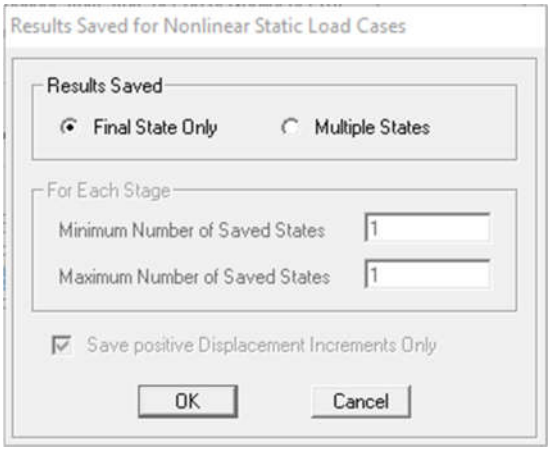
Η πρώτη σειρά ανελαστικών στατικών (pushover) αναλύσεων θα γίνει χρησιμοποιώντας τις πλαστικές αρθρώσεις που δημιουργήθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Θα χρησιμοποιηθούν 2 εναλλακτικά μοντέλα φόρτισης, το ιδιομορφικό και το ομοιόμορφο τα οποία υπολογίστηκαν στην παράγραφο 4.2.

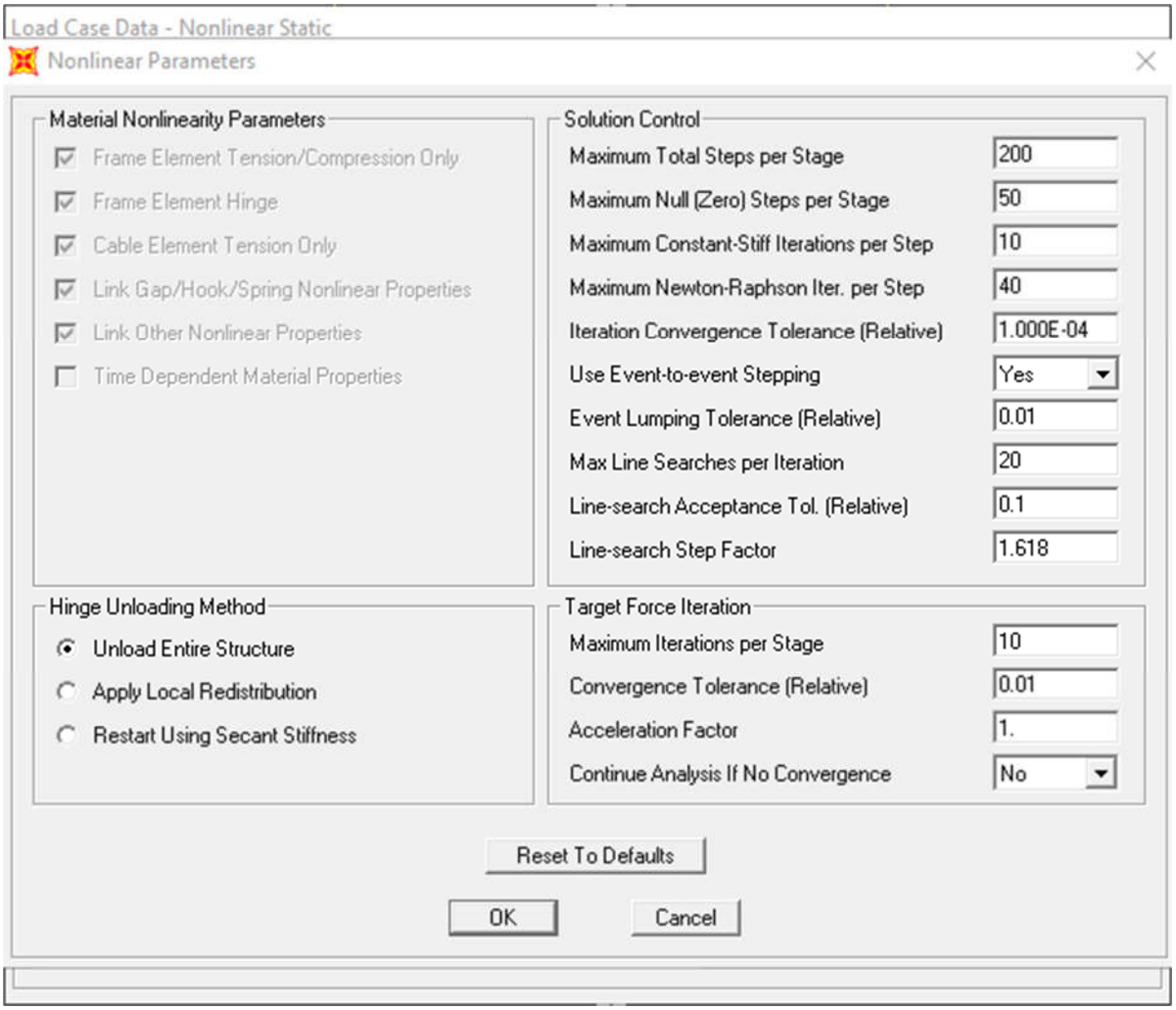
5.2.1 Ανελαστική ανάλυση για τα κατακόρυφα φορτία

Σε πρώτη φάση δημιουργείται μια «προκαταρκτική» ανελαστική φορτιστική κατάσταση η οποία αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού. Είναι προφανές ότι όταν αρχίζουν να δρουν οι (οριζόντιες) σεισμικές δράσεις ο φορέας δεν είναι αφόρτιστος αλλά υπάρχει ήδη η εντατική κατάσταση που δημιουργείται από τα κατακόρυφα φορτία. Η φορτιστική κατάσταση ονομάζεται PUSHGRAV και δίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω φόρμες. Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη ανελαστική ανάλυση δεν απαιτεί να φτάσει μέχρι κάποια μετακίνηση αλλά απλά δίνονται τα κατακόρυφα φορτία και επιπλέον δεν ενδιαφέρουν τα ενδιάμεσα αποτελέσματα παρά μόνο στο τελικό στάδιο (βήμα) της επίλυσης.



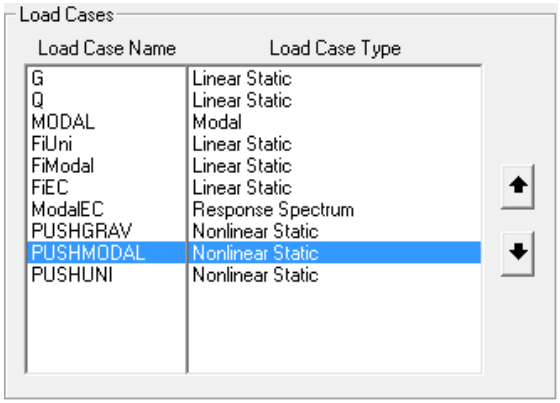

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis
Load Application Control
Full Load
Displacement Control
Control Displacement
Use Conjugate Displacement
Use Monitored Displacement
Load to a Monitored Displacement Magnitude of
Monitored Displacement
DOF
U1
at Joint
4
Generalized Displacement
OK
Cancel


Results Saved for Nonlinear Static Load Cases
Results Saved
Final State Only
Multiple States
For Each Stage
Minimum Number of Saved States
1
Maximum Number of Saved States
1
Save positive Displacement Increments Only
OK
Cancel

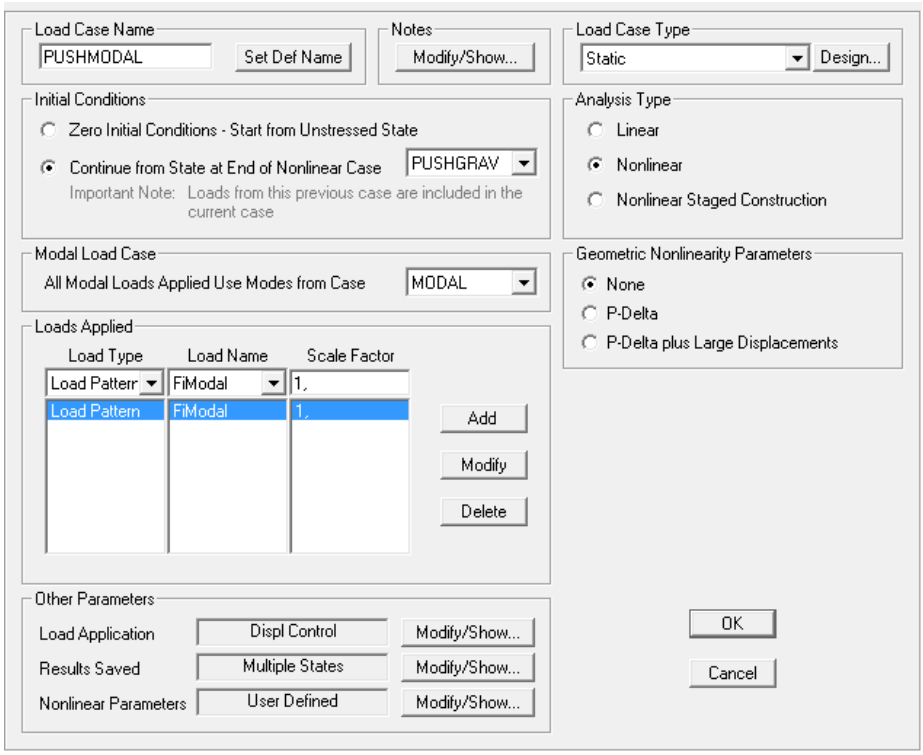

Load Case Data - Nonlinear Static
Nonlinear Parameters
Material Nonlinearity Parameters
Frame Element Tension/Compression Only
Frame Element Hinge
Cable Element Tension Only
Link Gap/Hook/Spring Nonlinear Properties
Link Other Nonlinear Properties
Time Dependent Material Properties
Solution Control
Maximum Total Steps per Stage
200
Maximum Null (Zero) Steps per Stage
50
Maximum Constant-Stiff Iterations per Step
10
Maximum Newton-Raphson Iter. per Step
40
Iteration Convergence Tolerance (Relative)
1.000E-04
Use Event-to-event Stepping
Yes
Event Lumping Tolerance (Relative)
0.01
Max Line Searches per Iteration
20
Line-search Acceptance Tol. (Relative)
0.1
Line-search Step Factor
1.618
Hinge Unloading Method
Unload Entire Structure
Apply Local Redistribution
Restart Using Secant Stiffness
Target Force Iteration
Maximum Iterations per Stage
10
Convergence Tolerance (Relative)
0.01
Acceleration Factor
1.
Continue Analysis If No Convergence
No
Reset To Defaults
OK
Cancel

5.2.2 Αναλύσεις για τις οριζόντιες φορτίσεις

Στη συνέχεια δίνονται 2 ανελαστικές στατικές (pushover) αναλύσεις οι οποίες αντιστοιχούν στο ιδιομορφικό (PUSHMODAL) και στο ομοιόμορφο (PUSHUNI) μοντέλο φόρτισης. Για να υπάρχει μια πλήρης εικόνα της απόκρισης του φορέα δίνεται μια αρκετά μεγάλη τιμή της στοχευόμενης μετακίνησης, ενδεικτικά στο παράδειγμα ο φορέας ωθείται μέχρι στην κορυφή του να φτάσει τα 0.60m. Οι τελικές φορτιστικές καταστάσεις είναι οι εξής:



Για τις οριζόντιες ανελαστικές φορτιστικές καταστάσεις χρησιμοποιούνται οι παράμετροι που φαίνονται στις παρακάτω φόρμες με μόνη διαφορά ότι στα φορτία που εφαρμόζονται χρησιμοποιείται τη μια φορά το FiModal (ιδιομορφικό) και την άλλη το FiUni (ομοιόμορφο).



Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control
- ○ Full Load
- ◉ Displacement Control

Control Displacement
- ○ Use Conjugate Displacement
- ◉ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of: 0,6

Monitored Displacement
- ◉ DOF: U1 at Joint: 4
- ○ Generalized Displacement:

OK Cancel

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved
- ○ Final State Only ◉ Multiple States

For Each Stage
- Minimum Number of Saved States: 300
- Maximum Number of Saved States: 1000

☑ Save positive Displacement Increments Only

OK Cancel

Nonlinear Parameters

Material Nonlinearity Parameters
- ☑ Frame Element Tension/Compression Only
- ☑ Frame Element Hinge
- ☑ Cable Element Tension Only
- ☑ Link Gap/Hook/Spring Nonlinear Properties
- ☑ Link Other Nonlinear Properties
- ☐ Time Dependent Material Properties

Solution Control
- Maximum Total Steps per Stage: 1000
- Maximum Null (Zero) Steps per Stage: 100
- Maximum Constant-Stiff Iterations per Step: 10
- Maximum Newton-Raphson Iter. per Step: 40
- Iteration Convergence Tolerance (Relative): 1,000E-04
- Use Event-to-event Stepping: Yes
- Event Lumping Tolerance (Relative): 1,000E-03
- Max Line Searches per Iteration: 20
- Line-search Acceptance Tol. (Relative): 0,1
- Line-search Step Factor: 1,618

Hinge Unloading Method
- ◉ Unload Entire Structure
- ○ Apply Local Redistribution
- ○ Restart Using Secant Stiffness

Target Force Iteration
- Maximum Iterations per Stage: 10
- Convergence Tolerance (Relative): 0,01
- Acceleration Factor: 1,
- Continue Analysis If No Convergence: No

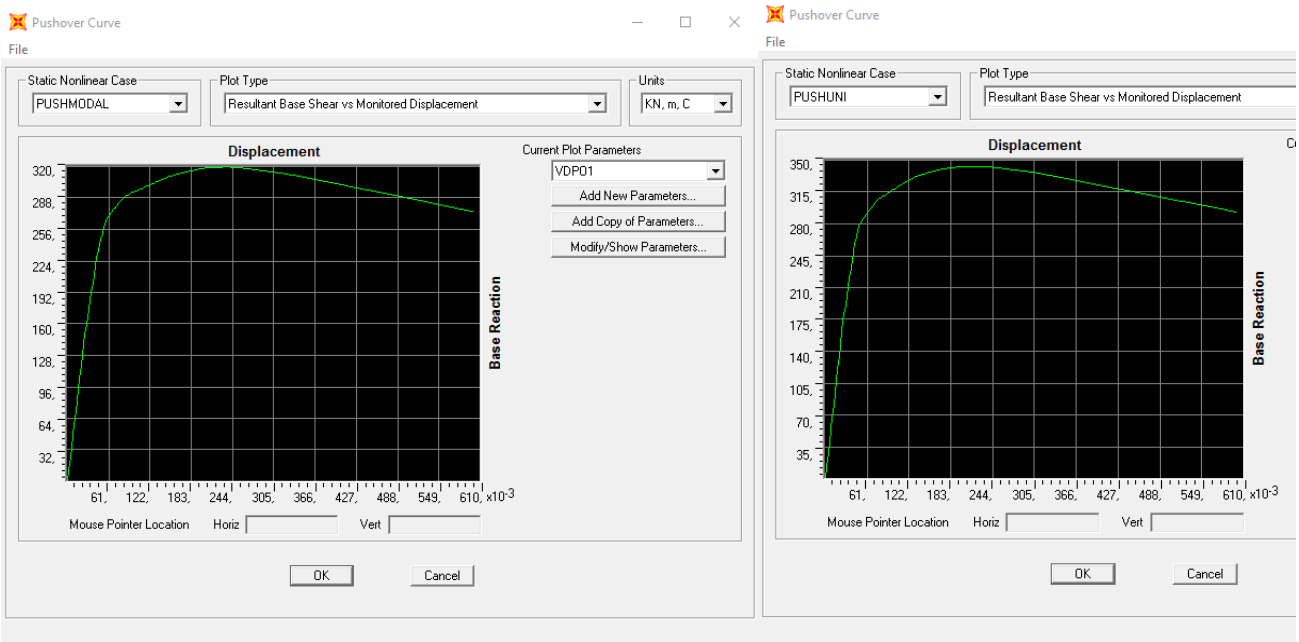
Reset To Defaults

OK Cancel

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.3.1 Καμπύλες αντίστασης

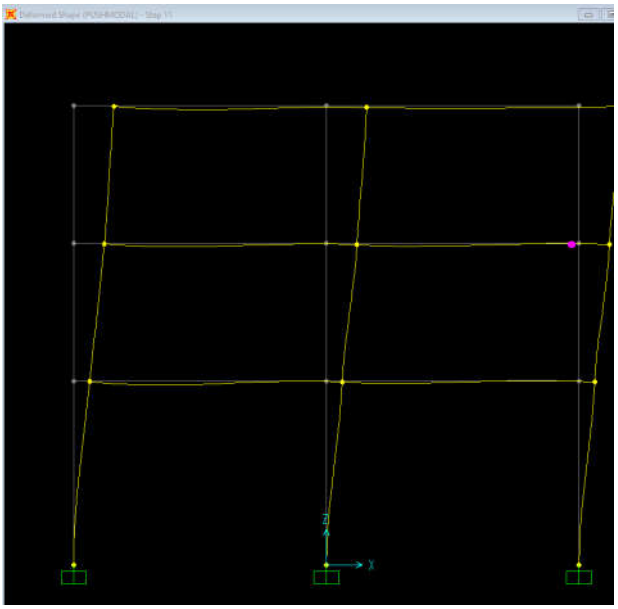
Από τα αποτελέσματα των pushover αναλύσεων προκύπτουν οι καμπύλες αντίστασης (διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης στην κορυφή του κτιρίου) που φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν για το ιδιομορφικό και το ομοιόμορφο μοντέλο φόρτισης. Παρατηρείται ότι στο ομοιόμορφο μοντέλο εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές της τέμνουσας βάσης.

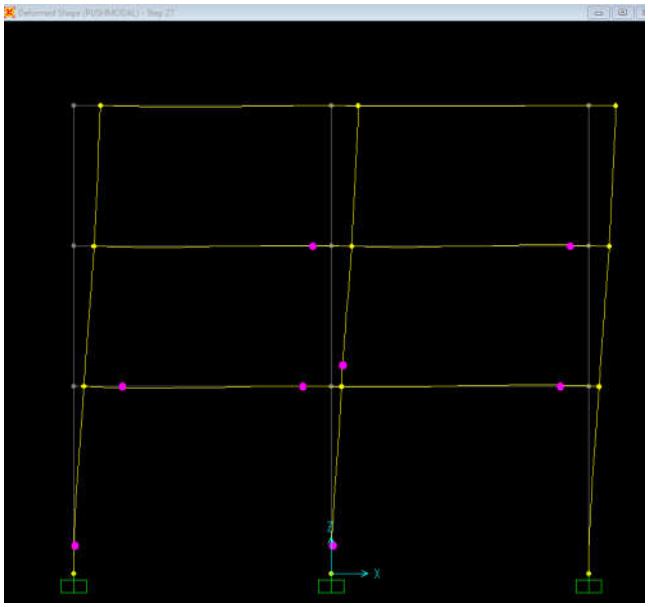


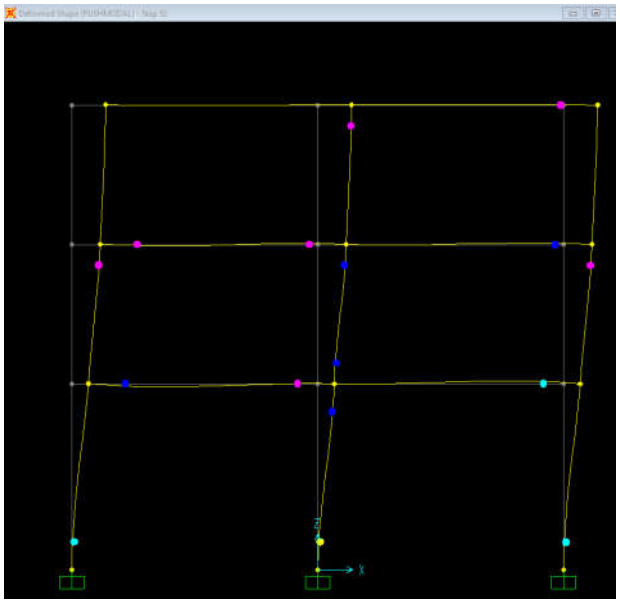
Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν με πολύ άμεσο και πολύ εποπτικό τρόπο χρήσιμα στοιχεία για τη σεισμική απόκριση μιας κατασκευής όπως η αντοχή, η δυσκαμψία και η διαθέσιμη πλαστιμότητα.

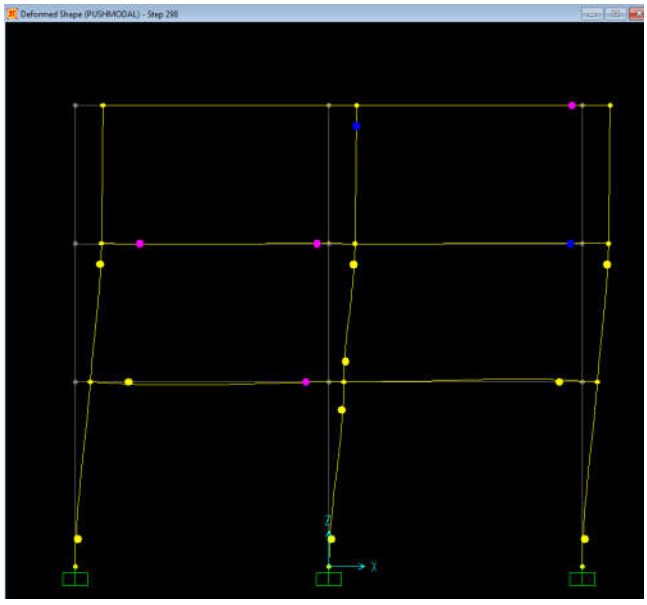
5.3.2 Πλαστικός μηχανισμός

Από τις ανελαστικές στατικές αναλύσεις μπορεί να εκτιμηθεί η σειρά εμφάνισης των πλαστικών αρθρώσεων μέχρι την τελική αστοχία, ανιχνεύοντας έτσι τα πιο αδύναμα σημεία της κατασκευής. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται για το ιδιομορφικό μοντέλο φόρτισης η θέση εμφάνισης της πρώτης πλαστικής άρθρωσης σε δοκό (δ=0.022m), σε στύλο (δ=0.057m), η πρώτη πτώση αντοχής δομικού στοιχείου (δ=0.19m) και η εικόνα των πλαστικών αρθρώσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης (δ=0.6m). Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται όταν στην καρτέλα εμφάνισης της καμπύλης αντίστασης επιλέγεται File->Show tables.








Deformed Shape (PUSHMODAL) - Step 298

5.3.3 Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης

Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης για δεδομένη στάθμη της σεισμικής δράσης γίνεται με τον ίδιο τρόπο στη FEMA και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία που παρουσιάστηκε στις διαλέξεις της θεωρίας του μαθήματος (αρχείο powerpoint). Η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \frac{T_e^2}{4\pi^2} \cdot S_e(T)$$

Όπου

$S_e(T)$ η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση (από το φάσμα του EC8) που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e (υπολογιζόμενη με βάση το σημείο καμπής της καμπύλης αντίστασης του φορέα)

C_0, C_1, C_2 και C_3 διορθωτικοί συντελεστές

Είναι $T_e = T \cdot \sqrt{\frac{K_0}{K_e}}$

όπου T η ελαστική κυριαρχούσα ιδιοπερίοδος στη διεύθυνση που υπολογίζεται με βάση μια ελαστική δυναμική ανάλυση, K_0 η αντίστοιχη ελαστική πλευρική δυσκαμψία, ενώ η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία K_e

Για τις ανάγκες του παραδείγματος που εξετάζεται να θεωρηθεί ότι $K_e=K_0$ οπότε και $T_e=T=0.753$sec. όπως υπολογίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

C_0: Συντελεστής που συσχετίζει τη φασματική μετακίνηση του ισοδύναμου ελαστικού φορέα με δυσκαμψία K_e ($S_d=[T_e^2/4\pi^2]\cdot S_e$), με την πραγματική μετακίνηση δ_t της κορυφής του ελαστοπλαστικά αποκρινόμενου φορέα. Οι τιμές του μπορεί να λαμβάνονται ίσες προς 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, για αριθμό ορόφων 1, 2, 3, 5, και ≥10, αντίστοιχα.

C_1: Ο λόγος $C_1=\delta_{inel}/\delta_{el}$ της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης ενός κτιρίου προς την αντίστοιχη ελαστική επιτρέπεται να λαμβάνεται από τις σχέσεις:
$C_1=1.0$ για $T \geq T_c$, και

$C_1=[1.0+(R-1)T_c/ T]/R$ για $T < T_c$

C_2: Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση. Οι τιμές του μπορεί να λαμβάνονται από τον Πίνακα που ακολουθεί. Για τιμές T μεταξύ 0.1s και T_c πρέπει να γίνεται γραμμική παρεμβολή.

Στάθμη επιτελεστικότητας	$T \leq 0.1s$		$T \geq T_c$	
	φορέας τύπου 1	φορέας τύπου 2	φορέας τύπου 1	φορέας τύπου 2
«Περιορισμένες βλάβες»	1.0	1.0	1.0	1.0
«Σημαντικές βλάβες»	1.3	1.0	1.1	1.0
«Οιονεί κατάρρευση»	1.5	1.0	1.2	1.0

Ως φορείς τύπου 1 νοούνται οι φορείς χαμηλής πλαστιμότητας (π.χ. κτίρια πριν το 1985, ή κτίρια που η καμπύλη αντίστασής τους χαρακτηρίζεται από διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων μικρότερη του 2), που αναμένεται να έχουν φτωχότερη υστερητική συμπεριφορά από εκείνους με υψηλή πλαστιμότητα (φορείς τύπου 2, π.χ. κτίρια από το 1985 και έπειτα, ή κτίρια που η καμπύλη αντίστασής τους χαρακτηρίζεται από διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων μεγαλύτερη του 2).

Για τις ανάγκες του παραδείγματος που εξετάζεται να θεωρηθεί στάθμη επιτελεστικότητας «Σημαντικές βλάβες» και φορέας τύπου 2.

C_3: Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2ας τάξεως (P-δ). Μπορεί να ληφθεί ίσος προς 1+5(θ-0.1)/T, όπου θ ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας. Στη συνήθη (για κτίρια από ΟΣ και από τοιχοποιία) περίπτωση, όπου θ<0.1, λαμβάνεται C_3=1.0

Με βάση τα παραπάνω λαμβάνονται: C_0=1.3, C_1=1.0, C_2=1.0, C_3=1.0

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης του EC8 ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$0 \le T \le T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2{,}5 - 1)\right]$$

$$T_B \le T \le T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5$$

$$T_C \le T \le T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5\left[\frac{T_C}{T}\right]$$

$$T_D \le T \le 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2{,}5\left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right]$$

όπου εμφανίζονται οι ίδιες παράμετροι S, T_B, T_C, T_D, α_g με το φάσμα σχεδιασμού και επιπλέον n=1.0 για 5% ιξώδη απόσβεση που λαμβάνεται στα κτίρια από Ο/Σ.

Από τις τιμές των ιδιοπεριόδων παρατηρείται ότι βρισκόμαστε στον 3ο κλάδο του φάσματος άρα:

$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} = 1.5696 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 2.5 \cdot \frac{0.50}{0.7\ 53} = 3.127 m/sec^2$$

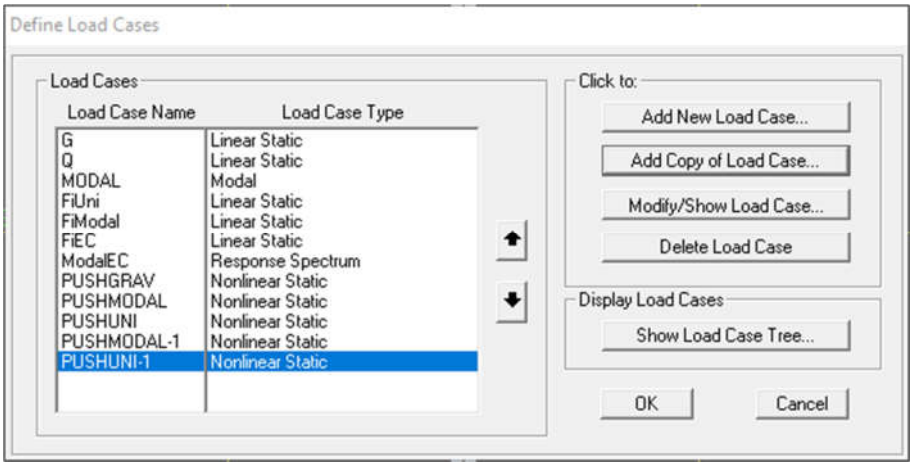
Οπότε η στοχευόμενη μετακίνηση τελικά είναι:

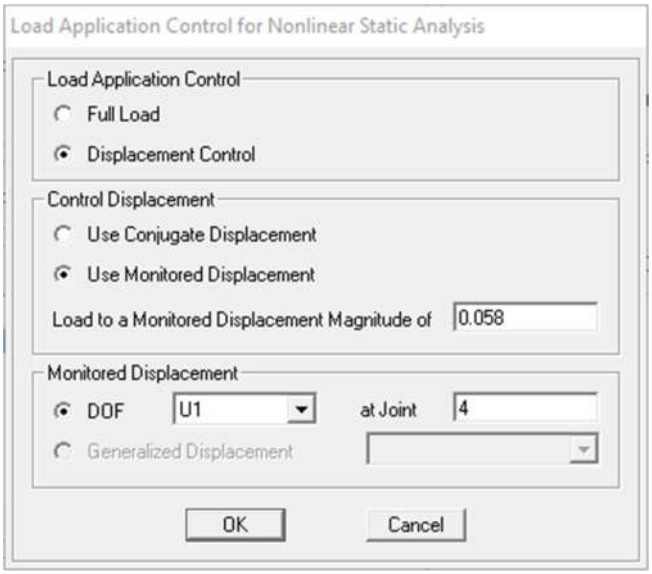
$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \frac{T_e^2}{4\pi^2} \cdot S_e(T) = 1.3 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \frac{0.753^2}{4\pi^2} \cdot 3.127 = 0.058\text{m}$$

5.3.4 Ανελαστική στατική ανάλυση μέχρι τη στοχευόμενη μετακίνηση δ_t

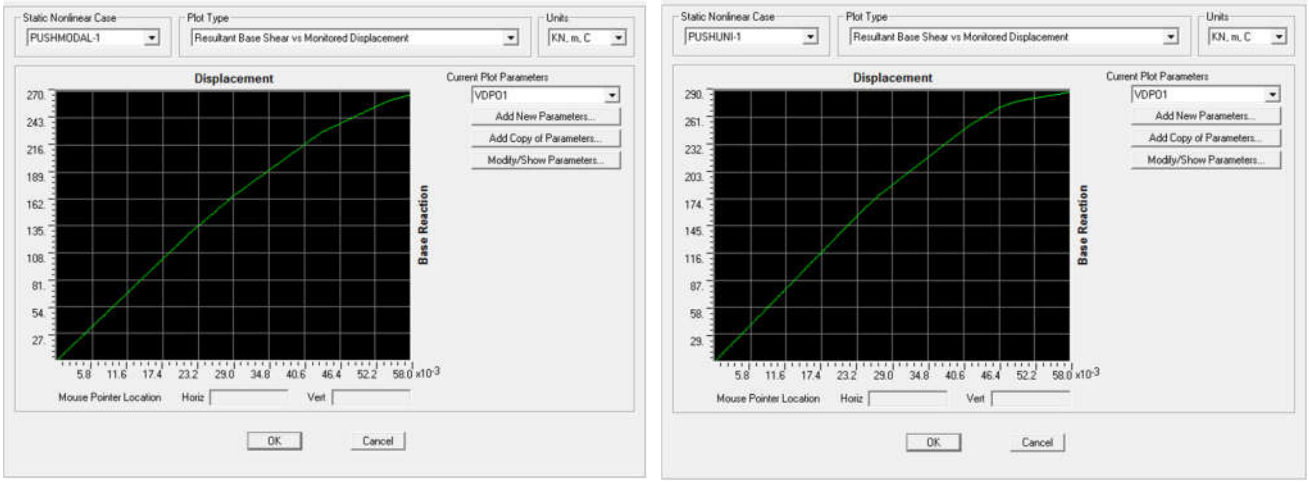
Ακολουθεί η αποτίμηση του φορέα για τη σεισμική δράση που αντιστοιχεί στο a_{gR} του ζητήματος 2, άρα για στοχευόμενη μετακίνηση ίση με δ_t=0.058m.

Δίνονται 2 νέες φορτιστικές καταστάσεις οι οποίες ουσιαστικά είναι όμοιες με τις προηγούμενες pushover cases (επιλέγεται Add Copy of Load Case) με τη μόνη διαφορά ότι αντί για τη μετακίνηση των 0.6m δίνεται η δ_t.

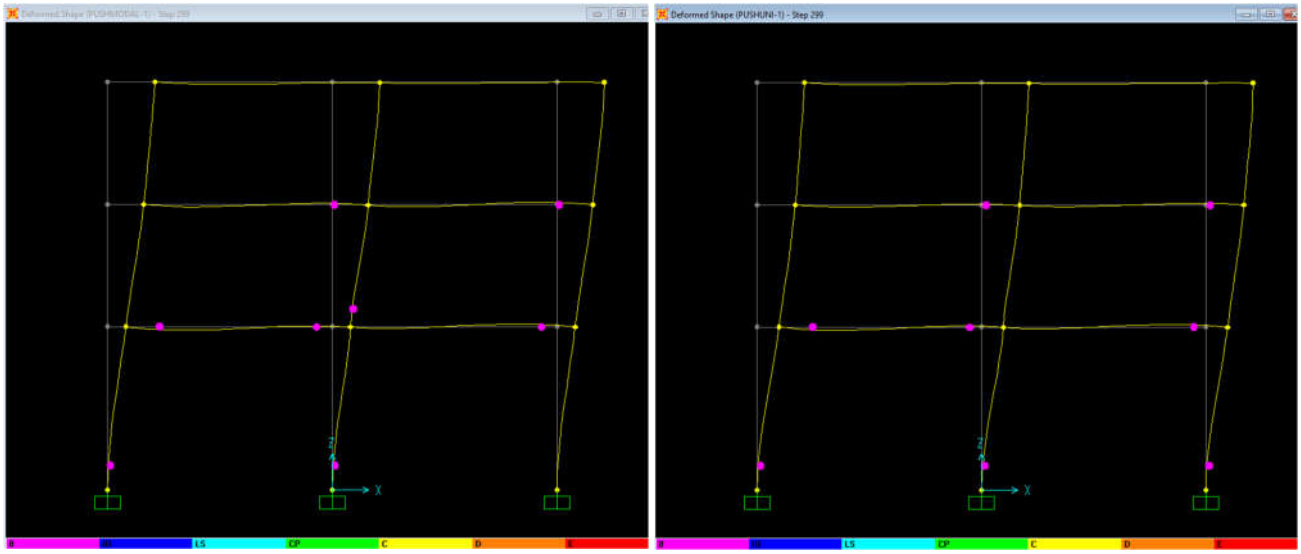




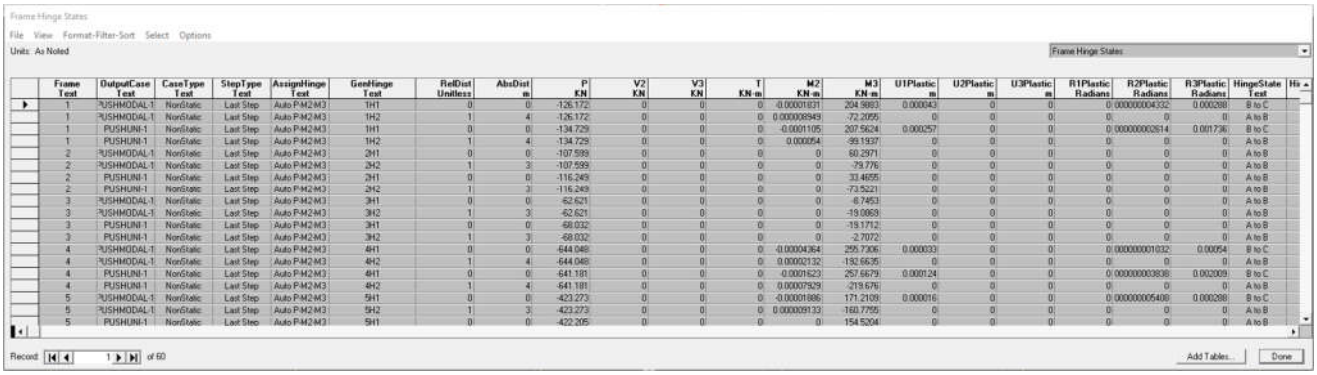
Από τις νέες pushover αναλύσεις οι καμπύλες αντίστασης που προκύπτουν με όριο το δ_t είναι οι παρακάτω (για την ακρίβεια αποτελούν τμήματα των συνολικών καμπυλών αντίστασης που υπολογίστηκαν νωρίτερα) και φαίνεται ότι ο φορέας βρίσκεται στα πρώτα στάδια της ανελαστικής του απόκρισης (αριστερά για το ιδιομορφικό μοντέλο και δεξιά για το ομοιόμορφο).



Οι πλαστικές αρθρώσεις που εμφανίζονται σε αυτή τη στάθμη της σεισμικής δράσης φαίνονται στο επόμενο σχήμα (αριστερά για το ιδιομορφικό μοντέλο και δεξιά για το ομοιόμορφο).



Στον πίνακα που ακολουθεί μπορούν να αναζητηθούν οι τιμές των πλαστικών στροφών που αναπτύσσονται σε κάθε πλαστική άρθρωση. Οι τιμές που προκύπτουν είναι πολύ μικρές οπότε η απόκριση του φορέα για τη συγκεκριμένη στάθμη της σεισμικής δράσης κρίνεται ως ικανοποιητική.



Frame Hinge States

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Frame Hinge States

	Frame Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	AssignHinge Text	GenHinge Text	RelDist Unitless	AbsDist m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	U1Plastic m	U2Plastic m	U3Plastic m	R1Plastic Radians	R2Plastic Radians	R3Plastic Radians	HingeState Text	Hi
▶	1	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	1H1	0	0	-126.172	0	0	0	-0.00001031	204.9883	0.00043	0	0	0	0.000000044332	0.000288	B to C	
	1	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	1H2	1	4	-126.172	0	0	0	0.000008949	-72.2055	0	0	0	0	0	0	A to B	
	1	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	1H1	0	0	-134.729	0	0	0	-0.0001105	207.5624	0.000257	0	0	0	0.000000002614	0.001736	B to C	
	1	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	1H2	1	4	-134.729	0	0	0	0.000054	-99.1937	0	0	0	0	0	0	A to B	
	2	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	2H1	0	0	-107.599	0	0	0	0	60.2971	0	0	0	0	0	0	A to B	
	2	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	2H2	1	3	-107.599	0	0	0	0	-79.776	0	0	0	0	0	0	A to B	
	2	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	2H1	0	0	-116.249	0	0	0	0	33.4655	0	0	0	0	0	0	A to B	
	2	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	2H2	1	3	-116.249	0	0	0	0	-73.5221	0	0	0	0	0	0	A to B	
	3	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	3H1	0	0	-62.621	0	0	0	0	-8.7453	0	0	0	0	0	0	A to B	
	3	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	3H2	1	3	-62.621	0	0	0	0	-19.0869	0	0	0	0	0	0	A to B	
	3	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	3H1	0	0	-68.032	0	0	0	0	-19.1712	0	0	0	0	0	0	A to B	
	3	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	3H2	1	3	-68.032	0	0	0	0	-2.7072	0	0	0	0	0	0	A to B	
	4	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	4H1	0	0	-644.048	0	0	0	-0.00004364	255.7306	0.000033	0	0	0	0.000000001032	0.00054	B to C	
	4	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	4H2	1	4	-644.048	0	0	0	0.00002132	-132.6635	0	0	0	0	0	0	A to B	
	4	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	4H1	0	0	-641.181	0	0	0	-0.0001623	257.6679	0.000124	0	0	0	0.000000003808	0.002009	B to C	
	4	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	4H2	1	4	-641.181	0	0	0	0.00007929	-219.676	0	0	0	0	0	0	A to B	
	5	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	5H1	0	0	-423.273	0	0	0	-0.00001886	171.2109	0.000016	0	0	0	0.000000005408	0.000288	B to C	
	5	PUSHMODAL-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	5H2	1	3	-423.273	0	0	0	0.000009133	-160.7755	0	0	0	0	0	0	A to B	
	5	PUSHUNI-1	NonStatic	Last Step	Auto P-M2-M3	5H1	0	0	-422.205	0	0	0	0	154.5204	0	0	0	0	0	0	A to B	

Record 1 of 60

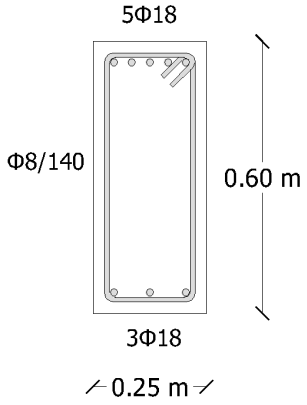
Add Tables... Done

6 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΕΙ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΠΩΝ-ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

6.1.1 Παράδειγμα υπολογισμού δοκού

6.1.1.1 Στοιχεία διατομής



Γίνεται η θεώρηση ότι το κτίριο έχει κατασκευαστεί με τις διατάξεις μετά του 1985 με χρήση νευροχαλύβων και ότι οι συνδετήρες κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος.

Για τη διατομή που αντιστοιχεί στη μεσαία στήριξη των δοκών του ισογείου υπολογίζονται αρχικά ορισμένα από τα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Σε πρώτη φάση παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός του διαγράμματος Μ-θ για τις αρνητικές ροπές (εφελκυσμός του άνω οπλισμού) ενώ στη συνέχεια θα παρατεθούν με συντομία και τα αποτελέσματα για τις θετικές ροπές (εφελκυσμός του κάτω οπλισμού)

Λόγος διάτμησης

Σε δοκούς που συνδέονται και στα δύο άκρα με κατακόρυφα στοιχεία, το L_s μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το μισό του καθαρού ανοίγματος της δοκού.

$$L_s = 0.5 \cdot \left(L - \frac{h_{υπ,αρ}}{2} - \frac{h_{υπ,δεξ}}{2} \right) = 0.5 \cdot \left(5.50 - \frac{0.45}{2} - \frac{0.45}{2} \right) = 2.525m$$

Ο λόγος διάτμησης a_s προκύπτει από τη σχέση: $L_s = a_s \cdot h \Rightarrow a_s = \frac{L_s}{h} = \frac{5.05}{0.60} = 4.21$

Εφελκυόμενος οπλισμός (5Ø18)

Επικάλυψη: $d_1 = c_{nom} + \varnothing_w + 0.5 \cdot \varnothing_L = 30 + 8 + 0.5 \cdot 18 = 47mm = 0.047m$

Στατικό ύψος : $d = h - d_1 = 0.60 - 0.047 = 0.553m$

Εμβαδό οπλισμού: $A_s = 12.72cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{12.72cm^2}{25cm \cdot 55.3cm} = 0.0092$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega = \frac{A_s \cdot f_y}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{12.72cm^2 \cdot 500MPa}{25cm \cdot 55.3cm \cdot 16MPa} = 0.288$

Θλιβόμενος οπλισμός (3Ø18)

Παρατηρείται ότι στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ο θλιβόμενος οπλισμός εμφανίζεται με τονισμένα μεγέθη, αντί για το συνήθη συμβολισμό με δείκτη 2. Έτσι, για παράδειγμα, το εμβαδό του θλιβόμενου οπλισμού συμβολίζεται με A_s' αντί για A_{s2} . Στο παράδειγμα που εξετάζεται η επικάλυψη (συμβολίζεται ως d' στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και όχι d_2) και το στατικό ύψος του θλιβόμενου οπλισμού έχουν ίδιες τιμές με τα αντίστοιχα μεγέθη του εφελκυόμενου.

Εμβαδό οπλισμού: $A_s' = 7.63cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = \frac{7.63cm^2}{25cm \cdot 55.3cm} = 0.00552$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega' = \frac{A_s' \cdot f_y}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{7.63cm^2 \cdot 500MPa}{25cm \cdot 55.3cm \cdot 16MPa} = 0.173$

δ': $\delta' = \frac{d'}{d} = \frac{d_2}{d} = \frac{0.047m}{0.553m} = 0.085$

Ενδιάμεσος οπλισμός

Δεν υπάρχει στη διατομή που εξετάζεται οπότε A_{sv}=0 και ρ_v=0

Σύνολο διαμήκους οπλισμού

Εμβαδό οπλισμού: $A_{s,tot} = 20.36cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho_{tot} = 0.01472$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega_{tot} = 0.460$

Εγκάρσιος οπλισμός (Ø8/140)

$A_{sh} = 1.01 cm^2$ για 2τμητους Φ8

Καθαρή απόσταση των συνδετήρων: $s_h = s - d_w = 140 - 2 \cdot \frac{8}{2} = 132 mm$

Γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού: $\rho_s = \frac{A_{sh}}{b \cdot s_h} = \frac{1.01}{25 \cdot 132} = 0.00305$ (σχέση ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

Ποσοστό οπλισμού διάτμησης: $\rho_w = \frac{A_{sh}}{b \cdot s \cdot \sin a} = \frac{1.01}{25 \cdot 140 \cdot 1} = 0.00287$ (σχέση EC2)

Δισδιαγώνιος οπλισμός

Δεν υπάρχει στη διατομή που εξετάζεται οπότε A_{sd}=0 και ρ_d=0

6.1.1.2 Υπολογισμός της καμπυλότητας και της ροπής διαρροής

Γίνεται έλεγχος αν η διαρροή διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού ή σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος. Ανάλογα με την περίπτωση η καμπυλότητα διαρροής φ_y (στον ΚΑΝ.ΕΠΕ εμφανίζεται ως $(\frac{1}{r})_y$ δίνεται από τις σχέσεις:

- Για διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού: $\varphi_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d}$
- Για μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος: $\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8 f_y}{E_s \xi_y d}$

Και στις δύο περιπτώσεις το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, ξ_y, ανηγμένο στο στατικό ύψος d, είναι:

$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + 2 \cdot \alpha \cdot B)^{0.5} - \alpha \cdot A$, όπου $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200 GPa}{25.3 GPa} = 7.905$

τα Α, Β προσδιορίζονται από τις κατωτέρω σχέσεις, ανάλογα με την περίπτωση

Διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.0092 + 0.00552 + 0 + \frac{0}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.0147$$

$$B = \rho + \rho' \cdot \delta' + 0.5 \cdot \rho_v \cdot (1 + \delta') + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.0092 + 0.00552 \cdot 0.085 + 0 + 0 = 0.00967$$

Άρα προκύπτει:

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + 2 \cdot \alpha \cdot B)^{0.5} - \alpha \cdot A = (7.905^2 \cdot 0.0147^2 + 2 \cdot 7.905 \cdot 0.00967)^{0.5} - 7.905 \cdot 0.0147 = 0.2916$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d} = \frac{500\text{MPa}}{200000\text{MPa} \cdot (1 - 0.2916) \cdot 0.553\text{m}} = 0.00638\text{m}^{-1}$$

Μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{\varepsilon_c E_s b d} \approx \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1.8 \alpha b d f_c} = 0.0092 + 0.00552 + 0 - 0 = 0.0147$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') = 0.0092 + 0.00552 \cdot 0.085 + 0 = 0.00967$$

Παρατηρείται ότι προκύπτουν οι ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + 2 \cdot \alpha \cdot B)^{0.5} - \alpha \cdot A = 0.2916$$

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8 f_y}{E_s \xi_y d} = \frac{1.8 \cdot 500\text{MPa}}{200000\text{MPa} \cdot 0.2916 \cdot 0.553\text{m}} = 0.00706\text{m}^{-1}$$

Τελικές τιμές φ_y, M_y

Από τις παραπάνω περιπτώσεις επιλέγεται η φ_y που έχει τη μικρότερη τιμή καθώς θεωρείται ότι προηγείται και η διαρροή της διατομής στην περίπτωση που εξετάζεται συμβαίνει λόγω διαρροής του εφελκυόμενου οπλισμού. Οπότε τελικά:

$$\varphi_y = 0.00638\text{m}^{-1}$$

$$\frac{M_y}{bd^3} = \varphi_y \left[E_c \frac{\xi_y^2}{2}(0.5(1+\delta') - \frac{\xi_y}{3}) + \left[(1-\xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1-\delta') \right] \cdot (1-\delta')\frac{E_s}{2} \right] =>$$

$$M_y = b \cdot d^3 \cdot \varphi_y \left[E_c \frac{\xi_y^2}{2}(0.5(1+\delta') - \frac{\xi_y}{3}) + \left[(1-\xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1-\delta') \right] \cdot (1-\delta')\frac{E_s}{2} \right] =$$

$$= 0.25\text{m} \cdot (0.553\text{m})^3 \cdot 0.00638\text{m}^{-1} \cdot$$

$$\left[25300000\text{KPa}\frac{0.2916^2}{2}(0.5(1+0.085) - \frac{0.2916}{3}) + \right.$$

$$\left. \left[(1-0.2916)\cdot 0.0092 + (0.2916-0.085)\cdot 0.00552 + \frac{0}{6}\cdot(1-0.085) \right] \cdot (1-0.085)\frac{200000000\text{KPa}}{2} \right] =$$

$$= 0.00026973 \cdot [1075636.6 \cdot 0.4453 + [0.00652 + 0.00114] \cdot 91500000] = 318.36\text{kNm}$$

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης (θα χρειαστεί παρακάτω) είναι

$x = \xi_y \cdot d = 0.2916 \cdot 0.553 = 0.1613m$

6.1.1.3 Υπολογισμός της στροφής διαρροής

Η γωνία στροφής χορδής θ_y στην καμπτική διαρροή στοιχείων μπορεί να εκτιμηθεί για δοκούς ή υποστυλώματα από την ακόλουθη έκφραση:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014(1+1.5\frac{h}{L_s}) + \frac{\varphi_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}}$$

όπου:

- Ο όρος a_v εκφράζει την επιρροή του «μήκους μετάθεσης» των ροπών κάμψης σ' αυτές και ισούται με 1.0 εάν η τέμνουσα V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου, υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $V_{Mu} = M_y / L_s$, και με 0 αν είναι μεγαλύτερη.
- z είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων και σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπολογίζεται ως: $z = d - d_2 = 0.553 - 0.047 = 0.506\text{m}$ (συχνά λαμβάνεται από τους κανονισμούς η απλή σχέση z=0.9d)
- d_b είναι η διάμετρος των εφελκυόμενων διαμήκων ράβδων. Στην περίπτωση που εξετάζεται d_b=18mm
- Οι f_c, f_y λαμβάνονται σε MPa

Παρατηρείται ότι όλοι οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι γνωστοί, χρειάζεται όμως να γίνει ο έλεγχος των τεμνουσών για να επιλεγεί η τιμή του όρου α_v

$V_{Mu} = M_y / L_s = 318.36\text{kNm} / 2.526\text{m} = 126.03kN$

Η τέμνουσα V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου μπορεί να λαμβάνεται από τη σχέση του EC2 (με μέσες τιμές για τις αντοχές των υλικών και χωρίς συντελεστές ασφάλειας) για το $V_{Rd,c}$, δηλαδή:

$$V_{Rd,c} = \max\begin{cases}[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b \cdot d \\ (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d\end{cases}$$

όπου:

- $C_{RD,c} = 0.18 / y_c = 0.18$
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{553}} = 1.601$ (το d σε mm)
- $\sigma_{cp} = \frac{N}{A_c} = 0$
- $k_1 = 0.15$
- $v_{min} = 0.035 k^{3/2} \cdot f_c^{1/2} = 0.035 \cdot 1.601^{3/2} \cdot 16^{1/2} = 0.284$

οπότε:

$$V_{Rd,c} = \max\begin{cases}[0.18 \cdot 1.601 \cdot (100 \cdot 0.0092 \cdot 16)^{1/3} + 0.15 \cdot 0] \cdot 250\text{mm} \cdot 553\text{mm} \\ (0.284 + 0.15 \cdot 0) \cdot 250\text{mm} \cdot 553\text{mm}\end{cases} = \max\begin{cases}97676\text{N} \\ 39263\text{N}\end{cases} = 97.68\text{kN}$$

Παρατηρείται ότι $V_{R1} = V_{Rd,c} < V_{Mu}$ άρα α_v=1.0

$$\theta_y = 0.00638 \frac{2.526 + 1.0 \cdot 0.506}{3} + 0.0014(1 + 1.5 \frac{0.60}{2.526}) + \frac{0.00638 \cdot 0.018 \cdot 500}{8\sqrt{16}} = 0.0101$$

6.1.1.4 Υπολογισμός της στροφής αστοχίας

Για τη μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία δοκών ή υποστυλωμάτων που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με τις μετά το 1985 διατάξεις για αντισεισμικότητα επιτρέπεται να χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\theta_{um} = 0.016 \cdot (0.3^{\nu}) \left[\frac{max(0.01, \omega')}{max(0.01, \omega)} \cdot f_c \right]^{0.225} \cdot (\alpha_s)^{0.35} \cdot 25^{(\alpha \cdot \rho_s \cdot \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1.25^{100\rho_d})$$

όπου:

- α_s, ω, ω', ρ_s, ρ_d έχουν υπολογιστεί παραπάνω
- α: συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης (προσοχή, δεν είναι ο λόγος $\alpha = \frac{E_s}{E_c}$)
- f_{yw}: όριο διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων (ίσο με το f_y θεωρώντας ίδιες ποιότητες)
- $\nu = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_c} = 0$ (η θλίψη θεωρείται με θετικό πρόσημο)

Στην περίπτωση οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. συνιστά, προς την πλευρά της ασφάλειας, να αμελείται η περίσφιξη οπότε να λαμβάνεται α=0. Σε διαφορετική περίπτωση:

$$\alpha = (1 - \frac{s_h}{2 \cdot b_c})(1 - \frac{s_h}{2 \cdot h_c})(1 - \frac{\sum b_i^2}{6 \cdot b_c \cdot h_c})$$

Στη σχέση του α οι b_c και h_c είναι οι διαστάσεις του πυρήνα (με h_c<1.5÷2.0b_c) και b_i οι (περίπου ίσες) αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα ή άγκιστρο σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου, κατά την περίμετρο της διατομής. Εναλλακτικώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του h_c το ύψος της θλιβόμενης ζώνης εντός του περισφιγμένου πυρήνα, οπότε ως b_i θα λαμβάνονται οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων κατά την εξωτερική περίμετρο της θλιβόμενης ζώνης, με αφετηρία τον ουδέτερο άξονα.

$b_c = b - 2 \cdot d_1 = 0.25 - 2 \cdot 0.047 = 0.156m$ (θεωρούμε ότι και η πλευρική επικάλυψη ισούται με d_1)

$h_c = h - d_1 - d_2 = 0.60 - 2 \cdot 0.047 = 0.506m$

Είναι: $h_c / b_c = 3.24 > 2.0$ οπότε ως h_c θα χρησιμοποιηθεί το ύψος της θλιβόμενης ζώνης εντός του περισφιγμένου πυρήνα $x - d_2$. Απλοποιητικά θα ληφθεί εδώ το ύψος θλιβόμενης ζώνης που υπολογίστηκε στη διαρροή, έτσι $h_c = x - d_2 = 0.161 - 0.047 = 0.114$m

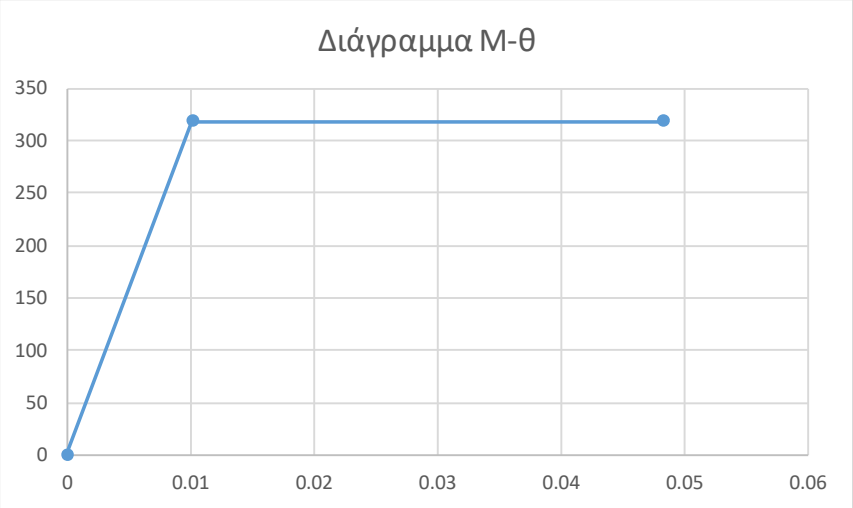
$$\sum b_i^2 = 2 \cdot b_c^2 + 2 \cdot h_c^2 = 2 \cdot 0.156^2 + 2 \cdot 0.114^2 = 0.0748 \text{m}^2$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει: $\alpha = (1 - \frac{0.132}{2 \cdot 0.156})(1 - \frac{0.132}{2 \cdot 0.114})(1 - \frac{0.0748}{6 \cdot 0.156 \cdot 0.114}) = 0.0733$

και τελικά: $\theta_{um} = 0.0483$

Η παραπάνω τιμή θα πολλαπλασιάζονταν με 0.95 αν ο διαμήκης οπλισμός αποτελούνταν από λείες ράβδους ενώ αν το κτίριο είχε διαστασιολογηθεί με τις διατάξεις προ του 1985 θα διαιρούνταν με το 1.2.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. θεωρεί διάγραμμα χωρίς κράτυνση οπότε M_u=M_y



6.1.1.5 Υπολογισμός για τις θετικές ροπές

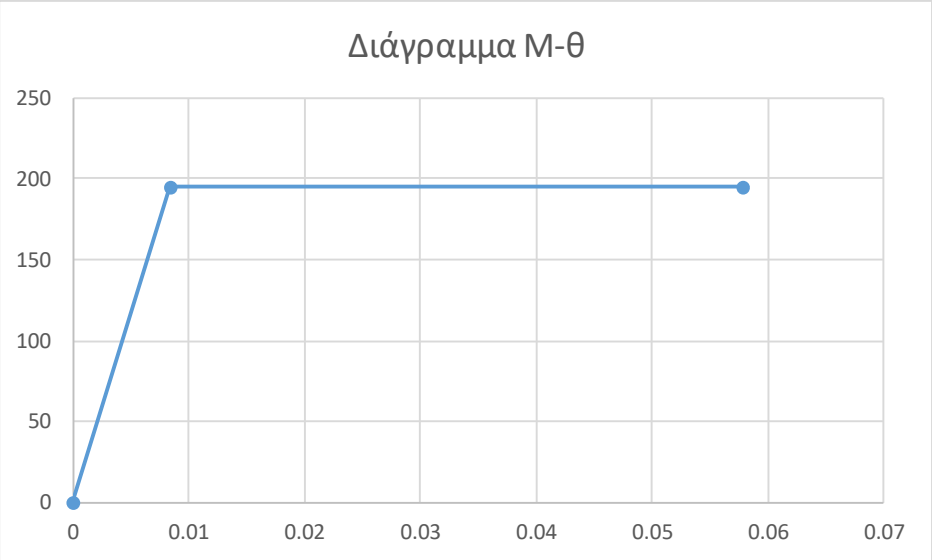
Η μόνη διαφορά με τον προηγούμενο υπολογισμό είναι ότι τώρα ο εφελκυόμενος οπλισμός είναι 3Ø18 ($A_s = 7.63cm^2$) και ο θλιβόμενος 5Ø18 ($A_s^{'} = 12.72cm^2$). Οπότε αντίστοιχα μεταβάλλονται και τα αντίστοιχα ποσοστά ρ και ω.

Τελικά προκύπτει:

M_y=M_u=194.89kNm

θ_y=0.0084

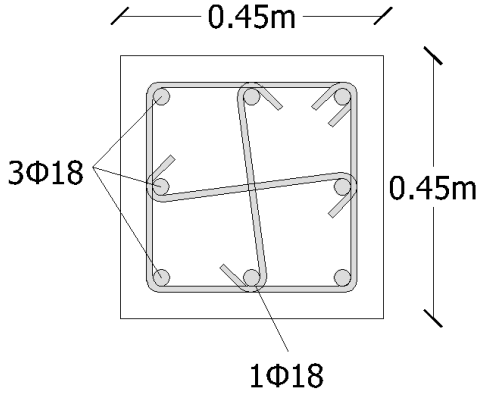
θ_u=0.0579



6.1.2 Παράδειγμα υπολογισμού υποστυλώματος

6.1.2.1 Στοιχεία διατομής

Το παράδειγμα αφορά τα ακραία υποστυλώματα του ισογείου



Λόγος διάτμησης

Σε υποστυλώματα, το L_s μπορεί να λαμβάνεται ως το μισό του καθαρού ύψους μέσα στο υπόψη κατακόρυφο επίπεδο κάμψης όπως αυτό ορίζεται, π.χ., από το κάτω πέλμα υπερκείμενης δοκού μέχρι το άνω πέλμα της υποκείμενης δοκού,

$$L_s = 0.5\cdot\left(\mathrm{H} - h_{\delta o\kappa,\alpha\nu\omega}\right) = 0.5\cdot\left(4.00 - 0.60\right) = 1.70m$$

Ο λόγος διάτμησης α_s προκύπτει από τη σχέση: $L_s = \alpha_s \cdot h \Rightarrow \alpha_s = \frac{L_s}{h} = \frac{1.70}{0.45} = 3.78$

Εφελκυόμενος οπλισμός (3Ø18)

Επικάλυψη: $d_1 = c_{nom} + \emptyset_w + 0.5\cdot\emptyset_L = 30 + 8 + 0.5\cdot 18 = 47mm = 0.047m$

Στατικό ύψος : $d = h - d_1 = 0.45 - 0.047 = 0.403m$

Εμβαδό οπλισμού: $A_s = 7.63cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho = \frac{\mathrm{A}_s}{b\cdot d} = \frac{7.63cm^2}{45cm\cdot 40.3cm} = 0.0042$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega = \frac{A_s\cdot f_y}{b\cdot d\cdot f_c} = \frac{(7.63+5.09)cm^2\cdot 500MPa}{45cm\cdot 40.3cm\cdot 16MPa} = 0.219$

(συνυπολογίζεται και ο ενδιάμεσος οπλισμός στο ω)

Θλιβόμενος οπλισμός (3Ø18)

Παρατηρείται ότι στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ο θλιβόμενος οπλισμός εμφανίζεται με τονισμένα μεγέθη, αντί για το συνήθη συμβολισμό με δείκτη 2. Έτσι, για παράδειγμα, το εμβαδό του θλιβόμενου οπλισμού συμβολίζεται με $A_s^{'}$ αντί για A_{s2} . Στο παράδειγμα που εξετάζεται η επικάλυψη (συμβολίζεται ως $d^{'}$ στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και όχι d_2) και το στατικό ύψος του θλιβόμενου οπλισμού έχουν ίδιες τιμές με τα αντίστοιχα μεγέθη του εφελκυόμενου.

Εμβαδό οπλισμού: $A_s^{'} = 7.63cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho' = \frac{A_s^{'}}{b \cdot d} = \frac{7.63cm^2}{45cm \cdot 40.3cm} = 0.0042$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega^{'} = \frac{A_s^{'} \cdot f_y}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{7.63cm^2 \cdot 500MPa}{45cm \cdot 40.3cm \cdot 16MPa} = 0.132$

$\delta^{'}$: $\delta^{'} = \frac{d'}{d} = \frac{d_2}{d} = \frac{0.047m}{0.403m} = 0.117$

Ενδιάμεσος οπλισμός

Εμβαδό οπλισμού: $A_{sv} = 5.09cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot d} = \frac{5.09cm^2}{45cm \cdot 40.3cm} = 0.0028$

Σύνολο διαμήκους οπλισμού

Εμβαδό οπλισμού: $A_{s,tot} = 20.36cm^2$

Ποσοστό οπλισμού: $\rho_{tot} = 0.0112$

Μηχανικό ποσοστό οπλισμού: $\omega_{tot} = 0.351$

Εγκάρσιος οπλισμός (Ø8/120)

$A_{sh} = 1.51cm^2$ για 3τμητους Φ8

Καθαρή απόσταση των συνδετήρων: $s_h = s - d_w = 120 - 2 \cdot \frac{8}{2} = 112mm$

Γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού: $\rho_s = \frac{A_{sh}}{b \cdot s_h} = \frac{1.51}{45 \cdot 112} = 0.00299$ (σχέση ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

Ποσοστό οπλισμού διάτμησης: $\rho_w = \frac{A_{sh}}{b \cdot s \cdot \sin a} = \frac{1.51}{45 \cdot 120 \cdot 1} = 0.00279$ (σχέση EC2)

Δισδιαγώνιος οπλισμός

Δεν υπάρχει στη διατομή που εξετάζεται οπότε A_{sd}=0 και ρ_d=0

6.1.2.2 Υπολογισμός της καμπυλότητας και της ροπής διαρροής

Ομοίως με τις δοκούς εφαρμόζεται η παρακάτω διαδικασία. Δίνεται προσοχή ότι στο υποστύλωμα υπάρχει και αξονικό φορτίο. Λαμβάνεται για ευκολία η τιμή που υπολογίστηκε για G+0.3Q (παρουσιάστηκε παραπάνω το σχετικό διάγραμμα) και είναι N=-270.14kN (θλίψη). Στις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. η θλίψη εμφανίζεται με θετικό πρόσημο.

Διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.0042 + 0.0042 + 0.0028 + \frac{270.14kN}{0.45m \cdot 0.403m \cdot 500000 \, kN/m^2} = 0.0142$$

$$B = \rho + \rho' \cdot \delta' + 0.5 \cdot \rho_v \cdot (1 + \delta') + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} =$$

$$= 0.0042 + 0.0042 \cdot 0.117 + 0.5 \cdot 0.0028 \cdot (1 + 0.117) + \frac{270.14kN}{0.45m \cdot 0.403m \cdot 500000 \, kN/m^2} = 0.00925$$

Άρα προκύπτει:

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + 2 \cdot \alpha \cdot B)^{0.5} - \alpha \cdot A = 0.2862$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d} = \frac{500\text{MPa}}{200000\text{MPa} \cdot (1 - 0.2862) \cdot 0.403\text{m}} = 0.00869\text{m}^{-1}$$

Μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{\varepsilon_c E_s b d} \approx \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1.8 \alpha b d f_c} = 0.00468$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') = 0.00627$$

Παρατηρείται ότι προκύπτουν οι ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + 2 \cdot \alpha \cdot B)^{0.5} - \alpha \cdot A = 0.2799$$

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8 f_y}{E_s \xi_y d} = 0.0101 \mathrm{m}^{-1}$$

Τελικές τιμές φ_y, M_y

Από τις παραπάνω περιπτώσεις επιλέγεται η φ_y που έχει τη μικρότερη τιμή καθώς θεωρείται ότι προηγείται και η διαρροή της διατομής στην περίπτωση που εξετάζεται συμβαίνει λόγω διαρροής του εφελκυόμενου οπλισμού. Οπότε τελικά:

$$\varphi_y = 0.00869 \mathrm{m}^{-1}$$

$$\frac{M_y}{b d^3} = \varphi_y \left[E_c \frac{\xi_y^2}{2} (0.5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3}) + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] \cdot (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right] =>$$

$$M_y = b \cdot d^3 \cdot \varphi_y \left[E_c \frac{\xi_y^2}{2} (0.5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3}) + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] \cdot (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right] =$$

$$= 216.21 \mathrm{kNm}$$

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης (θα χρειαστεί παρακάτω) είναι

$$x = \xi_y \cdot d = 0.2861 \cdot 0.403 = 0.1153 m$$

6.1.2.3 Υπολογισμός της στροφής διαρροής

Η γωνία στροφής χορδής θ_y στην καμπτική διαρροή στοιχείων μπορεί να εκτιμηθεί για δοκούς ή υποστυλώματα από την ακόλουθη έκφραση:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014(1 + 1.5\frac{h}{L_s}) + \frac{\varphi_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}}$$

όπου:

- Ο όρος a_v εκφράζει την επιρροή του «μήκους μετάθεσης» των ροπών κάμψης σ' αυτές και ισούται με 1.0 εάν η τέμνουσα V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου, υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $V_{Mu} = M_y / L_s$, και με 0 αν είναι μεγαλύτερη.
- z είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων και σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπολογίζεται ως: $z = d - d_2 = 0.403 - 0.047 = 0.356\text{m}$ (συχνά λαμβάνεται από τους κανονισμούς η απλή σχέση z=0.9d)
- d_b είναι η διάμετρος των εφελκυόμενων διαμήκων ράβδων. Στην περίπτωση που εξετάζεται d_b=18mm
- Οι f_c, f_y λαμβάνονται σε MPa

Παρατηρείται ότι όλοι οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι γνωστοί, χρειάζεται όμως να γίνει ο έλεγχος των τεμνουσών για να επιλεγεί η τιμή του όρου a_v

$$V_{Mu} = M_y / L_s = 216.21\text{kNm} / 1.701\text{m} = 127.11kN$$

Η τέμνουσα V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου μπορεί να λαμβάνεται από τη σχέση του EC2 (με μέσες τιμές για τις αντοχές των υλικών και χωρίς συντελεστές ασφάλειας) για το $V_{Rd,c}$, δηλαδή:

$$V_{Rd,c} = \max \begin{cases} [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b \cdot d \\ (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d \end{cases}$$

όπου:

- $C_{RD,c} = 0.18 / \gamma_c = 0.18$
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{403}} = 1.704$ (το d σε mm)
- $\sigma_{cp} = \frac{270.14kN}{0.45m \cdot 0.45m} = 1334.0kN/m^2 = 1.3304N/mm^2$
- $k_1 = 0.15$

- $v_{min} = 0.035k^{3/2} \cdot f_c^{1/2} = 0.035 \cdot 1.704^{3/2} \cdot 16^{1/2} = 0.312$

οπότε:

$$V_{Rd,c} = \max\begin{cases}[0.18 \cdot 1.704 \cdot (100 \cdot 0.0042 \cdot 16)^{1/3} + 0.15 \cdot 1.334] \cdot 450 \cdot 403 \\ (0.284 + 0.15 \cdot .334) \cdot 450 \cdot 403\end{cases} = \max\begin{cases}141345\text{N} \\ 92786\text{N}\end{cases} = 141.35\text{kN}$$

Παρατηρείται ότι $V_{R1} = V_{Rd,c} > V_{Mu}$ άρα α_v=0.0

$$\theta_y = 0.00869\frac{1.701 + 0.0 \cdot 0.356}{3} + 0.0014(1 + 1.5\frac{0.45}{1.701}) + \frac{0.00869 \cdot 0.018 \cdot 500}{8\sqrt{16}} = 0.0093$$

6.1.2.4 Υπολογισμός της στροφής αστοχίας

Για τη μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία δοκών ή υποστυλωμάτων που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με τις μετά το 1985 διατάξεις για αντισεισμικότητα επιτρέπεται να χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\theta_{um} = 0.016 \cdot (0.3^{\nu}) \left[\frac{max(0.01, \omega')}{max(0.01, \omega)} \cdot f_c\right]^{0.225} \cdot (\alpha_s)^{0.35} \cdot 25^{(\alpha \cdot \rho_s \cdot \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1.25^{100\rho_d})$$

όπου:

- α_s, ω, ω', ρ_s, ρ_d έχουν υπολογιστεί παραπάνω
- α: συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης (προσοχή, δεν είναι ο λόγος $\alpha = \frac{E_s}{E_c}$)
- f_{yw}: όριο διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων (ίσο με το f_y θεωρώντας ίδιες ποιότητες)
- $\nu = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_c} = \frac{270.14kN}{0.45\text{m} \cdot 0.45\text{m} \cdot 16000\,\text{kN/m}^2} = 0.083$ (η θλίψη θεωρείται με θετικό πρόσημο)

Στην περίπτωση οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. συνιστά, προς την πλευρά της ασφάλειας, να αμελείται η περίσφιξη οπότε να λαμβάνεται α=0. Σε διαφορετική περίπτωση:

$$\alpha = (1 - \frac{s_h}{2 \cdot b_c})(1 - \frac{s_h}{2 \cdot h_c})(1 - \frac{\sum b_i^2}{6 \cdot b_c \cdot h_c})$$

Στη σχέση του α οι b_c και h_c είναι οι διαστάσεις του πυρήνα (με h_c<1.5÷2.0b_c) και b_i οι (περίπου ίσες) αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα ή άγκιστρο

σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου, κατά την περίμετρο της διατομής. Εναλλακτικώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του h_c το ύψος της θλιβόμενης ζώνης εντός του περισφιγμένου πυρήνα, οπότε ως b_i θα λαμβάνονται οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων κατά την εξωτερική περίμετρο της θλιβόμενης ζώνης, με αφετηρία τον ουδέτερο άξονα.

$b_c = b - 2 \cdot d_1 = 0.45 - 2 \cdot 0.047 = 0.356m$

$h_c = h - 2 \cdot d_1 = 0.45 - 2 \cdot 0.047 = 0.356m$

Είναι: $h_c / b_c = 1.0 < 2.0$

$$\sum b_i^2 = 4 \cdot \left(\frac{b_c}{2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{h_c}{2}\right)^2 = 4 \cdot \left(\frac{0.356}{2}\right)^2 + \cdot \left(\frac{0.356}{2}\right)^2 = 0.2535\text{m}^2$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει: $\alpha = (1 - \frac{0.112}{2 \cdot 0.356})(1 - \frac{0.112}{2 \cdot 0.356})(1 - \frac{0.2535}{6 \cdot 0.356 \cdot 0.356}) = 0.473$

και τελικά: $\theta_{um} = 0.0469$

Η παραπάνω τιμή θα πολλαπλασιάζονταν με 0.95 αν ο διαμήκης οπλισμός αποτελούνταν από λείες ράβδους ενώ αν το κτίριο είχε διαστασιολογηθεί με τις διατάξεις προ του 1985 θα διαιρούνταν με το 1.2.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. θεωρεί διάγραμμα χωρίς κράτυνση οπότε M_u=M_y

