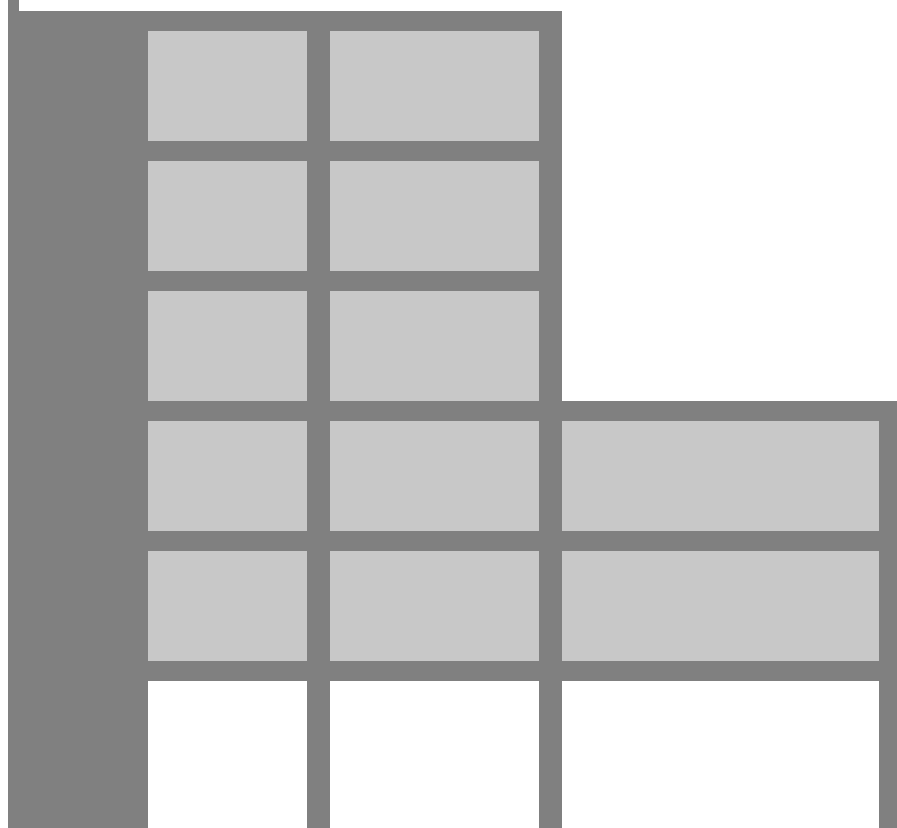


Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή

*Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων
στοιχείων SAP 2000*

Εμμανουήλ Κίρτας
Γεώργιος Παναγόπουλος



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή

Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP 2000

Συγγραφή:

Εμμανουήλ Κίρτας

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής ΤΕ, ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας

Γεώργιος Παναγόπουλος

Καθηγητής Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής ΤΕ, ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας

Κριτική Ανάγνωση:

Αναστάσιος Σέξτος

Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τεχνική Επεξεργασία:

Στυλιανός Δημητρίου

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης

Σέρρες 2015



**Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα**
www.kallipos.gr

Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή *Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP 2000*

Συγγραφή

Εμμανουήλ Κίρτας

Γεώργιος Παναγόπουλος

Κριτική Ανάγνωση

Αναστάσιος Σέξτος

Τεχνική Επεξεργασία

Στυλιανός Δημητρίου

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση – Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/>

Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
www.kallipos.gr

ISBN: 978-960-603-227-1

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων	5
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια	9
Πρόλογος	11
Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων – Βασικές έννοιες	
1.1. Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων	15
1.2. Τύποι πεπερασμένων στοιχείων	16
1.3. Γεωμετρία και στηρίξεις του φορέα	18
1.4. Ιδιότητες υλικών	18
1.5. Ορισμός διατομών	18
1.6. Φορτία	19
1.7. Πρόσθετα χαρακτηριστικά φορέα	19
1.8. Ανάλυση φορέα και έλεγχος αποτελεσμάτων	20
Βιβλιογραφικές αναφορές 1 ^{ου} Κεφαλαίου	20
Κεφάλαιο 2: Στατική επίλυση προβόλου	
2.1. Δεδομένα παραδείγματος	21
2.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα	22
2.3. Αποθήκευση αρχείου προγράμματος	28
2.4. Ορισμός υλικού	28
2.5. Ορισμός διατομής	30
2.6. Ορισμός φορτίων	33
2.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων	39
2.8. Γρήγορος έλεγχος προσομοιώματος	40
2.9. Ανάλυση φορέα	41
2.10. Αποτελέσματα	42
Βιβλιογραφικές αναφορές 2 ^{ου} Κεφαλαίου	44
Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση επίπεδου πλαίσιακού φορέα	
3.1. Δεδομένα παραδείγματος	45
3.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα	46
3.3. Ορισμός υλικού	47
3.4. Ορισμός διατομών δομικών στοιχείων φορέα	47
3.5. Ορισμός φορτίων	53
3.6. Ορισμός διαφραγματικής λειτουργίας	57
3.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων	59
3.8. Γρήγορος έλεγχος προσομοιώματος	59

3.9. Ανάλυση φορέα	60
3.10. Αποτελέσματα	60
Βιβλιογραφικές αναφορές 3 ^{ου} Κεφαλαίου	63

Κεφάλαιο 4: Τροποποίηση γεωμετρίας και ιδιοτήτων φορέα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

4.1. Δεδομένα παραδείγματος	65
4.2. Τροποποίηση γεωμετρίας φορέα	66
4.3. Ανάλυση φορέα	71
4.4. Αποτελέσματα	71
Βιβλιογραφικές αναφορές 4 ^{ου} Κεφαλαίου	74

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση πολυώροφου χωρικού φορέα

5.1. Δεδομένα παραδείγματος	75
5.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα	76
5.3. Επισκόπηση τρισδιάστατου φορέα	80
5.4. Ορισμός φορτίων	83
5.5. Ορισμός διαφραγματικής λειτουργίας	94
5.6. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων	95
5.7. Ανάλυση φορέα	95
5.8. Αποτελέσματα	95
Βιβλιογραφικές αναφορές 5 ^{ου} Κεφαλαίου	100

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων

6.1. Δεδομένα παραδείγματος	101
6.2. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα	102
6.3. Έλεγχος ιδιοτήτων νέων στοιχείων και τροποποίηση καννάβου	105
6.4. Προσομοίωση τοιχώματος με γραμμικά στοιχεία και ορισμός διατομών	109
6.5. Ορισμός φορτίων	115
6.6. Ορισμός διαφράγματος	115
6.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων	116
6.8. Ανάλυση φορέα	116
6.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοιχώματος με γραμμικά στοιχεία	116
Βιβλιογραφικές αναφορές 6 ^{ου} Κεφαλαίου	120

Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

7.1. Δεδομένα παραδείγματος	121
7.2. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα	122
7.3. Ανάλυση φορέα	127
7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία	127
Βιβλιογραφικές αναφορές 7 ^{ου} Κεφαλαίου	130

Κεφάλαιο 8: Προσομοίωση πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

8.1. Δεδομένα παραδείγματος Α: Υπολογισμός καμπτικών ροπών πλάκας με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων	131
8.2. Δεδομένα παραδείγματος Β: Προσομοίωση διαφραγματικής λειτουργίας πλάκας με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία	141
Βιβλιογραφικές αναφορές 8 ^{ου} Κεφαλαίου	149

Κεφάλαιο 9: Δυναμική φασματική ανάλυση πολυώροφου χωρικού φορέα

9.1. Δεδομένα παραδείγματος	151
9.2. Γεωμετρία φορέα	152
9.3. Διατομές δομικών στοιχείων φορέα	161
9.4. Κατακόρυφα φορτία και μάζα φορέα	167
9.5. Υπολογισμός και ανάθεση φάσματος σχεδιασμού του EC8	170
9.6. Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων και συνδυασμών δράσεων	177
9.7. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων	179
Βιβλιογραφικές αναφορές 9 ^{ου} Κεφαλαίου	187

Κεφάλαιο 10: Δυναμική φασματική ανάλυση κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης

10.1. Δεδομένα παραδείγματος	189
10.2. Ενδοσιμότητα εδάφους θεμελίωσης	190
10.3. Τροποποίηση παραμέτρων φόρτισης	203
10.4. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων	204
Βιβλιογραφικές αναφορές 10 ^{ου} Κεφαλαίου	209

Κεφάλαιο 11: Δυναμική ελαστική ανάλυση με χρονοϊστορία επιταχύνσεων

11.1. Δεδομένα παραδείγματος	211
11.2. Υπολογισμός και ανάθεση μάζας στον φορέα	211
11.3. Ορισμός δυναμικής ανάλυσης με χρονοϊστορία επιταχύνσεων	214
11.4. Ορισμός συνδυασμών φόρτισης δυναμικών αναλύσεων με χρονοϊστορία	224
11.5. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων	225
Βιβλιογραφικές αναφορές 11 ^{ου} Κεφαλαίου	232

Κεφάλαιο 12: Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)

12.1. Δεδομένα παραδείγματος	233
12.2. Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover analysis)	234
12.3. Καθορισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς διατομής οπλισμένου σκυροδέματος	236
12.4. Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων (hinges)	246
12.5. Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης στο SAP 2000	256
12.6. Εκτέλεση ανελαστικής στατικής ανάλυσης	264
12.7. Αποτελέσματα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης	265
Βιβλιογραφικές αναφορές 12 ^{ου} Κεφαλαίου	267

Κεφάλαιο 13: Δυναμική ανελαστική ανάλυση

13.1. Δεδομένα παραδείγματος	269
13.2. Ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear time-history analysis)	269

13.3. Γεωμετρία του φορέα και σχεδίαση στοιχείων συνδέσμων (Links)	270
13.4. Ιδιότητες υλικού φορέα	274
13.5. Ιδιότητες πλαστικών αρθρώσεων	275
13.6. Ορισμός ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης στο SAP 2000	279
13.7. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων	289
Βιβλιογραφικές αναφορές 13 ^{ου} Κεφαλαίου	294

Παράρτημα

Παράρτημα Α: Τοπικοί άξονες συντεταγμένων στο SAP 2000	295
A.1. Τοπικό σύστημα αξόνων σε κόμβους	296
A.2. Τοπικό σύστημα αξόνων σε γραμμικά στοιχεία	297
A.3. Εισαγωγή δεδομένων γραμμικών στοιχείων και κόμβων	298
A.4. Ανάγνωση αποτελεσμάτων γραμμικών στοιχείων και κόμβων	300
A.5. Τοπικό σύστημα αξόνων σε επιφανειακά στοιχεία	301
Παράρτημα Β: Συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων στοιχείων	303
B.1. Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων σε ρηγματωμένες διατομές Ο/Σ	304
B.2. Παραδοχές επίλυσης επίπεδου φορέα οπλισμένου σκυροδέματος δίχως τη χρήση υπολογιστή (προσέγγιση αποτελεσμάτων επίλυσης με το χέρι)	305
Παράρτημα Γ: Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	307
Βιβλιογραφικές αναφορές Παραρτήματος	310

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια

ATC	Applied Technology Council
CSI	Computers and Structures Inc.
EC	Eurocode (Ευρωκώδικας)
FEMA	Federal Emergency Management Agency
PGA	Peak Ground Acceleration
SI	Le Système International d'unités
ΕΑΚ	Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
ΕΚΩΣ	Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος
Η/Υ	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
ΚΑΝ.ΕΠΕ.	Κανονισμός Επεμβάσεων
ΚΤΧ	Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων
ΟΑΣΠ	Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας

Πρόλογος

Το παρόν σύγγραμμα αφορά την εισαγωγή στη χρήση προγραμμάτων λογισμικού για προσομοίωση και ανάλυση κατασκευών και απευθύνεται σε προπτυχιακούς φοιτητές Τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών ΤΕΙ και Πολυτεχνείων, όπως και σε μηχανικούς που ξεκινούν την ενασχόληση τους με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Στόχος του συγγράμματος είναι η εύληπτη μεταφορά γνώσεων, μέσω παραδειγμάτων σε επιλεγμένο λογισμικό, που σχετίζονται με:

α) Θέματα προσομοίωσης κατασκευών και συνήθεις προσεγγίσεις και τεχνικές που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

β) Θέματα που αφορούν την εφαρμογή των Κανονισμών και κυρίως των Ευρωκωδίκων, με παράλληλη αναφορά στην προηγούμενη γενιά των Ελληνικών Κανονισμών, όπως και άλλων σύγχρονων Κανονιστικών διατάξεων.

Ο μεγάλος αριθμός των αντικειμένων που σχετίζονται με την ορθή διαδικασία προσομοίωσης ενός φορέα και την εφαρμογή των σχετικών Κανονισμών καθιστά δυσχερή τη διαδικασία κατανόησης για σημαντικό αριθμό φοιτητών. Η θεωρητική διδασκαλία των μεθόδων προσομοίωσης δεν οδηγεί αυτόματα στην ικανοποιητική αφομοίωση των σχετικών γνώσεων και στην ορθή εφαρμογή τους, δίχως την ύπαρξη συγκεκριμένων παραδειγμάτων. Στο παρόν σύγγραμμα έχει επιλεγεί η παρουσίαση των παραπάνω μαθησιακών αντικειμένων μέσω στοχευμένων και κατάλληλα δομημένων παραδειγμάτων εφαρμογής. Κατά την παρουσίαση του κάθε παραδείγματος δίνεται η δυνατότητα στον αναγνώστη, μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης και ανάλυσης στο εξειδικευμένο πρόγραμμα λογισμικού που επιλέχθηκε, να έρθει σε επαφή με τις απαιτούμενες γνώσεις που αφορούν θέματα προσομοίωσης και κανονιστικών διατάξεων. Για την αποτελεσματικότερη κατανόηση και αφομοίωση των παραπάνω γνώσεων, λαμβάνεται μέριμνα ώστε τα επιμέρους μαθησιακά αντικείμενα να αναπτύσσονται σταδιακά, κατά την παρουσίαση μιας σειράς παραδειγμάτων αυξημένης πολυπλοκότητας.

Το λογισμικό προσομοίωσης και ανάλυσης που επιλέχθηκε για την παρουσίαση των παραδειγμάτων του συγγράμματος είναι το SAP 2000 (Computers & Structures, Inc.). Πρόκειται για ένα πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα διεθνώς και αναγνωρίζεται για τις δυνατότητες παραμετροποίησης που προσφέρει. Βασικό χαρακτηριστικό, που αποτέλεσε και σημαντικό παράγοντα επιλογής του εν λόγω προγράμματος, είναι η εκτενής δυνατότητα παρέμβασης που παρέχει στον χρήστη, ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση για λεπτομερή προσδιορισμό των παραμέτρων της προσομοίωσης. Έτσι, γίνεται εφικτή η παρουσίαση θεμάτων που αφορούν βήμα-προς-βήμα προσδιορισμό των λεπτομερειών προσομοίωσης και των απαιτήσεων των Κανονισμών, τα οποία σε άλλα προγράμματα με διαφορετικό προσανατολισμό ενδέχεται να αποτελούν προεπιλογές «κρυμμένες» πίσω από τη γενικότερη επιλογή Κανονισμού που εφαρμόζεται σε μια μελέτη. Προφανώς το SAP 2000 δεν είναι το μοναδικό λογισμικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό, καθώς υπάρχουν και άλλα, εξίσου αξιόλογα προγράμματα, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστες εναλλακτικές επιλογές.

Ολοκληρώνοντας την ανάγνωση του συγγράμματος, ο αναγνώστης θα είναι σε θέση να προσομοιώσει και να επιλύσει απλούς και σύνθετους κτιριακούς φορείς, εφαρμόζοντας τις κατάλληλες τεχνικές σύμφωνα με τους ισχύοντες Κανονισμούς. Παράλληλα, μέσω της προτεινόμενης βιβλιογραφίας, θα έχει τη δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης σε ειδικά θέματα ελαστικών και ανελαστικών, στατικών ή δυναμικών αναλύσεων, οι οποίες αφορούν κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού.

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός αξιολογών συγγραμμάτων που αντιμετωπίζουν το θέμα της αριθμητικής προσομοίωσης κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στα συγγράμματα αυτά αναπτύσσεται ικανοποιητικά η θεωρητική υπόσταση της μεθοδολογίας, ενώ δίνονται συχνά και αριθμητικές εφαρμογές της μεθόδου σε απλούς φορείς. Κάποια μάλιστα από τα συγγράμματα χρησιμοποιούν αποτελέσματα από στοχευμένες αναλύσεις με προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να μελετήσουν και να παρουσιάσουν την επιρροή διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση ενός φορέα.

Είναι γεγονός πως η θεωρητική εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αφορά έναν σημαντικό αριθμό θεμάτων που πρέπει να αναπτυχθούν, περιλαμβάνοντας γνώσεις που σχετίζονται με την αντοχή υλικών, τη στατική επίλυση φορέων με έμφαση στη μητρική στατική, τη δυναμική των κατασκευών, τον αντισεισμικό σχεδιασμό κτλ. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής, απαιτούνται επίσης γνώσεις που σχετίζονται με τον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβα, φέρουσα τοιχοποιία κοκ. Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική προσομοίωση της θεμελίωσης χρειάζονται γνώσεις εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ώστε να ληφθεί υπόψη η ενδοσιμότητα του εδάφους στις θέσεις στήριξης. Παράλληλα, καθώς η προσομοίωση αφορά κατασκευές η μελέτη των οποίων ρυθμίζεται από συγκεκριμένους Κανονισμούς, απαιτούνται πρόσθετες γνώσεις αναφορικά με τις ισχύουσες κανονιστικές διατάξεις αλλά και τις τρέχουσες επιστημονικές εξελίξεις.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα παραπάνω, ακόμη και στην περίπτωση απλής αναφοράς στα σχετιζόμενα θεωρητικά αντικείμενα, ο όγκος των απαιτούμενων γνώσεων που πρέπει να μεταδοθεί είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Παράλληλα, είναι γνωστή η δυσκολία αφομοίωσης μεγάλου όγκου θεωρητικών γνώσεων που αντιμετωπίζουν οι φοιτητές κατά την εισαγωγή τους σε ένα αντικείμενο, ακόμη και όταν πολλές από αυτές θεωρούνται δεδομένες από συναφή μαθήματα του προγράμματος σπουδών που παρακολουθούν. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε πηγή προβληματισμού για τους συγγραφείς, καθώς, από την 10ετή και πλέον διδακτική τους εμπειρία, αντιλήφθηκαν τις δυσκολίες που αντιμετωπίζονται κατά τη διδασκαλία αντίστοιχων μαθημάτων. Τέθηκε λοιπόν ως ζήτημα η επιλογή ενός συγγράμματος το οποίο είτε θα καλύπτει επαρκώς όλες τις σχετικές θεωρητικές παραμέτρους και γνώσεις είτε θα παρουσιάζει μόνο τα θεωρητικά στοιχεία που εμπλέκονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις προσομοίωσης, και μάλιστα με τρόπο σταδιακό και κατάλληλα δομημένο ώστε να μην «επιβαρύνουν» τον αναγνώστη.

Αποφασίστηκε το παρόν σύγγραμμα να ακολουθήσει τη δεύτερη προσέγγιση, στην οποία βασικός στόχος είναι η ευκολότερη αφομοίωση των μεταδιδόμενων γνώσεων από χρήστη που έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με ένα πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, θεωρήθηκε σκόπιμο η παρουσίαση των διαφόρων θεμάτων να γίνεται εμμέσως, κατά την προσομοίωση απλών φορέων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής εφαρμογής. Έτσι, μέσω της άμεσης εφαρμογής της θεωρητικής γνώσης ή της κανονιστικής διάταξης σε συγκεκριμένο σημείο της διαδικασίας προσομοίωσης, γίνεται ευκολότερο για τον αναγνώστη να αντιληφθεί την ουσία της μεταδιδόμενης γνώσης και ταυτόχρονα να κατανοήσει πλήρως τον τρόπο με τον οποίο αυτή γίνεται πράξη κατά τη χρήση ενός προγράμματος ανάλυσης των κατασκευών. Ως εκ τούτου, οι φορείς που επιλέγονται στα διάφορα παραδείγματα έχουν απλή γεωμετρία και σύλληψη, δίχως ιδιαίτερες απαιτήσεις, ενώ συχνά διάφορες παράμετροι δίνονται με απλοποιημένο τρόπο, ώστε το βάρος να πέφτει μόνο στα μαθησιακά αντικείμενα-στόχους του κάθε Κεφαλαίου.

Στο πλαίσιο της παραπάνω προσέγγισης επιλέχθηκε ένα λογισμικό (SAP 2000 v.14) το οποίο είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο και ελεγχόμενο από τον χρήστη, με την έννοια πως το κάθε σημείο της προσομοίωσης, από το είδος του υλικού και των δομικών στοιχείων έως τον τύπο και τον τρόπο επιβολής των φορτίων, θα πρέπει να καθορισθεί με λεπτομέρεια. Με τον τρόπο αυτόν ο χρήστης ελέγχει πλήρως τις παραμέτρους του προσομοιώματος, κάτι που δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί με κάποιο λογισμικό πακέτο

αυτοματοποιημένης ανάλυσης και διαστασιολόγησης των κατασκευών. Τα τελευταία είναι ίσως περισσότερο εύχρηστα κατά την εκπόνηση μιας πλήρους στατικής μελέτης και την παραγωγή των αντίστοιχων κατασκευαστικών σχεδίων, έχουν όμως πλήθος «κρυφών» προεπιλογών βάσει των Κανονισμών ανάλυσης που επιλέγονται, ώστε να μην αποτελούν κατάλληλο εργαλείο για την εισαγωγή ενός νέου χρήστη σε θέματα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Στη συνέχεια του συγγράμματος θα παρουσιαστούν κάποια παραδείγματα προσομοίωσης φορέων, εστιάζοντας στη μετάδοση προς τον αναγνώστη των απαιτούμενων γνώσεων που αφορούν είτε κανονιστικές απαιτήσεις είτε τεχνικές προσομοίωσης. Επιλέγεται η παρουσίαση αρχικά απλών φορέων, με μειωμένες απαιτήσεις προσομοίωσης και ανάλυσης, και στη συνέχεια γίνεται η μετάβαση σε πιο σύνθετους φορείς. Παράλληλα, δίνονται με αναλυτικό τρόπο όλες οι εντολές στα διάφορα στάδια προσομοίωσης, ώστε να είναι εύκολο για τον φοιτητή ή τον νέο μελετητή να έρθει σε επαφή με το αντικείμενο της προσομοίωσης ακολουθώντας απλώς τις οδηγίες που δίδονται στο σύγγραμμα, δίχως την απαίτηση φυσικής παρουσίας σε κάποια αίθουσα διδασκαλίας. Για τον λόγο αυτόν, η ύπαρξη πολλών σχημάτων/εικόνων που αφορούν τη χρήση των διάφορων εντολών και εργαλείων του λογισμικού θεωρείται επιβεβλημένη στα παραδείγματα που παρουσιάζονται στα πρώτα Κεφάλαια, ώστε να επιτευχθεί άμεσα η εξοικείωση του αναγνώστη με το περιβάλλον του προγράμματος. Στα επόμενα Κεφάλαια ο τρόπος παρουσίασης διαφοροποιείται, δίνοντας μεγαλύτερο βάρος στα νέα μαθησιακά αντικείμενα που αναπτύσσονται. Με τον τρόπο αυτόν γίνεται μια ομαλή και σταδιακή παρουσίαση του μεγάλου αριθμού των επιμέρους θεμάτων που αφορούν την προσομοίωση και ανάλυση κατασκευών σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, διευκολύνοντας την κατανόηση τους από τον αναγνώστη μέσω των αναλυτικών παραδειγμάτων εφαρμογής.

Κατά τη συγγραφή των επιμέρους Κεφαλαίων, επιλέγεται η παρακάτω κωδικοποίηση γραμματοσειράς:

Χρήση πλάγιας γραφής με μπλε χρώμα γραμματοσειράς για εντολές ή εργαλεία/menu του προγράμματος

Χρήση πλάγιας γραφής με κόκκινο χρώμα γραμματοσειράς για αναφορές σε Κανονισμούς

Χρήση πλάγιας γραφής με πράσινο χρώμα γραμματοσειράς για τεχνικούς όρους ή επιλογές προσομοίωσης

Στην ηλεκτρονική έκδοση του προγράμματος, όταν κάποια από τα παραπάνω στυλ (styles) μορφοποίησης εμφανίζονται υπογραμμισμένα ή με σχετική σήμανση, θα διατίθεται αναδυόμενο κείμενο με περισσότερες πληροφορίες. Η συγκεκριμένη επιλογή, της απόκρυψης πληροφοριών στην προεπιλεγμένη μορφή εμφάνισης του ηλεκτρονικού κειμένου, εξυπηρετεί και έναν από τους στόχους του συγγράμματος που είναι η σταδιακή «αποκάλυψη» πρόσθετων θεωρητικών γνώσεων στον αναγνώστη. Έτσι, γίνεται δυνατή μια πρώτη, πιο πρακτική επαφή του αναγνώστη με το αντικείμενο προσομοίωσης του κάθε Κεφαλαίου, ενώ η εμφάνιση περισσότερων πληροφοριών γίνεται με επιλογή από τον ίδιο του αντικειμένου στο οποίο θέλει να εμβαθύνει κάθε φορά.

Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων – Βασικές έννοιες

Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία της χρήσης προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων και οι βασικές απαιτούμενες έννοιες. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: τύποι πεπερασμένων στοιχείων, γεωμετρία φορέα, ιδιότητες υλικών, ιδιότητες διατομών, επιβαλλόμενα φορτία, ανάλυση φορέα και έλεγχος αποτελεσμάτων.

Προαπαιτούμενη γνώση

Στο εισαγωγικό Κεφάλαιο απαιτούνται γενικές γνώσεις μηχανικής, αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων.

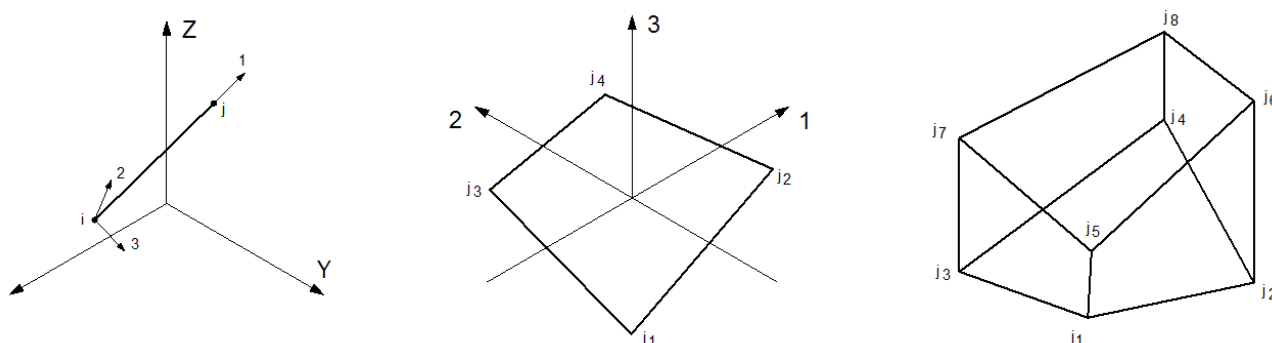
1.1. Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Η αριθμητική προσομοίωση φυσικών φαινομένων και διαδικασιών μπορεί να γίνει με χρήση κάποιων υποθέσεων αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας της κάθε διαδικασίας και την υιοθέτηση μιας σειράς νόμων που διέπουν το πρόβλημα και αναπαράγονται με έναν μεγάλο αριθμό σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων (Reddy, 2006). Προκύπτει ότι η επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας απαιτεί σημαντική υπολογιστική δυνατότητα και υπολογιστικό κόστος. Η χρήση αριθμητικών μεθόδων και ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυση των διάφορων μαθηματικών μοντέλων συνιστούν την αριθμητική προσομοίωση ενός φαινομένου. Η χρήση προγραμμάτων αριθμητικής προσομοίωσης, με ιδιαίτερη αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που αφορά την αναπαράσταση μιας περιοχής ως ένα σύνολο διακριτών υποπεριοχών, είναι πλέον ευρύτατα διαδεδομένη, λόγω και της συνεχούς εξέλιξης των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες και αποτελεί τη συνήθη πρακτική για την ανάλυση κατασκευών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η επίσημη παρουσίαση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποδίδεται στους Turner, Clough, Martin and Top (1956) και τους Argyris and Kelsey (1960), ενώ ο όρος «πεπερασμένα στοιχεία» αποδίδεται στον Clough (1960). Η περιγραφή της θεωρητικής λειτουργίας της μεθόδου δίνεται από μεγάλο αριθμό συγγραμμάτων στη διεθνή βιβλιογραφία (ενδεικτικά Bathe, 1996· Cook, Malkus, & Plesha, 1989· Hitchings, 1992· Huebner, Dewhirst, Smit, & Byrom, 2001). Μια πιο πρακτική προσέγγιση προγραμμάτων ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, με εφαρμογές για προχωρημένους χρήστες, δίνεται από τους Σέξτο και Κατσάνο (2005), ενώ χρήση αποτελεσμάτων ανάλυσης συγκεκριμένων αριθμητικών παραδειγμάτων για τη διευκόλυνση της κατανόησης των απαιτούμενων διαδικασιών γίνεται από τους Αβραμίδη, Αθανατοπούλου, Μορφίδη και Σέξτο (2011).

Για την εφαρμοσμένη προσομοίωση ενός στατικού ή δυναμικού προβλήματος σε κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και την επίλυσή του, απαιτείται ο καθορισμός μιας σειράς παραμέτρων. Το πλήθος και η λεπτομέρεια των δεδομένων που απαιτούνται ποικίλουν από πρόβλημα σε πρόβλημα, ανάλογα με την πολυπλοκότητά του και το είδος της επίλυσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, τα δεδομένα αυτά καλύπτουν ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, από το απλούστερο έως το πολυπλοκότερο. Μια ενδεικτική παρουσίαση των διαφορετικών παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν στην περίπτωση επίλυσης ενός φορέα με χρήση προγράμματος υπολογιστή, περιλαμβάνει τα αντικείμενα των παρακάτω παραγράφων.

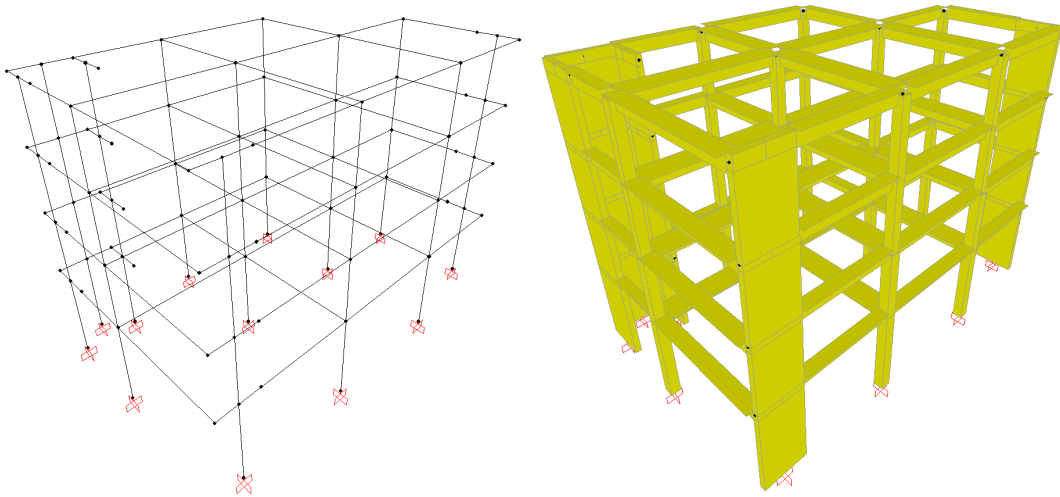
1.2. Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Η βασική διάκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων αφορά τις διαστάσεις στις οποίες αυτά αναπτύσσονται. Ο απλούστερος τύπος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι τα γραμμικά στοιχεία, ακολουθούν τα επιφανειακά στοιχεία, ενώ περισσότερο σύνθετα είναι τα χωρικά στοιχεία. Η ακριβής γεωμετρία, ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου, οι ελευθερίες κίνησης σε κάθε κόμβο, αλλά και η γενικότερη συμπεριφορά των πεπερασμένων στοιχείων ποικίλουν ανάλογα με τις επιλογές που προσφέρει το κάθε λογισμικό. Η θεωρητική προσέγγιση της λειτουργίας διαφόρων τύπων στοιχείων μπορεί να βρεθεί σε μεγάλο αριθμό συγγραμμάτων (ενδεικτικά Cook, 1995· Γκότσης, 2008· Τσαμασφύρος & Θεοτόκογλου, 2005). Μια ενδεικτική απεικόνιση των τύπων πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα *SAP 2000* (Computers and Structures Inc., 2010) δίνεται στο Σχήμα 1.1.

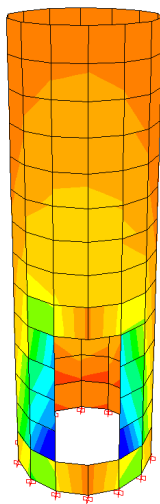


Σχήμα 1.1 Γραμμικό, επιφανειακό και χωρικό στοιχείο στο λογισμικό *SAP 2000*.

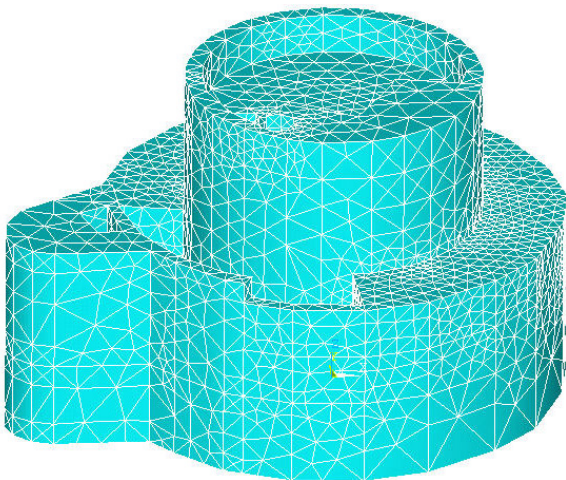
Κατά κανόνα, η προσομοίωση ενός κτιριακού φορέα με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα ή χάλυβα μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη χρήση γραμμικών μόνο στοιχείων (Σχήμα 1.2). Τα επιφανειακά στοιχεία απαιτούνται στις περιπτώσεις φορέων φέρουσας τοιχοποιίας, λιθοδομής, τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος ή πλακών με οπές (ανοίγματα), καταστρώματος γεφυρών και γενικότερα φερόντων στοιχείων με δυο σημαντικές διαστάσεις (Σχήμα 1.3). Η χρήση χωρικών στοιχείων είναι περισσότερο δυσχερής και υιοθετείται μόνο στην περίπτωση που τα γραμμικά και τα επιφανειακά στοιχεία δεν μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του φέροντος οργανισμού μιας κατασκευής, όταν δηλαδή αποτελείται από φέροντα στοιχεία με τρεις σημαντικές διαστάσεις (Σχήμα 1.4). Ασφαλώς είναι δυνατή η συνδυαστική χρήση διαφορετικών τύπων στοιχείων, για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση δομημάτων ή υποφορέων, όταν αυτό θεωρηθεί σκόπιμο από τον μελετητή.



Σχήμα 1.2 Παράδειγμα προσομοιώματος κτιριακού φορέα με γραμμικά στοιχεία (σχετική εφαρμογή από Κίρτας & Παναγόπουλος, 2013).



Σχήμα 1.3 Παράδειγμα προσομοιώματος πέτρινου φάρου με επιφανειακά στοιχεία στο πρόγραμμα SAP 2000 (πλήρης μελέτη μπορεί να βρεθεί στους Πιτιλάκης, Κίρτας, & Σέξτος, 2003).



Σχήμα 1.4 Παράδειγμα προσομοιώματος πύργου με χωρικά στοιχεία στο πρόγραμμα ANSYS (πλήρης μελέτη μπορεί να βρεθεί στους Πιτιλάκης και συνεργάτες, 2003).

1.3. Γεωμετρία και στηρίξεις του φορέα

Το πρώτο συνήθως βήμα, κατά την εισαγωγή των δεδομένων του φορέα σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του. Ο όρος γεωμετρία αναφέρεται στον αριθμό των ορόφων του φορέα, στον αριθμό και τα μήκη των ανοιγμάτων, στις σημαντικές διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν (μήκος στα γραμμικά δομικά στοιχεία, δυο διαστάσεις στα επιφανειακά στοιχεία κτλ) και τη θέση τους στον φέροντα οργανισμό. Συχνά ο καθορισμός της γεωμετρίας ενός φορέα σε ένα λογισμικό διευκολύνεται με τη χρήση έτοιμων «πρότυπων» φορέων παρόμοιων χαρακτηριστικών ή τον καθορισμό καννάβου βοηθητικών γραμμών για την ακριβή τοποθέτηση των δομικών στοιχείων.

Στο σημείο αυτό μπορούν να καθοριστούν και οι συνθήκες στήριξης του φορέα, δεσμεύοντας ή απελευθερώνοντας τις κατάλληλες ελευθερίες κίνησης στους εμπλεκόμενους κόμβους. Με αντίστοιχο τρόπο μπορούν να καθοριστούν και τυχόν ελευθερίες κίνησης εντός του φέροντος οργανισμού, όπως εσωτερικές αρθρώσεις σε διάφορες θέσεις κτλ. Εφόσον επιλέγεται να προσομοιωθεί η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης, δίνεται δυνατότητα κατάλληλου ορισμού ελατηριακών σταθερών στη βάση του φορέα. Οι παραπάνω ενέργειες, σε προγράμματα ανάλυσης όμοιου τύπου με το πρόγραμμα *SAP 2000* που χρησιμοποιείται στο παρόν, θα πρέπει να γίνουν βήμα-βήμα από τον χρήστη, όπως περιγράφεται αναλυτικά στα παραδείγματα εφαρμογής που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του συγγράμματος. Αντίθετα, στα περισσότερα προγράμματα αυτοματοποιημένης επίλυσης φορέων για στατικές μελέτες (στατικά πακέτα), ο καθορισμός των ελευθεριών κίνησης και μια σειρά λοιπών επιλογών γίνονται με προκαθορισμένο τρόπο που δεν είναι άμεσα ορατός στον χρήστη.

1.4. Ιδιότητες υλικών

Στα πρώτα στάδια της προσομοίωσης καθορίζονται τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο φορέας. Για τον καθορισμό του κάθε υλικού οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται είναι:

- μέτρο ελαστικότητας υλικού,
- πυκνότητα υλικού από την οποία μπορεί το πρόγραμμα να καθορίσει τη μάζα των δομικών στοιχείων του φορέα,
- ειδικό βάρος υλικού (λαμβάνεται ίσο με την πυκνότητα επί την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας) από το οποίο μπορεί το πρόγραμμα να καθορίσει το βάρος των δομικών στοιχείων του φορέα,
- συντελεστής Poisson,
- συντελεστής θερμικής διαστολής (ενεργοποιείται μόνο σε περίπτωση που δίνονται θερμοκρασιακές μεταβολές ως φορτία).

Στα παραδείγματα εφαρμογής που παρουσιάζονται στο παρόν σύγγραμμα, επιλέγεται σε πολλές περιπτώσεις να δοθεί μηδενικό ίδιο βάρος στα διάφορα δομικά στοιχεία της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει καθώς, λόγω του εκπαιδευτικού χαρακτήρα του συγγράμματος, κρίνεται σκόπιμο τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη να προέρχονται αποκλειστικά από φορτία που έχουν τεθεί ως εξωτερικά επιβαλλόμενα από τον χρήστη και όχι από συνδυασμό τους με τα ίδια βάρη της κατασκευής. Τα τελευταία είναι συχνά «κρυφά» φορτία, καθώς υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα κατά την εισαγωγή των δεδομένων και επιβάλλονται στον φορέα δίχως να είναι ορατά, οπότε ενδέχεται να προκαλέσουν σύγχυση σε αρχάριο χρήστη. Η επίτευξη μηδενικών τιμών για το ίδιο βάρος και τη μάζα, ώστε να μην υπολογιστούν αυτόματα από το πρόγραμμα, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, κάποιιοι από τους οποίους θα παρουσιαστούν στα παραδείγματα του συγγράμματος.

1.5. Ορισμός διατομών

Επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι συνήθως ο καθορισμός των διατομών των διαφόρων στοιχείων (γραμμικών, επιφανειακών ή χωρικών) που αποτελούν τον φορέα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή

της γεωμετρίας της κάθε διατομής (διαστάσεις και σχήμα διατομής) από την οποία προκύπτουν τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της (εμβαδόν, ροπές αδρανείας κτλ).

Οι πληροφορίες που πρέπει να δοθούν σε κάθε διατομή σχετίζονται με τον τύπο του δομικού στοιχείου. Έτσι, σε γραμμικά στοιχεία, όπου η βασική διάσταση (μήκος ή ύψος του στοιχείου) έχει ήδη δοθεί κατά τη μόρφωση του φορέα, θα πρέπει σε επίπεδο διατομής να δοθούν το σχήμα και οι διαστάσεις σε μια κάθετη προς την μεγάλη διάσταση τομή (π.χ. ορθογωνικό σχήμα και διαστάσεις για απλά υποστυλώματα, πλακοδοκός για δοκούς με συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας κτλ). Στα επιφανειακά στοιχεία αντίστοιχα, κατά τον καθορισμό της γεωμετρίας του φορέα έχουν ήδη οριστεί οι δυο βασικές τους διαστάσεις. Συνεπώς, κατά τον ορισμό των στοιχείων της διατομής τους θα πρέπει να δοθεί η τρίτη διάσταση, δηλαδή το πάχος των συγκεκριμένων επιφανειακών στοιχείων. Σε κάποια προγράμματα ανάλυσης κατασκευών, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δομικό στοιχείο επιλέγεται στο σημείο καθορισμού των γεωμετρικών ιδιοτήτων της διατομής, ως ένα από τα υλικά που δημιουργήθηκαν από τον χρήστη σε προηγούμενο βήμα.

1.6. Φορτία

Ένα σημαντικό στάδιο κατά την προσομοίωση είναι ο καθορισμός των επιβαλλόμενων φορτίων στον φορέα. Τα φορτία θα πρέπει να χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους, όπως μόνιμα, κινητά, σεισμικά, θερμοκρασιακές μεταβολές κτλ. Στη συνέχεια ομαδοποιούνται σε συνδυασμούς φορτίων, προκειμένου να αποδώσουν την εντατική κατάσταση του φορέα σε κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. συνδυασμός αστοχίας για κατακόρυφα φορτία, σεισμικός συνδυασμός φορτίων κτλ). Ο τρόπος επιβολής των φορτίων της κάθε κατηγορίας, όπως και οι μεταξύ τους συνδυασμοί, συνήθως προδιαγράφονται αναλυτικά στους Κανονισμούς, ειδικά όσον αφορά ειδικές κατηγορίες φόρτισης όπως η σεισμική καταπόνηση του φορέα.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης και τον τύπο της επιβαλλόμενης φόρτισης, η απλούστερη περίπτωση ανάλυσης είναι η γραμμική ελαστική ανάλυση υπό στατική φόρτιση, ενώ σε περιπτώσεις συνήθως συνδεδεμένες με σεισμικά φορτία συχνά απαιτείται δυναμική φασματική ανάλυση, πάλι όμως στη γραμμική ελαστική περιοχή συμπεριφοράς των υλικών και των δομικών στοιχείων του φορέα. Οι προηγούμενοι τύποι ανάλυσης καλύπτουν σε σημαντικό βαθμό τις σύγχρονες κανονιστικές απαιτήσεις για τη μελέτη κτιριακών έργων.

Πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις μελέτης αφορούν την ελαστική ανάλυση υπό δυναμικά μεταβαλλόμενη φόρτιση, αλλά και την ανελαστική ανάλυση υπό στατικά ή δυναμικά φορτία. Στα τελευταία κεφάλαια του συγγράμματος γίνεται μια παρουσίαση και των συγκεκριμένων, πιο σύνθετων, τύπων ανάλυσης, περισσότερο για να χρησιμεύσει ως εισαγωγή για τους χρήστες που σκοπεύουν να εμβαθύνουν σε αντίστοιχα αντικείμενα μελέτης.

1.7. Πρόσθετα χαρακτηριστικά φορέα

Εκτός από τις παραπάνω βασικές κατηγορίες δεδομένων, κατά την προσομοίωση ενός κτιριακού φορέα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κατασκευής που εξετάζεται, θα πρέπει να οριστούν και μια σειρά από πρόσθετα στοιχεία. Ενδεικτικά, σε φορείς με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και κατάλληλο σχήμα κάτοψης, θα πρέπει να δοθεί διαφραγματική λειτουργία στα επίπεδα των ορόφων, η οποία θα περιγράφει την ενιαία κίνηση των κόμβων σε κάθε όροφο. Επίσης, μπορούν να οριστούν άκαμπτα (ή δύσκαμπτα) άκρα στα γραμμικά στοιχεία, ώστε να ληφθεί υπόψη η σημαντική δυσκαμψία των δοκών και υποστυλωμάτων στις περιοχές των κόμβων. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα να μεταβληθούν οι βαθμοί ελευθερίας με βάση τους οποίους πραγματοποιείται η ανάλυση του προβλήματος, και να επιλεγεί π.χ. επίπεδη ανάλυση όταν το πρόβλημα αφορά απόκριση ενός πλαισίου

εντός επιπέδου. Τα παραπάνω στοιχεία σχετίζονται με τις απαιτήσεις της κάθε κατασκευής που προσομοιώνεται, αλλά και τις δυνατότητες που προσφέρονται σε κάθε πρόγραμμα ανάλυσης.

1.8. Ανάλυση φορέα και έλεγχος αποτελεσμάτων

Μετά το πέρας της εισαγωγής των δεδομένων ακολουθεί η ανάλυση του φορέα και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συχνά η επισκόπηση των αποτελεσμάτων είναι από μόνη της μια σύνθετη διαδικασία, καθώς, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αναλύσεων που συμπεριλαμβάνουν τη σεισμική απόκριση του φορέα, ο όγκος αποτελεσμάτων για το σύνολο των συνδυασμών φόρτισης είναι μεγάλος και η επεξεργασία του από τον χρήστη ιδιαίτερα απαιτητική.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 1^{ου} Κεφαλαίου

- ANSYS. (2000). *ANSYS user's manual* (Release 8.1). Houston, USA: SAS IP Inc.
- Argyris, J., & Kelsey, S. (1960). *Energy theorems and structural analysis*. London: Butterworth.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Clough, R. W. (1960). *The finite element method in plane stress analysis*. Paper presented at the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, PA.
- Computers and Structures Inc. (2010). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA: CSI.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (1989). *Concepts and applications of finite element analysis* (Third ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Cook, R. D. (1995). *Finite element modeling for stress analysis*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Hitchings, D. (Ed.). (1992). *NAFEMS – A finite element dynamics primer*. Birniehill, Glasgow: Bell and Bain Ltd.
- Huebner, K. H., Dewhurst, D. L., Smit, D. E., & Byrom, T. G. (2001). *The finite element method for engineers* (Fourth ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Reddy, J. N. (2006). *An introduction to the finite element method* (Third ed.). New York: McGraw-Hill Inc.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Top, L. J. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of Aeronautical Science*, 23(805-823).
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Γκότσης, Π. (2008). *Πεπερασμένα Στοιχεία* (2^η εκδ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Κίρτας, Ε., & Παναγόπουλος, Γ. (2013). *Σημειώσεις εργαστηρίου: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής (SAP 2000 v.14 και Master-Fespa 10 v.5.4.0.14)*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Πιτιλάκης, Κ., Κίρτας, Ε., & Σέξτος, Α. (2003). *Στατική μελέτη του δώματος του πύργου Zacosta για την επανατοποθέτηση του πέτρινου πυργίσκου του φάρου*. Θεσσαλονίκη: Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ.
- Σέξτος, Α., & Κατσάνος, Ε. (2009). *Τεχνικές προγραμματισμού και χρήση λογισμικού Η/Υ στις κατασκευές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Τσαμασφύρος, Γ., & Θεοτόκογλου, Ε. (2005). *Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Στατική επίλυση προβόλου

Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται, με τη βοήθεια εφαρμοσμένου παραδείγματος, τα βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες που απαιτούνται κατά την προσομοίωση ενός απλού φορέα υπό στατική φόρτιση. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: μονάδες μέτρησης, βαθμοί ελευθερίας κόμβου και φορέα, βασικές ιδιότητες υλικού, κατηγορίες δράσεων και συνδυασμοί φόρτισης, άξονες συντεταγμένων, τοπικό σύστημα αξόνων σε κόμβους.

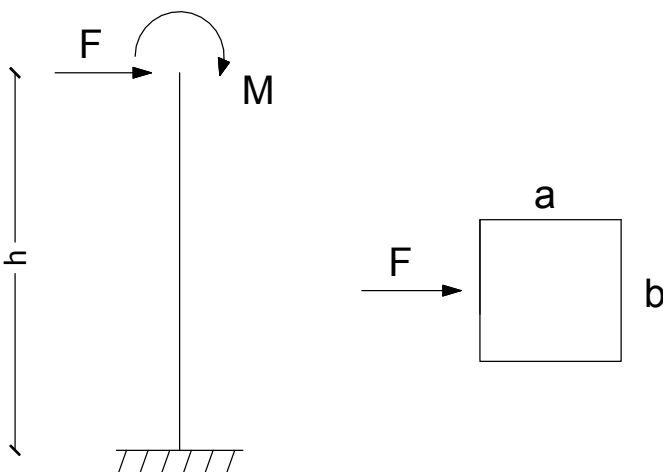
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων.

2.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση στο επίπεδο του προβόλου που περιγράφεται στο Σχήμα 2.1 και ο υπολογισμός των διαγραμμάτων ροπών, τεμνουσών και αξονικών, όπως και της μετακίνησης του κόμβου στην κορυφή του προβόλου, για τις παρακάτω καταστάσεις φόρτισης:

- για ξεχωριστή δράση της ροπής M και της δύναμης F ,
- για συνδυασμένη δράση των δυο φορτίων.



Σχήμα 2.1 Πρόβολος υπό στατική φόρτιση και σκαρίφημα διατομής προβόλου.

Δίνονται τα παρακάτω στοιχεία:

- Δύναμη $F=100\text{kN}$ και ροπή $M=80\text{kNm}$.
- Ύψος προβόλου $h=4\text{m}$ και διαστάσεις διατομής $a=b=30\text{cm}$.
- Υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7 \text{ kPa}$, λόγο Poisson=0.2 το οποίο θα ληφθεί αβαρές με μηδενική πυκνότητα.

2.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα

Στις περισσότερες περιπτώσεις προγραμμάτων στατικής ανάλυσης φορέων, ο καθορισμός της γεωμετρίας του φορέα διευκολύνεται με τη χρήση είτε καννάβου βοηθητικών γραμμών είτε έτοιμων πρότυπων φορέων από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος.

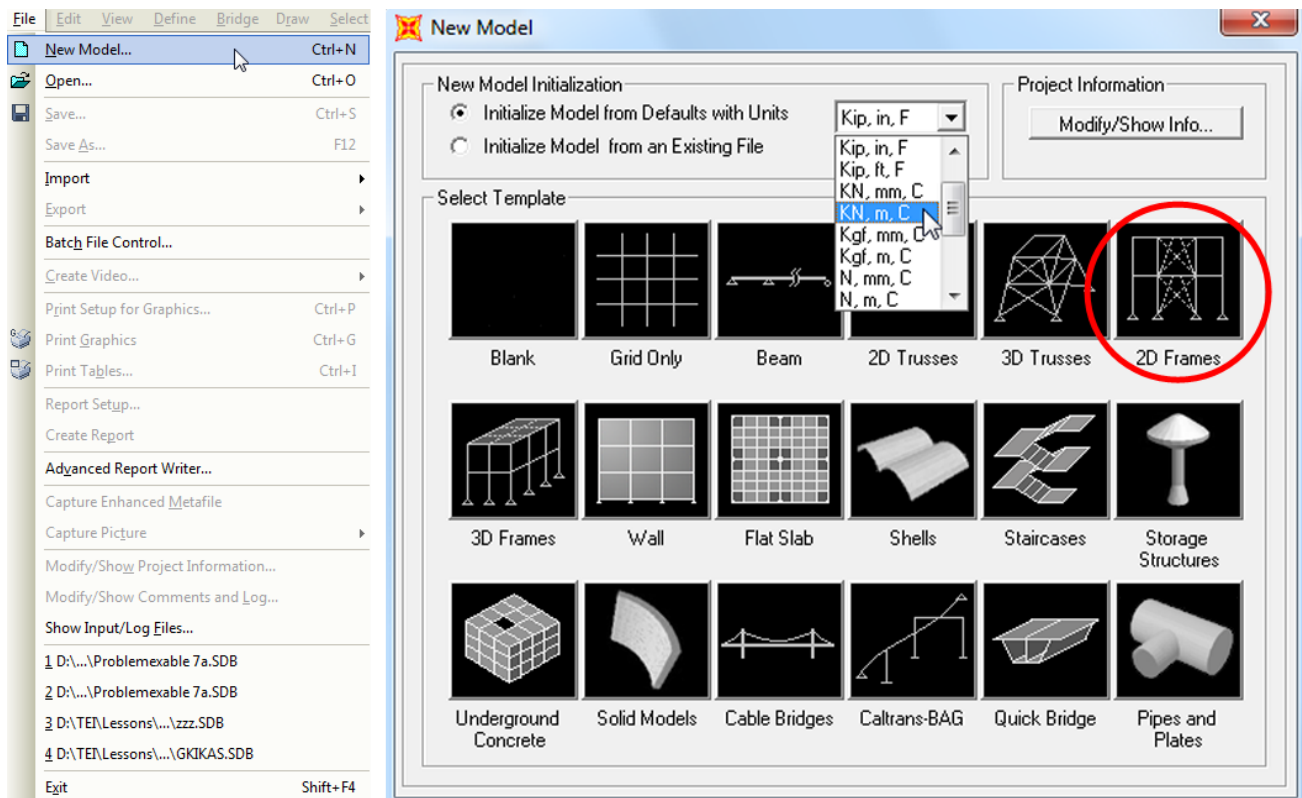
Στην περίπτωση του προγράμματος *SAP 2000* θα χρησιμοποιηθεί κάποιος έτοιμος φορέας με τυπολογία παρόμοια με αυτή του παραδείγματος. Κατά το άνοιγμα του προγράμματος εμφανίζεται μια εικόνα εισαγωγής στο λογισμικό, η οποία αναφέρει την έκδοσή του και κάποιες επιπλέον πληροφορίες, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται ένα παράθυρο με χρήσιμες συμβουλές (*Tips*) που μπορεί να διευκολύνουν τον χρήστη σε διάφορα στάδια της προσομοίωσης. Η μετάβαση σε επόμενο βήμα πραγματοποιείται κατά σειρά με *Next* και *OK*, οπότε εμφανίζεται το βασικό *menu* του προγράμματος. Ο ορισμός νέου προβλήματος γίνεται από την εντολή *File → New Model* που οδηγεί στην εικόνα του Σχήματος 2.2.

Μονάδες μέτρησης (units)

Πριν τον καθορισμό της γεωμετρίας του φορέα είναι βασικό να οριστούν οι μονάδες μέτρησης (units) που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εισαγωγή των δεδομένων. Οι μονάδες μέτρησης συνήθως επιλέγονται στην αρχή της εισαγωγής των δεδομένων σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα εισαχθούν τα δεδομένα στη συνέχεια. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η επιλογή λανθασμένων μονάδων θα έχει ως αποτέλεσμα λανθασμένες τιμές δεδομένων στο αρχείο, ακόμη και αν ο χρήστης επαναφέρει τις σωστές μονάδες σε επόμενο στάδιο της προσομοίωσης.

Οι μονάδες που έχουν επικρατήσει στις περισσότερες χώρες, εκτός των Αγγλοσαξονικών, είναι αυτές του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων SI (Le Système International d'unités). Οι μονάδες βασικών μεγεθών, που αρκούν για την προσομοίωση μιας κατασκευής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, φαίνονται στο *menu* επιλογής μονάδων του *SAP 2000* στο Σχήμα 2.2. Εφόσον επιλεγούν το *kN* ως μονάδα δύναμης και το *m* ως μονάδα μήκους, οι μονάδες των υπόλοιπων μεγεθών μπορούν εμμέσως να προσδιοριστούν από τη συσχέτιση των δυο, λαμβάνοντας υπόψη πως η μονάδα του χρόνου θεωρείται το δευτερόλεπτο (*s*). Επισημαίνεται πως το τελευταίο σύμβολο (*C: Celsius*) αντιστοιχεί σε μονάδες θερμοκρασίας. Παρατηρείται πως, πλην του μήκους, οι μονάδες των υπόλοιπων μεγεθών δεν αποτελούν τις βασικές μονάδες του συστήματος SI, είναι όμως κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να υπάρχει η μέγιστη συμβατότητα με τους ισχύοντες Κανονισμούς και την τρέχουσα πρακτική και να διευκολύνουν τον χρήστη κατά την εισαγωγή των δεδομένων. Ενδεικτικά προκύπτουν οι μονάδες των υπόλοιπων μεγεθών που ενδιαφέρουν ως:

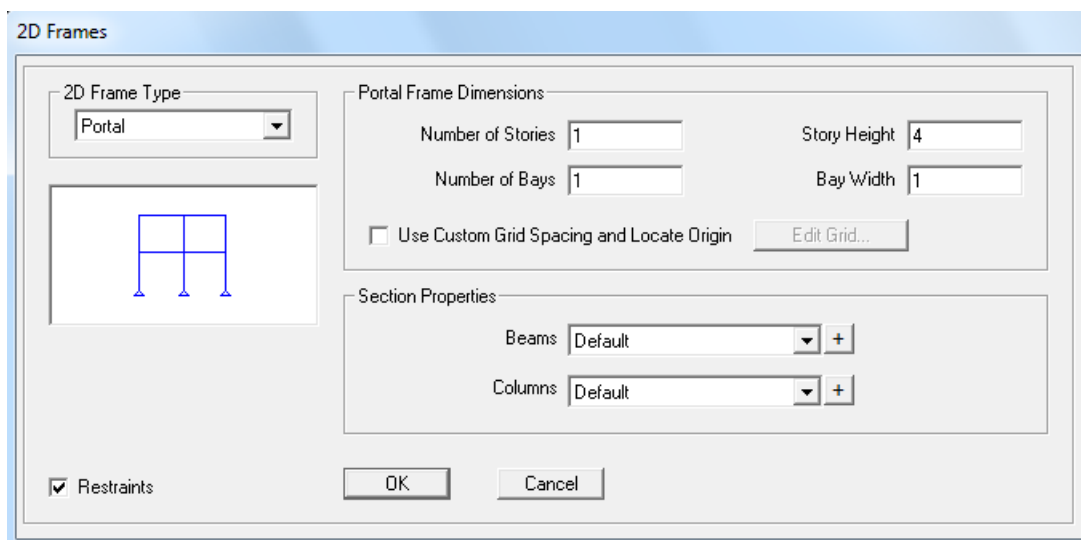
- εμβαδόν περιοχής σε m^2 και όγκος σε m^3 ,
- τάσεις και μέτρο ελαστικότητας σε kN/m^2 ,
- ειδικό βάρος σε kN/m^3 ,
- ταχύτητα σε m/s και επιτάχυνση σε m/s^2 ,
- μάζα σε tn , κτλ.



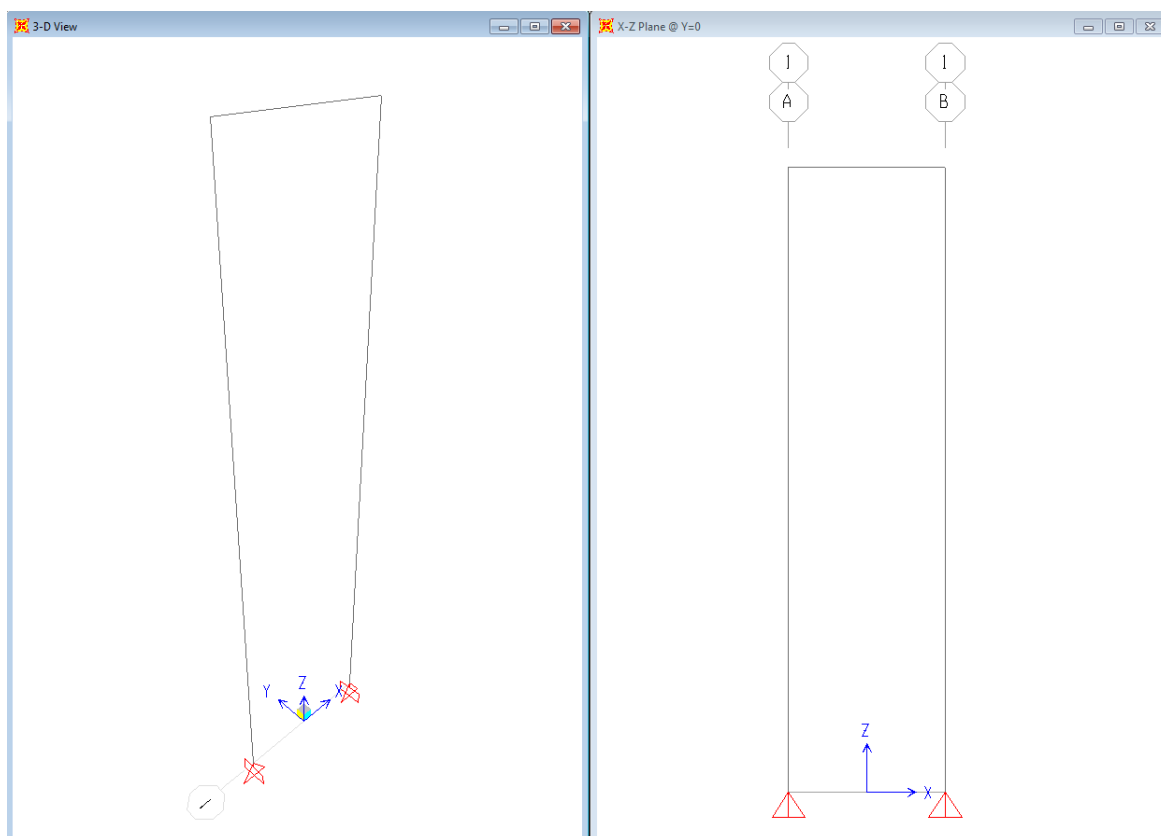
Σχήμα 2.2 Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος.

Για τον καθορισμό της γεωμετρίας θα πρέπει να επιλεγεί ο φορέας του Σχήματος 2.2 που προσεγγίζει περισσότερο την τυπολογία του φορέα του παραδείγματος. Παρατηρείται πως δεν υπάρχει αντίστοιχη μορφή φορέα-προβόλου, συνεπώς επιλέγεται ο αμέσως συνθετότερος φορέας που αντιστοιχεί σε επίπεδο πλαίσιο (*2D Frames*), όπως επισημαίνεται με κύκλο στο εν λόγω σχήμα. Με την επιλογή του συγκεκριμένου εικονιδίου εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 2.3, όπου θα πρέπει να δοθούν τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία του πλαισίου. Τα απαιτούμενα στοιχεία είναι ο αριθμός ορόφων (*Number of Stories*) και το ύψος του κάθε ορόφου (*Story Height*), ο αριθμός ανοιγμάτων (*Number of Bays*) και το μήκος του κάθε ανοίγματος (*Bay Width*), όπως και η ύπαρξη στηρίξεων (*Restraints*=δέσμευση ελευθερίας κίνησης κόμβου) στον φορέα που θα δημιουργηθεί.

Καθώς στο πρόβλημα που εξετάζεται ενδιαφέρει μόνο η ύπαρξη ενός προβόλου, το θεωρούμενο μήκος ανοίγματος δεν έχει κάποια ιδιαίτερη σημασία, εφόσον στη συνέχεια θα διαγραφεί τόσο η δοκός όσο και ο δεύτερος στύλος που θα σχηματιστεί. Αφού επιλεγεί *OK*, εμφανίζεται στην οθόνη η εικόνα του Σχήματος 2.4. Στο αριστερά παράθυρο φαίνεται η τρισδιάστατη όψη του φορέα, ενώ στο δεξί η όψη στο επίπεδο *XZ*, όπως άλλωστε αναγράφεται στον τίτλο του κάθε παραθύρου. Γενικότερα ο τίτλος του κάθε παραθύρου δίνει πολύτιμες πληροφορίες για την όψη του φορέα και τα στοιχεία που εμφανίζονται σε αυτό κάθε φορά. Η ενεργοποίηση του κάθε παραθύρου γίνεται με απλό *click* εντός της επιφάνειας σχεδίασης. Για την αλλαγή της όψης του φορέα στο παράθυρο, αφού πρώτα αυτό ενεργοποιηθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο από τα εικονίδια *3-d*, *xy*, *xz*, *yz*, τα οποία βρίσκονται στην οριζόντια σειρά εργαλείων κάτω από το *menu* του προγράμματος.



Σχήμα 2.3 Καθορισμός παραμέτρων γεωμετρίας του πρότυπου φορέα.

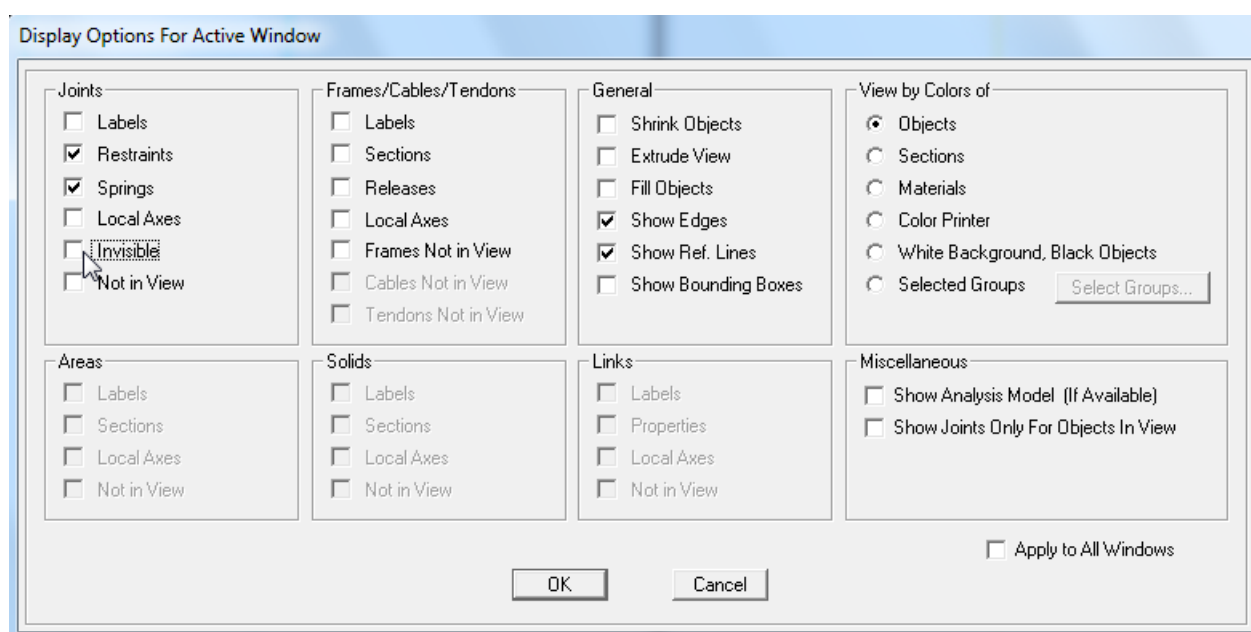


Σχήμα 2.4 Απεικόνιση επιλεγμένου φορέα στο πρόγραμμα.

Πεπερασμένα στοιχεία φορέα

Στην αρχική αυτή μορφή του φορέα διακρίνονται τα υποστυλώματα και η δοκός, τα οποία προσομοιώνονται από το πρόγραμμα με τη χρήση γραμμικών στοιχείων με κόμβους στα άκρα τους. Αυτή είναι η απλούστερη, αλλά και πιο συνηθισμένη, μορφή γραμμικών στοιχείων, η οποία είναι αρκούντως κατάλληλη για την προσομοίωση της συμπεριφοράς δομικών στοιχείων τύπου δοκού και υποστυλώματος. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους διάφορους τύπους πεπερασμένων στοιχείων και τη συμπεριφορά τους μπορούν να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. Κεφάλαιο 1 του παρόντος), ενώ μπορεί να αναζητηθούν και στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού (CSI, 2010).

Για την καλύτερη εποπτεία των πεπερασμένων στοιχείων του φορέα είναι σκόπιμο να επιλεγεί η εμφάνιση των κόμβων, κάτι που επιτυγχάνεται από την εντολή **View → Set Display Options** με αποεπιλογή του πεδίου **Invisible** στους κόμβους (**Joints**), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και στα δυο παράθυρα, καθώς οι λεπτομέρειες απεικόνισης που εμφανίζονται στο καθένα μπορούν να είναι διαφορετικές. Από την παραπάνω εντολή μπορούν να καθορισθούν γενικότερα οι πληροφορίες των στοιχείων του φορέα που εμφανίζονται στο κάθε παράθυρο. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τόσο τους κόμβους (**Joints**), τα γραμμικά (**Frames**), τα επιφανειακά (**Areas**) και τα χωρικά (**Solids**) στοιχεία, όσο και άλλες λεπτομέρειες προσομοίωσης, εκτός από την εμφάνιση των φορτίων που ρυθμίζεται διαφορετικά.

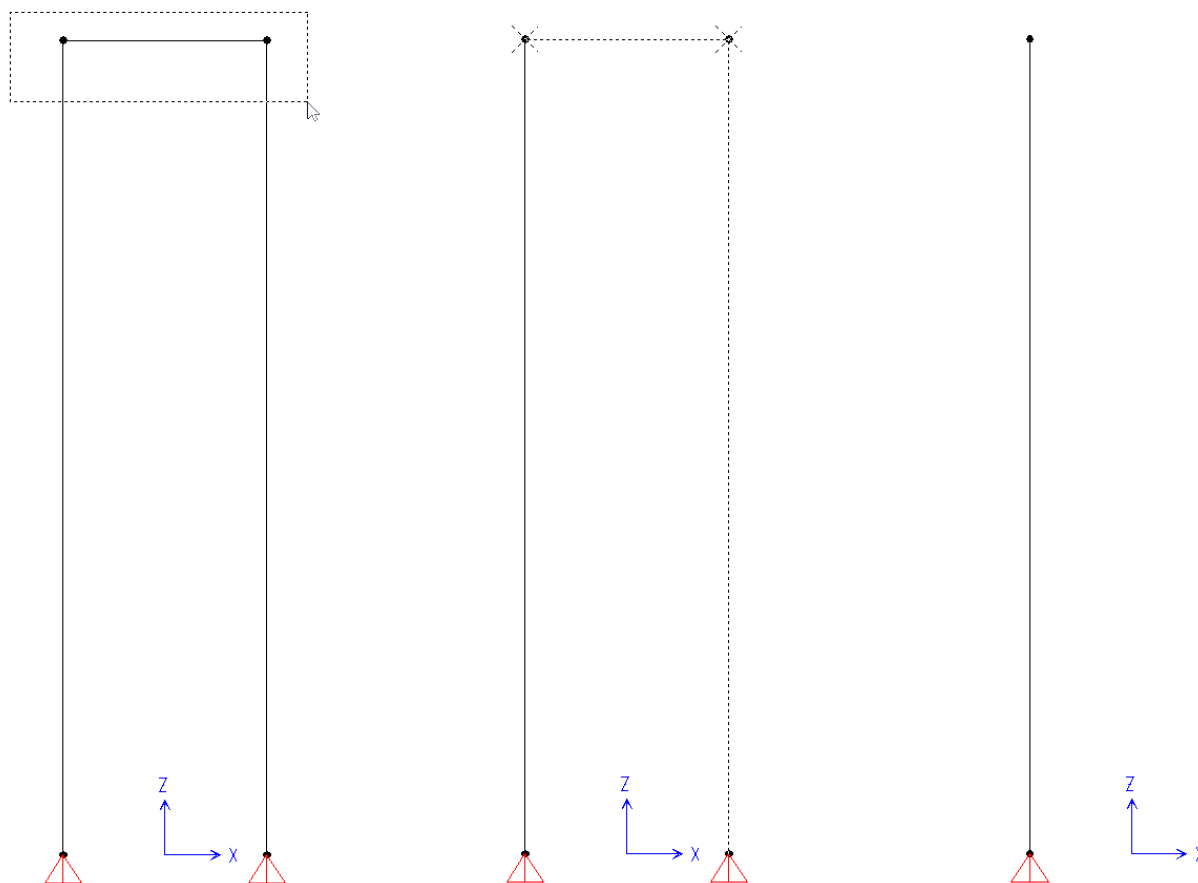


Σχήμα 2.5 Εμφάνιση κόμβων στην επιφάνεια σχεδίασης.

Προκειμένου να αποκτήσει ο φορέας την τελική του γεωμετρία, θα πρέπει να διαγραφεί η δοκός και το δεύτερο υποστύλωμα. Τα συγκεκριμένα γραμμικά στοιχεία επιλέγονται είτε με απλό **click** πάνω στη γραμμή που τα ορίζει, είτε με σχηματισμό ενός πλαισίου με τον κέρσορα γύρω από αυτά (ενδεικτικά ο δεύτερος τρόπος εμφανίζεται στο αριστερά μέρος του Σχήματος 2.6). Το κάθε επιλεγμένο στοιχείο ή κόμβος φαίνεται πλέον με διακεκομμένη γραμμή (κεντρικό μέρος Σχήματος). Εφόσον η φορά του πλαισίου που σχηματίζεται για την επιλογή κάποιου στοιχείου είναι από αριστερά προς τα δεξιά, για να επιλεγεί ένα στοιχείο θα πρέπει να περικυκλώνεται ολόκληρο. Αν το πλαίσιο επιλογής σχηματίζεται από δεξιά προς αριστερά τότε επιλέγονται όλα τα στοιχεία που αυτό τέμνει.

Για να διαγραφεί ένας κόμβος θα πρέπει να διαγραφούν ταυτόχρονα όλα τα γραμμικά στοιχεία στα οποία συμμετέχει αυτός, είτε ως κόμβος αρχής είτε ως κόμβος τέλους. Κατά συνέπεια, ο αριστερά κόμβος της δοκού στο Σχήμα 2.6 δεν θα διαγραφεί, καθώς εξακολουθεί να υπάρχει το αριστερά υποστύλωμα. Αντίθετα, ο δεξιά κόμβος διαγράφεται αυτόματα, εφόσον διαγράφεται τόσο η δοκός όσο και ο δεξιά στύλος του αρχικού πλαισίου. Τέλος, ο κόμβος της βάσης του δεξιά υποστυλώματος θα διαγραφεί, παρόλο που δεν έχει επιλεγεί, καθώς μετά τη διαγραφή του υποστυλώματος δεν ανήκει πλέον σε κάποιο πεπερασμένο στοιχείο και δεν έχει κάποιον σαφή λόγο ύπαρξης. Σημειώνεται πως ο τρόπος διαχείρισης της δυνατότητας διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων και κόμβων ενδέχεται να διαφέρει σημαντικά από πρόγραμμα σε πρόγραμμα.

Η δοκός και ο δεξιά στύλος που επιλέχθηκαν διαγράφονται με **delete** από το πληκτρολόγιο του υπολογιστή. Η τελική εικόνα του φορέα μετά τη διαγραφή φαίνεται στο δεξί μέρος του Σχήματος 2.6.



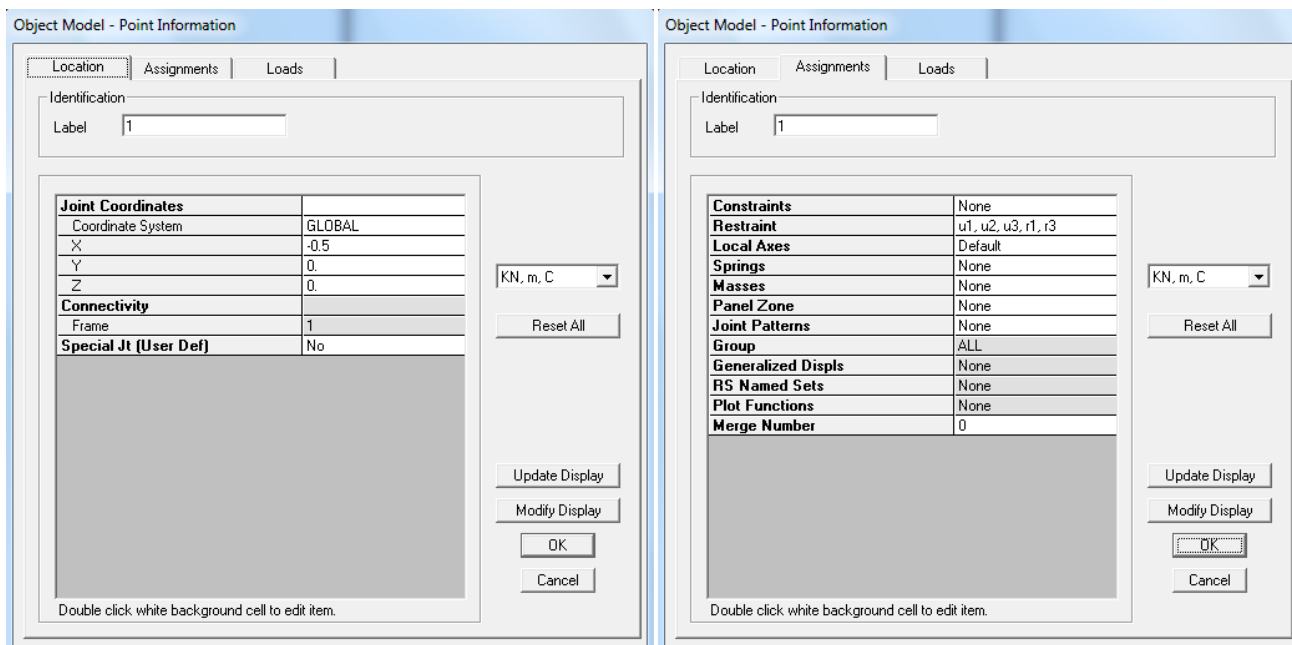
Σχήμα 2.6 Επιλογή στοιχείων φορέα (αριστερά), εμφάνιση επιλεγμένων στοιχείων προς διαγραφή (κέντρο) και τελική εικόνα φορέα-προβόλου μετά τις διαγραφές (δεξιά).

Βαθμοί ελευθερίας κόμβων (στηρίξεις φορέα)

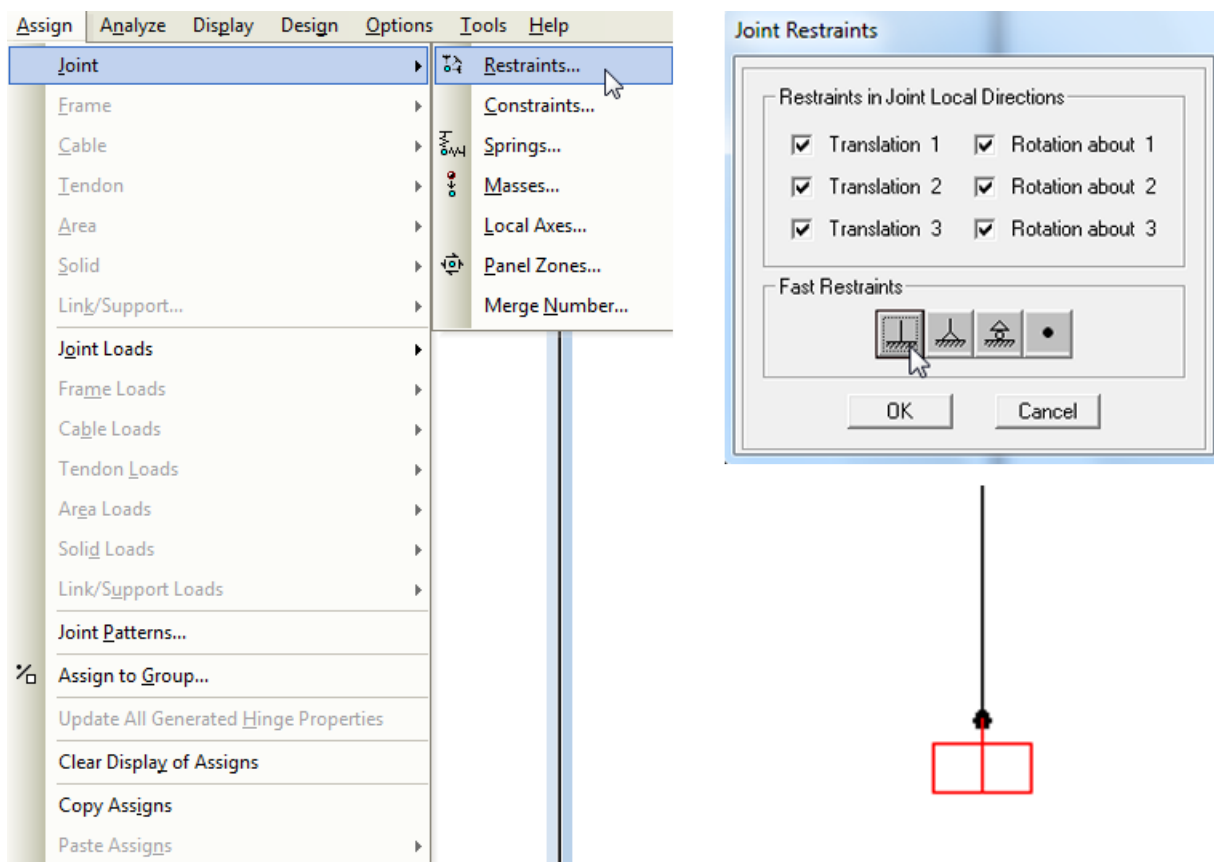
Ο καθορισμός των στηρίξεων ενός φορέα επιτυγχάνεται με τη δέσμευση των κατάλληλων βαθμών ελευθερίας κίνησης. Κατά τα γνωστά, ο κάθε κόμβος έχει στον χώρο έξι (6) βαθμούς ελευθερίας κίνησης: τρεις (3) μεταφορικούς κατά τη διεύθυνση των τριών αξόνων του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και τρεις (3) στροφικούς γύρω από τους εν λόγω άξονες. Στην περίπτωση της πάκτωσης είναι προφανές πως θα πρέπει να δεσμευτούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας.

Ο έλεγχος του τύπου της υφιστάμενης στήριξης στη βάση του προβόλου μπορεί να γίνει με δεξιά *click* στον συγκεκριμένο κόμβο, οπότε ανοίγει το παράθυρο με τίτλο *Object Model-Point Information* που φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Όπως φαίνεται στην καρτέλα *Assignments*, στο πεδίο *Restraints* δίνονται οι δεσμεύσεις των ελευθεριών κίνησης που αφορούν τον κόμβο. Από τους έξι (6) βαθμούς ελευθερίας του κόμβου φαίνεται πως είναι δεσμευμένοι οι πέντε (5), αφήνοντας ελεύθερο τον *r2*. Λαμβάνοντας υπόψη πως οι άξονες *1-2-3* του τοπικού συστήματος αξόνων για τους κόμβους, ταυτίζονται κατά σειρά με τους άξονες *X-Y-Z* του γενικού συστήματος συντεταγμένων, γίνεται αντιληπτό ότι μένει ελεύθερη η στροφή γύρω από τον άξονα *Y*. Κατά συνέπεια, η στήριξη του συγκεκριμένου κόμβου λειτουργεί ως άρθρωση σε επίπεδο *XZ*. Περισσότερες πληροφορίες για το τοπικό σύστημα αξόνων δίνονται στο Παράρτημα Α. Στην καρτέλα *Location* του ίδιου παραθύρου δίνονται οι συντεταγμένες του κόμβου. Με την επιλογή *Cancel* κλείνει το παράθυρο με τις ιδιότητες κόμβου και το πρόγραμμα επιστρέφει στην επιφάνεια εργασίας.

Για την ανάθεση της πάκτωσης, επιλέγεται ο κόμβος της βάσης και από την εντολή *Assign → Joint → Restraints* επιλέγεται η δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 2.8). Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί πως για επίλυση στο επίπεδο *XZ*, αρκεί η δέσμευση των βαθμών ελευθερίας του επιπέδου δηλαδή των μετακινήσεων κατά *X (Translation 1)* και *Z (Translation 3)* και της στροφής γύρω από άξονα *Y (Rotation about 2)*. Η τελική εικόνα του κόμβου φαίνεται στο κάτω δεξιά μέρος του σχήματος.



Σχήμα 2.7 Πληροφορίες θέσης και στοιχείων στήριξης του κόμβου στη βάση του φορέα.



Σχήμα 2.8 Ανάθεση πάκτωσης στη βάση του προβόλου και τελική εικόνα του κόμβου βάσης.

2.3. Αποθήκευση αρχείου προγράμματος

Κατά την προσομοίωση ενός φορέα σε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y), είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει πλήρης έλεγχος του ονόματος και της θέσης αποθήκευσης του αρχείου. Ιδιαίτερα σε προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί στο εξωτερικό, αποτελεί καλή πρακτική η χρήση αποκλειστικά αγγλικών χαρακτήρων τόσο για το όνομα αρχείου όσο και για τη διαδρομή (*path*) του φακέλου αποθήκευσης στον υπολογιστή. Είναι μάλιστα σκόπιμο να αποφεύγεται διαδρομή με μεγάλο αριθμό χαρακτήρων, για να μην δημιουργούνται προβλήματα κατά την αποθήκευση του αρχείου ή την διαδικασία της ανάλυσης.

Η επιλογή του ονόματος ενός αρχείου είναι σκόπιμο να γίνεται βάσει κάποιας σχετικής κωδικοποίησης, ώστε να είναι εύκολο για τον χρήστη να αναγνωρίσει το περιεχόμενο του δίχως να χρειαστεί να το ανοίξει. Στην περίπτωση εκτέλεσης μικρού αριθμού αναλύσεων, το όνομα του αρχείου μπορεί να είναι περιγραφικό, περιλαμβάνοντας στοιχεία από τα βασικά δεδομένα (π.χ. Pronolos, Plaisio, 4storey κτλ). Όταν αναμένεται σημαντικός αριθμός παραμετρικών αναλύσεων, τότε είναι σκόπιμη η επιλογή ονόματος με εναλλασσόμενους αλφαριθμητικούς χαρακτήρες, όπου ο καθένας υποδηλώνει μεταβολή σε μια παράμετρο του αρχείου (π.χ. PlaisioA1b1, PlaisioA2c3 κτλ). Θα πρέπει όμως ο μελετητής να έχει καταγράψει τη σημασία του κάθε χαρακτήρα ώστε να μπορεί να εντοπίσει εύκολα το αρχείο με τις επιθυμητές παραμέτρους.

Πολλά προγράμματα, όπως και το *SAP 2000* που χρησιμοποιείται στο παρόν, δημιουργούν σημαντικό αριθμό αρχείων κατά την ανάλυση, με αποτέλεσμα να προκαλούν σύγχυση στον χρήστη. Τα βασικά δεδομένα του προγράμματος συνήθως αποθηκεύονται σε ένα αρχείο (στο *SAP 2000* είναι της μορφής *Όνομα_Αρχείου.SDB*), ενώ τα υπόλοιπα αρχεία που δημιουργούνται περιέχουν συνήθως πληροφορίες για τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για τη μεταφορά των δεδομένων του αρχείου από υπολογιστή σε υπολογιστή, αρκεί η μεταφορά του βασικού αρχείου δεδομένων του προγράμματος.

Για το παρόν αρχείο επιλέγεται όνομα δηλωτικό του τρέχοντος Κεφαλαίου, οπότε αποθηκεύεται ως *Chapter 02.SDB*. Όταν στη συνέχεια γίνει η ανάλυση, τα διάφορα αρχεία που θα δημιουργήσει το πρόγραμμα θα έχουν όλα το ίδιο όνομα και θα βρίσκονται στον φάκελο όπου έγινε η αρχική αποθήκευση.

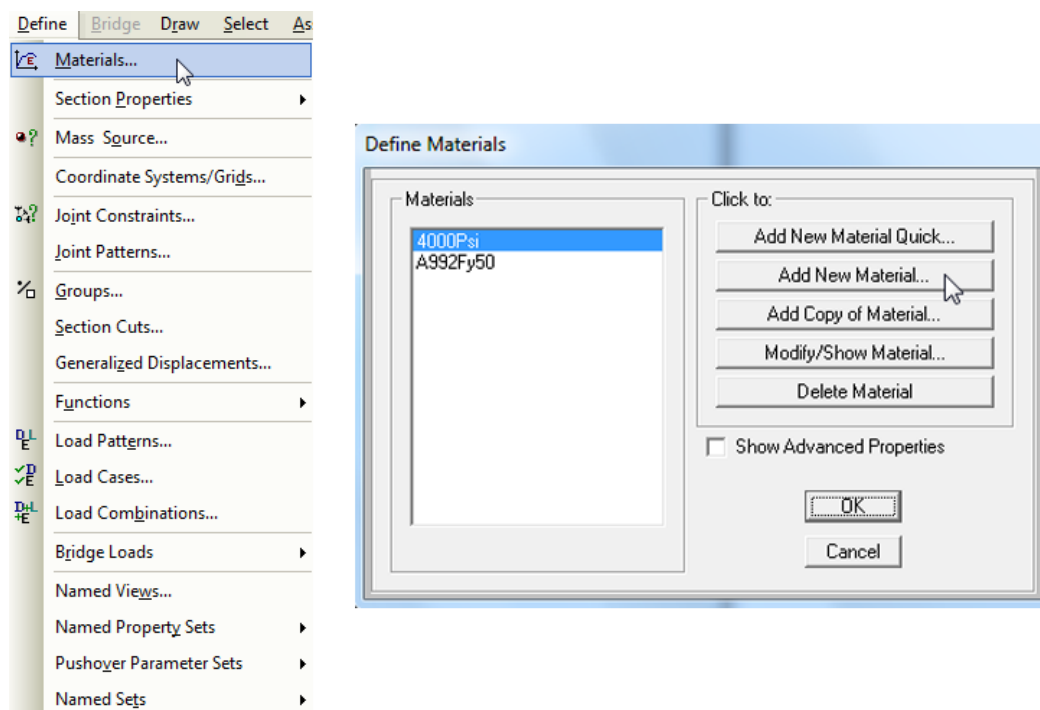
2.4. Ορισμός υλικού

Ο ορισμός των υλικών στο πρόγραμμα γίνεται από το *Define → Materials*. Για τη δημιουργία νέου υλικού επιλέγεται το *Add New Material* (Σχήμα 2.9). Στο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα 2.10) πρέπει να οριστούν τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη συμπεριφορά του νέου υλικού. Σε στατικά ορισμένο σύστημα (ισοστατικός φορέας) ο ορισμός υλικού και διατομών δεν είναι απαραίτητος προκειμένου να υπολογιστούν τα εντατικά μεγέθη στον φορέα. Αν όμως ζητείται ως αποτέλεσμα της επίλυσης και η παραμόρφωση του φορέα (μετακινήσεις σε διάφορα σημεία του), τότε θα πρέπει υλικό και διατομές να οριστούν αναλυτικά, όπως γίνεται στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Βασικές ιδιότητες υλικών (γραμμική ελαστική συμπεριφορά)

Οι βασικές ιδιότητες ενός απλού υλικού στη γραμμική ελαστική περιοχή συμπεριφοράς, όπως αναφέρθηκαν και στο εισαγωγικό Κεφάλαιο 1, είναι το μέτρο ελαστικότητας (*Modulus of Elasticity E*), το ειδικό βάρος και η πυκνότητα του υλικού (*Weight per Unit Volume* και *Mass per Unit Volume* αντίστοιχα), και ο λόγος Poisson (*Poisson's Ratio ν*). Ο συντελεστής θερμικής διαστολής (*Coefficient of Thermal Expansion A*) δεν θα ενεργοποιηθεί στο παρόν, καθώς δεν θα δοθούν θερμοκρασιακά φορτία, συνεπώς οποιαδήποτε τιμή του δεν επηρεάζει την προσομοίωση. Το μέτρο διάτμησης (*Shear Modulus G*) υπολογίζεται βάσει του μέτρου ελαστικότητας και του *λόγου Poisson* από τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.9 Δημιουργία νέου υλικού.

Ιδιότητες οπλισμένου σκυροδέματος βάσει Κανονισμών

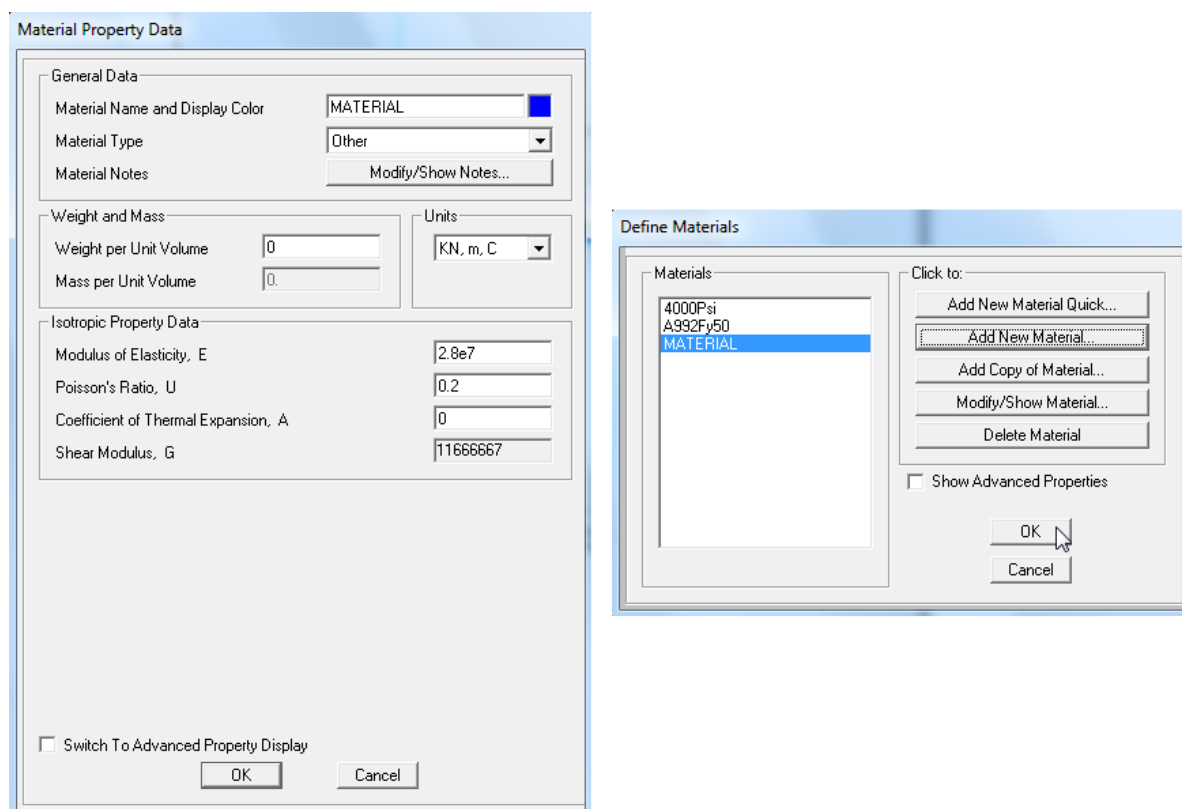
Στους κτιριακούς φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα που εξετάζονται στο σύγγραμμα, οι οποίοι αποτελούν την πλειοψηφία των νέων κατασκευών στην ελληνική επικράτεια, μπορούν να ληφθούν ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων υλικού από σχετικές προδιαγραφές των Κανονισμών. Πιο συγκεκριμένα, για το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, μπορούν να ληφθούν τιμές από τον **EC2 §3.1.3(2)** και τον **EΚΩΣ 2000 §2.5.2**, που δίνουν την τιμή του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται. Αντίστοιχα, πάντα για κατασκευές σκυροδέματος, προτείνεται τιμή του λόγου Poisson ίση με 0.2 για μη-ρηγματωμένο σκυρόδεμα και 0.0 για ρηγματωμένο (**EC2 §3.1.3(4)**-**EΚΩΣ 2000 §2.5.3**). Το ειδικό βάρος οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να ληφθεί ίσο με 25 kN/m^3 (**EΚΩΣ 2000 §2.2**). Τέλος, ο συντελεστής θερμικής διαστολής μπορεί να λαμβάνεται ίσος με $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (**EC2 §3.1.3(5)**-**EΚΩΣ 2000 §2.5.5**).

Καθώς το υλικό που δημιουργείται για τις ανάγκες του παραδείγματος δεν θα χρησιμοποιηθεί για διαστασιολόγηση, παρά μόνο για γραμμική ελαστική ανάλυση, αρκεί να δοθούν οι τιμές των ελαστικών σταθερών που περιγράφονται στην εκφώνηση του παραδείγματος και να οριστεί ένας απλός τύπος υλικού (*Other*), όπως φαίνεται στο αριστερά μέρος του Σχήματος 2.10. Υπενθυμίζεται πως τα δεδομένα αναφέρουν αβαρές υλικό μηδενικής πυκνότητας, οπότε στα σχετικά πεδία τίθενται μηδενικές τιμές. Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των τιμών, αλλά και τεθεί το επιθυμητό όνομα υλικού (εδώ τίθεται ονομασία **MATERIAL=υλικό**), με **OK** γίνεται επιστροφή στο παράθυρο με τη λίστα των διαθέσιμων υλικών (Σχήμα 2.10, δεξιά). Εκεί θα πρέπει να επιλεγεί εκ νέου το **OK**, ώστε να αποθηκευτεί το νέο υλικό στο συγκεκριμένο αρχείο επίλυσης (διαφορετικά διαγράφεται). Ο επανέλεγχος των ιδιοτήτων που ορίστηκαν μπορεί να γίνει με την εντολή **Modify/Show Material**.

Εισαγωγή αριθμητικών τιμών παραμέτρων σε πρόγραμμα Η/Υ

Η εισαγωγή μεγάλων τιμών σε προγράμματα υπολογιστή μπορεί να γίνει σε αρκετές περιπτώσεις με τον τρόπο που δόθηκε το μέτρο ελαστικότητας (Σχήμα 2.10), δηλαδή με τη μορφή AeB που αντιστοιχεί σε τιμή $A \cdot 10^B$. Απαιτείται προσοχή, ώστε το σύμβολο e να προέρχεται από το αγγλικό αλφάβητο. Επίσης, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του κατάλληλου συμβόλου-σημείου στίξης για την υποδιαστολή, που μπορεί να είναι είτε το κόμμα (,) είτε η τελεία (.) ανάλογα με τις τοπικές ρυθμίσεις (**regional settings**).

του λειτουργικού προγράμματος του κάθε υπολογιστή. Σε κάθε περίπτωση, είναι σκόπιμο μετά τη συμπλήρωση του πεδίου με την επιθυμητή τιμή να γίνει έλεγχος ότι αυτή λαμβάνεται σωστά, ξανανοίγοντας το συγκεκριμένο παράθυρο με χρήση της επιλογής πλήκτρου *modify/show*.



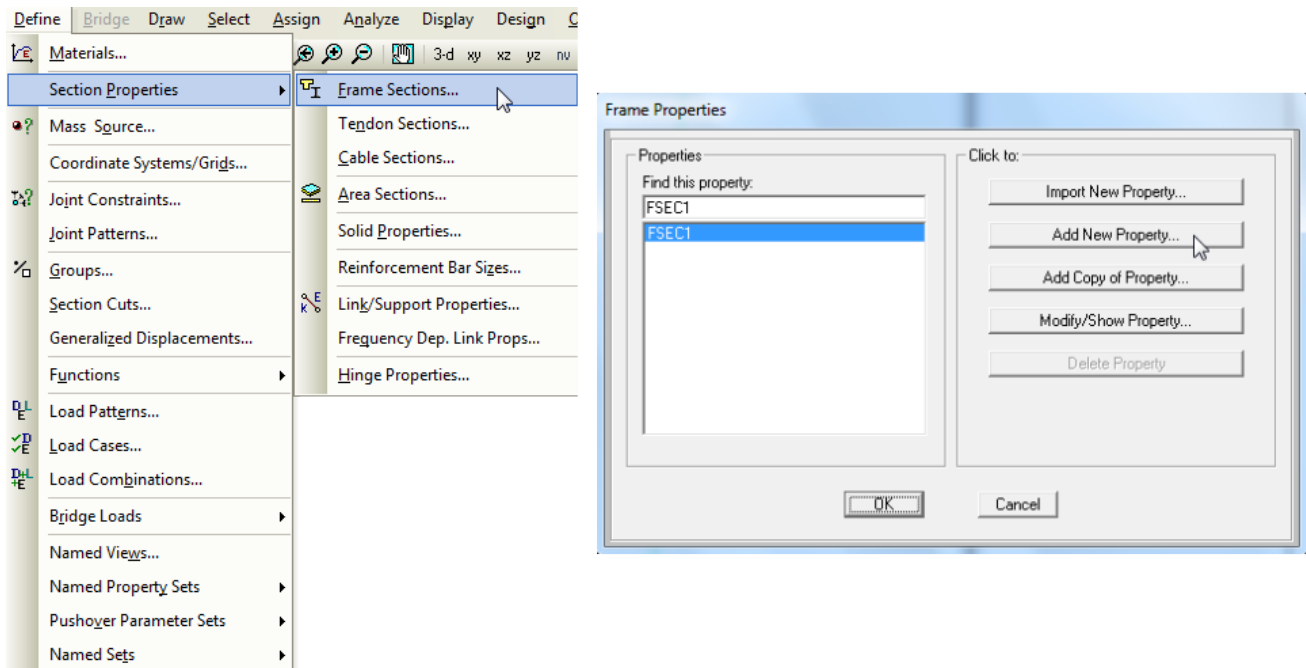
Σχήμα 2.10 Ορισμός ιδιοτήτων νέου υλικού και αποθήκευση του στη λίστα υλικών του αρχείου.

2.5. Ορισμός διατομής

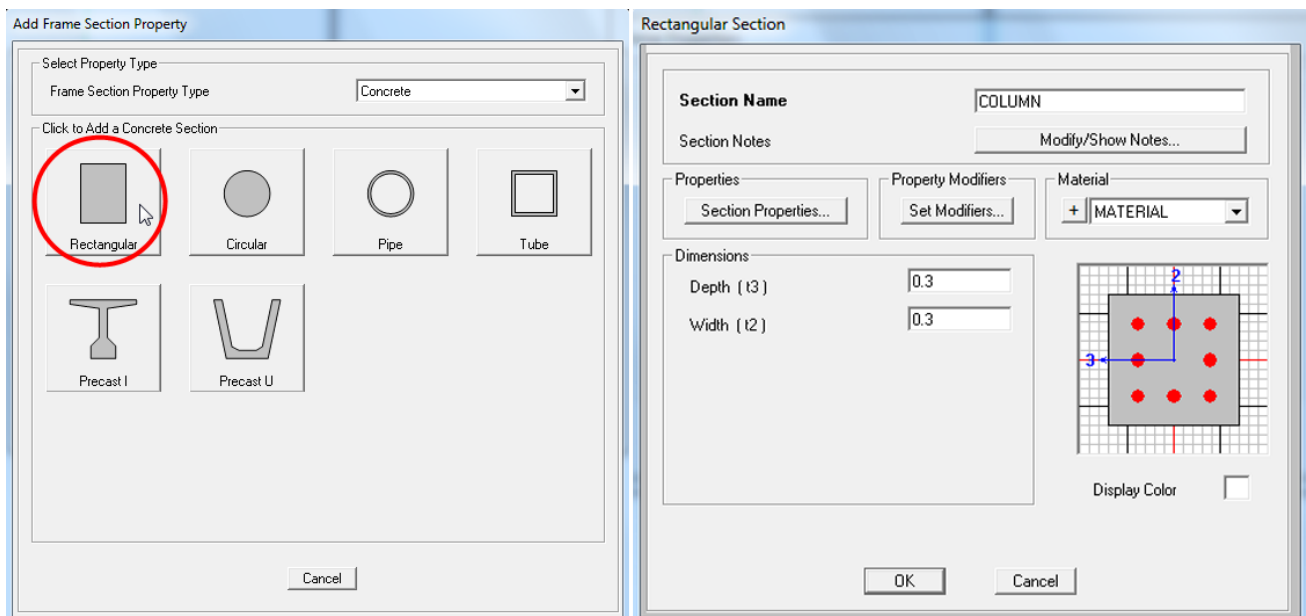
2.5.1. Καθορισμός στοιχείων διατομής

Ο ορισμός των διατομών γίνεται από το *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections*, όπου για την προσθήκη νέας διατομής επιλέγεται το *Add New Property* (Σχήμα 2.11). Στο παράθυρο που εμφανίζεται, υπάρχει ένας διαχωρισμός των σχημάτων διατομής ανάλογα με το είδος των κατασκευών στις οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται (μεταλλικές στην κατηγορία *Steel*, οπλισμένου σκυροδέματος στην κατηγορία *Concrete* κτλ). Καθώς η ορθογωνική διατομή χρησιμοποιείται συνήθως σε κατασκευές σκυροδέματος, μπορεί να βρεθεί στη βιβλιοθήκη του προγράμματος στην κατηγορία *Concrete* με την ονομασία *Rectangular* (Σχήμα 2.12). Στο σημείο αυτό ορίζονται το επιθυμητό όνομα διατομής (*COLUMN*=υποστύλωμα), οι διαστάσεις της, όπως και το υλικό από το οποίο αποτελείται το δομικό στοιχείο (*MATERIAL*), το οποίο δημιουργήθηκε σε προηγούμενο βήμα και είναι πλέον διαθέσιμο στη λίστα υλικών του αρχείου. Με διπλό *OK* γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια σχεδίασης.

Σημειώνεται πως η επιλογή ενός σχήματος διατομής δεν είναι δηλωτική του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δομικό στοιχείο, καθώς στη συνέχεια μπορεί να επιλεγεί οποιοδήποτε υλικό επιθυμεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει. Για τον ίδιο λόγο, η ύπαρξη ράβδων οπλισμού στο σκαρίφημα που εμφανίζεται στο παράθυρο ορισμού της διατομής (δεξιά μέρους του Σχήματος 2.12) είναι ενδεικτική και δεν υποδηλώνει απαραίτητα σκυρόδεμα, πόσο μάλλον την ύπαρξη συγκεκριμένου οπλισμού. Τέλος, επισημαίνεται πως η υφιστάμενη διατομή *FSEC1* (*Frame Section 1*) είναι μια προεπιλεγμένη διατομή που έχει ανατεθεί από το πρόγραμμα στο γραμμικό στοιχείο που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 2.11 Δημιουργία νέας διατομής.



Σχήμα 2.12 Ορισμός σχήματος και ιδιοτήτων νέας διατομής.

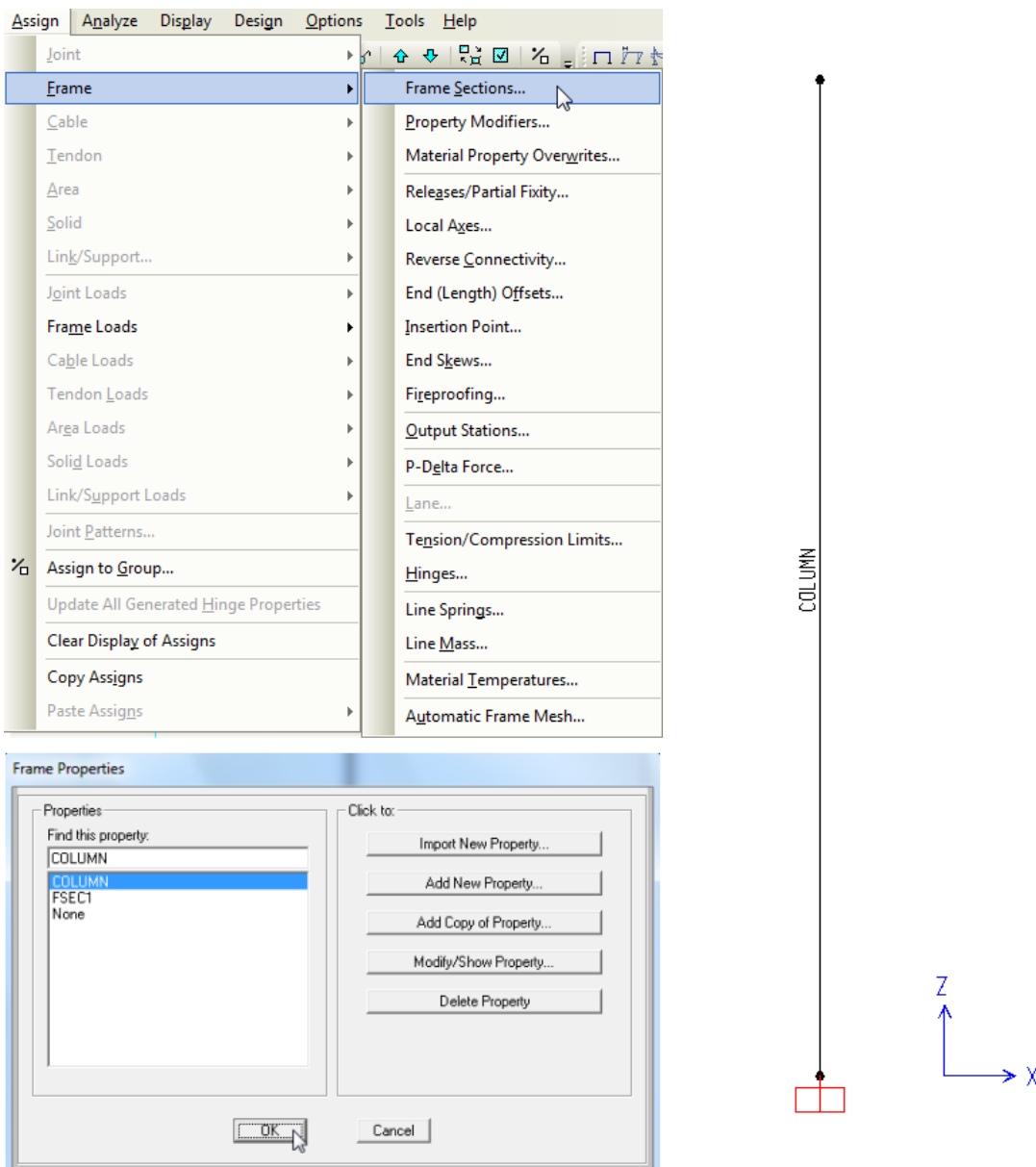
2.5.2. Ανάθεση διατομής στο γραμμικό στοιχείο προβόλου και εμφάνιση εικόνας φορέα

Καθώς η αρχική σχεδίαση του προβόλου έγινε με μια προεπιλεγμένη (*default*) από το πρόγραμμα διατομή με όνομα *FSEC1*, θα πρέπει να ανατεθεί στο γραμμικό στοιχείο η νέα διατομή που μόλις δημιουργήθηκε. Αυτό γίνεται με επιλογή του γραμμικού στοιχείου και χρήση της εντολής *Assign* → *Frame* → *Frame Sections* (Σχήμα 2.13, πάνω αριστερά). Επιλέγεται η διατομή που προηγουμένως δημιουργήθηκε (*COLUMN*) και με *OK* γίνεται η ανάθεση στο γραμμικό στοιχείο του προβόλου (Σχήμα 2.13, κάτω αριστερά). Αυτόματα το πρόγραμμα εμφανίζει την ονομασία της διατομής που ανατέθηκε δίπλα στο γραμμικό στοιχείο, στο παράθυρο το οποίο ήταν ενεργό πριν δοθεί η εντολή (Σχήμα 2.13, δεξιά). Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη διαδικασία ανάθεσης που έγινε αφορά μόνο γραμμικά στοιχεία (*Frames*). Συνεπώς, δεν θα υπήρχε

πρόβλημα αν ταυτόχρονα ήταν κατά λάθος επιλεγμένος και κάποιος κόμβος (*Joint*), καθώς δεν θα επηρεαζόταν από τη συγκεκριμένη εντολή.

Ανάθεση και εμφάνιση ιδιοτήτων φορέα

Όταν μια ιδιότητα, χαρακτηριστικό ή άλλο βασικό δεδομένο εισάγεται σε ένα πρόγραμμα ανάλυσης, τότε καταχωρείται μέσα στα στοιχεία του αρχείου και δεν χρειάζεται να ανατεθεί εκ νέου. Η εμφάνιση της συγκεκριμένης ιδιότητας στην οθόνη εισαγωγής δεδομένων δεν σχετίζεται άμεσα με την ανάθεση της, κάτι που συχνά προκαλεί σύγχυση σε αρχάριο χρήστη. Ενδεικτικά, στο παρόν παράδειγμα, παρά το γεγονός ότι η ονομασία της διατομής εμφανίζεται μόνο στο ένα από τα δυο παράθυρα, η ιδιότητα έχει ληφθεί υπόψη κανονικά και δεν απαιτείται εκ νέου ανάθεση με επιλογή του στοιχείο και στο άλλο παράθυρο. Ο χρήστης βεβαίως μπορεί να ελέγξει την εμφάνιση/απόκρυψη της συγκεκριμένης ιδιότητας, κάτι που στο πρόγραμμα αυτό γίνεται με συνδυασμό των εντολών *Display* → *Show Undeformed Shape* και *View* → *Set Display Options*. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λόγους ταχύτητας τα αντίστοιχα εικονίδια/εργαλεία που επισημαίνονται δίπλα στην καθεμία από τις παραπάνω εντολές και βρίσκονται στο οριζόντιο *menu* εργαλείων του προγράμματος, πάνω ακριβώς από την επιφάνεια σχεδίασης.



Σχήμα 2.13 Ανάθεση της διατομής στο γραμμικό στοιχείο.

2.6. Ορισμός φορτίων

Κατηγορίες φορτίων

Κατά τον ορισμό των φορτίων, είναι σκόπιμος ο διαχωρισμός στις γενικότερες κατηγορίες φόρτισης που προβλέπουν οι Κανονισμοί, ώστε να διευκολυνθεί ο χρήστης στο στάδιο της δημιουργίας των απαιτούμενων συνδυασμών. Οι γενικότερες κατηγορίες δράσεων που προβλέπονται από τους Κανονισμούς είναι οι μόνιμες δράσεις, οι μεταβλητές δράσεις και οι τυχηματικές δράσεις, ενώ υπάρχει και σχετική διάκριση μεταξύ της κυρίαρχης μεταβλητής δράσης και των δευτερευουσών κατά τον καθορισμό των συνδυασμών δράσεων (*EN1990 §4.1.1 και §6.4.3· ΕΚΩΣ §6.3.2 και §6.4*). Για τις περιπτώσεις ανάλυσης κατασκευών που αντιμετωπίζονται στο παρόν σύγγραμμα, οι φορτιστικές καταστάσεις που ενδιαφέρουν είναι οι μόνιμες δράσεις, οι μεταβλητές δράσεις (κινητά φορτία) και οι σεισμικές δράσεις.

Η ορθότερη αντιμετώπιση των φορτιστικών καταστάσεων κατά τη μελέτη ενός φορέα, απαιτεί το διαχωρισμό σε μόνιμα, μεταβλητά και τυχηματικά φορτία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα δεν υπάρχει χαρακτηρισμός της κάθε δράσης σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, καθώς πρόκειται για ένα απλοποιημένο παράδειγμα επίλυσης. Η κατηγοριοποίηση των φορτίων που θα επιλεγεί σχετίζεται καθαρά με την απαίτηση του προβλήματος για προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης, τόσο υπό το κάθε φορτίο χωριστά όσο και υπό τη συνδυασμένη δράση τους.

Στο πρόγραμμα *SAP 2000*, η διαδικασία καθορισμού των διαφόρων τύπων φόρτισης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Καθορισμός μορφών φόρτισης (*Load Patterns*): περιλαμβάνει τις διάφορες κατηγορίες στατικών φορτίων που δρουν στον φορέα (ενδεικτικά μόνιμα, μεταβλητά κτλ).
- Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων (*Load Cases*): περιλαμβάνει το σύνολο των φορτίων και τύπων ανάλυσης του φορέα (στατικά φορτία, δυναμικά φορτία, ιδιομορφική ανάλυση κτλ).
- Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης (*Load Combinations*): περιλαμβάνει συνδυασμούς αποτελεσμάτων των επιμέρους φορτιστικών καταστάσεων που καθορίστηκαν, ακόμη και όταν αυτές αφορούν διαφορετικούς τύπους φόρτισης.

Η ανάθεση συγκεκριμένων τιμών στα στατικά φορτία του φορέα, όπως αυτά του παραδείγματος, μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο στάδιο, αρκεί να έχει προηγουμένως καθοριστεί η αντίστοιχη μορφή φόρτισης.

2.6.1. Καθορισμός μορφών φόρτισης

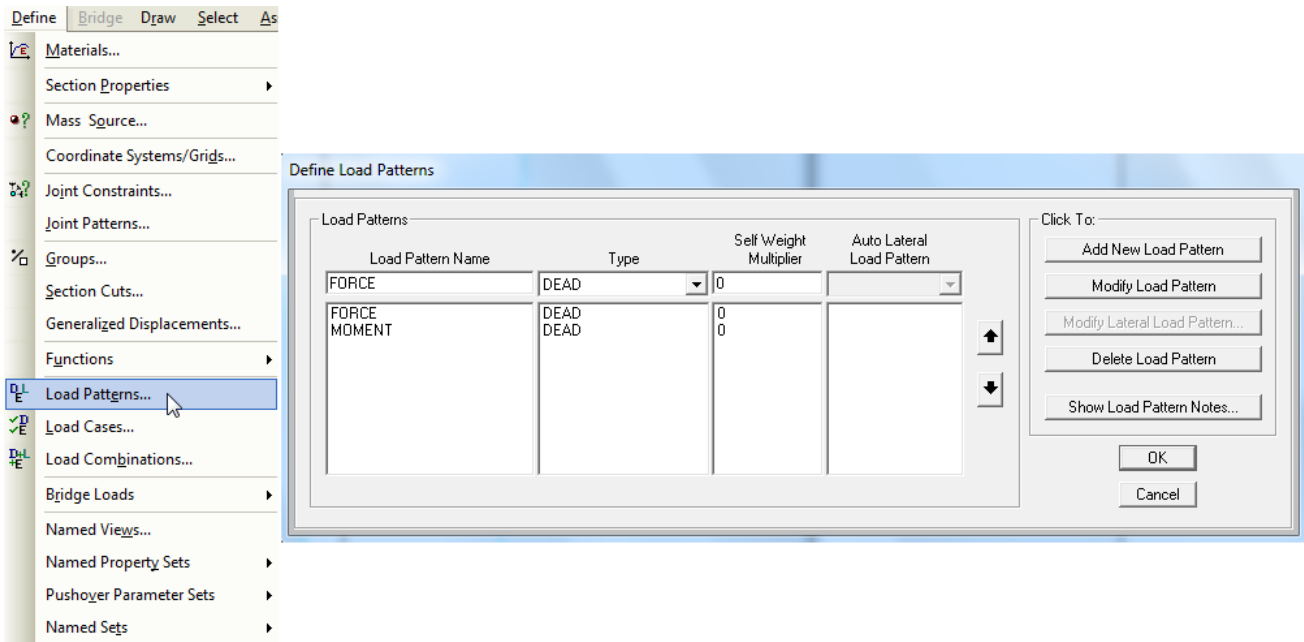
Από το *Define* → *Load Patterns* αρχικά ορίζονται δυο διαφορετικές μορφές φόρτισης, *FORCE* (δύναμη) και *MOMENT* (ροπή), μια για κάθε φορτίο της εκφώνησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14 (καθορίζονται τα στοιχεία της νέας μορφής φόρτισης και με *Add New Load Pattern* προστίθεται στη λίστα).

Ο τύπος του φορτίου (*Type*) χρειάζεται μόνο όταν το πρόγραμμα κληθεί να δημιουργήσει αυτόματα συνδυασμούς φόρτισης, βάσει δεδομένου κανονισμού. Στο παρόν σύγγραμμα, καθώς ο χρήστης θα δημιουργεί τους συγκεκριμένους συνδυασμούς που επιθυμεί, ο τύπος του φορτίου που επιλέγεται δεν επηρεάζει άμεσα την ανάλυση.

Η επιλογή *Self Weight Multiplier* ορίζει πόσες φορές θα ληφθεί υπόψη το ίδιο βάρος σε μια μορφή φόρτισης. Θεωρητικά, η μοναδιαία τιμή (1) θα πρέπει να λαμβάνεται μόνο στην περίπτωση κάποιας μόνιμης φόρτισης, η οποία εμπεριέχει και τα ίδια βάρη της κατασκευής. Εδώ τίθεται μηδενική τιμή (0), καθώς από την εκφώνηση ζητείται να μην ληφθεί υπόψη το ίδιο βάρος του φορέα. Σημειώνεται πως ακόμη και αν στο συγκεκριμένο παράδειγμα δινόταν τιμή διάφορη του μηδενός, το ίδιο βάρος θα προέκυπτε και πάλι μηδενικό, καθώς έχει δοθεί μηδενικό ειδικό βάρος στις ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται στον φορέα (Σχήμα 2.10).

Τέλος, η υφιστάμενη μορφή φόρτισης με όνομα *DEAD* μπορεί να διαγραφεί, καθώς δεν θα χρησιμοποιηθεί στο παράδειγμα για την επιβολή κάποιου φορτίου. Σε περίπτωση υλικού με ειδικό βάρος, η συγκεκριμένη

μορφή φόρτισης θα έδινε την εντατική κατάσταση που προκύπτει από την εφαρμογή του ίδιου βάρους των δομικών στοιχείων στον φορέα.

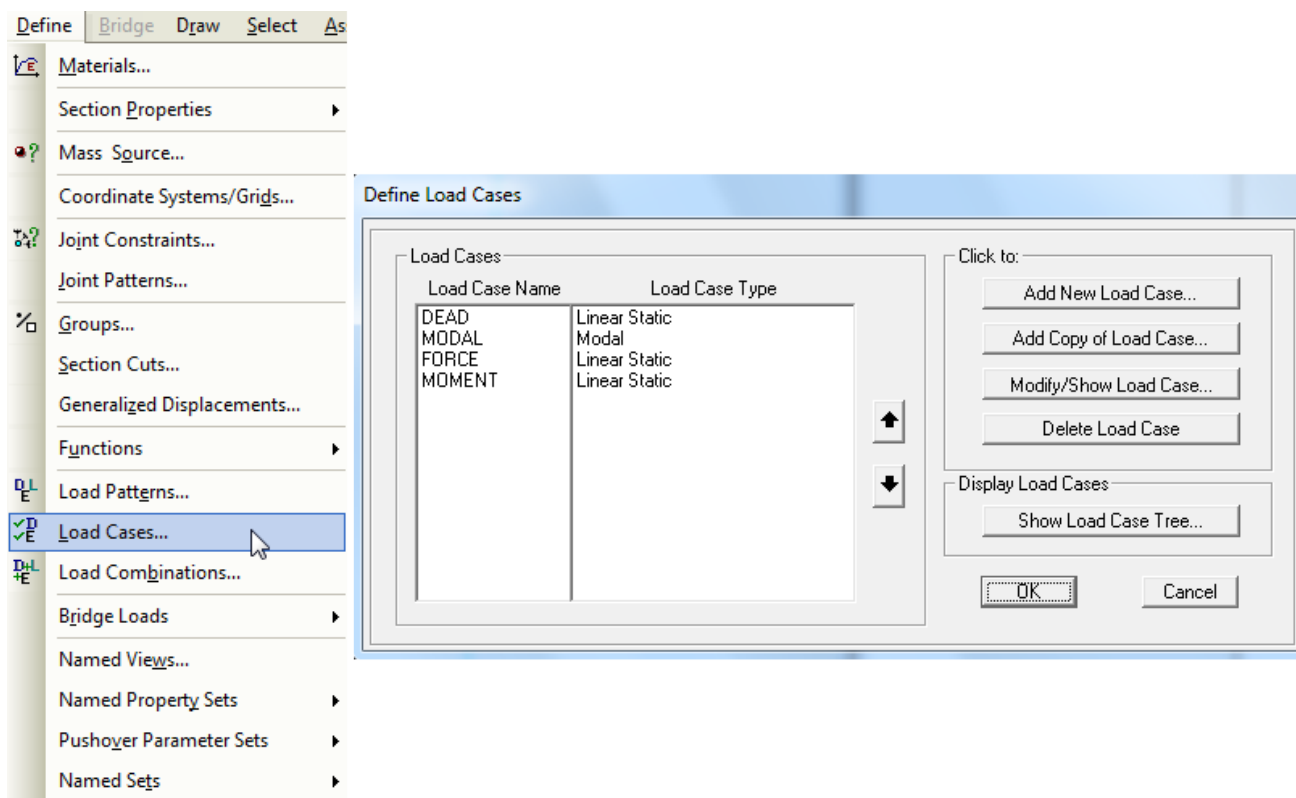


Σχήμα 2.14 Ορισμός μορφών φόρτισης (επιβαλλόμενα στατικά φορτία).

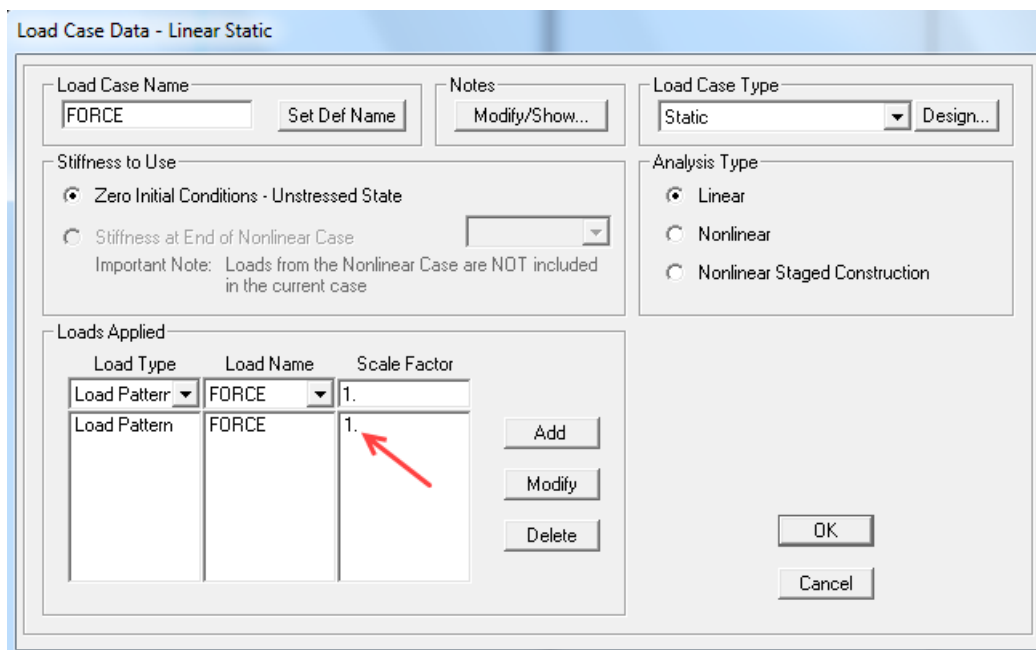
2.6.2. Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων

Στο πεδίο *Define* → *Load Cases* εμφανίζονται οι φορτιστικές καταστάσεις για τις οποίες ζητείται να γίνει η ανάλυση (Σχήμα 2.15). Παρατηρείται ότι τα δυο στατικά φορτία που ορίστηκαν προηγουμένως έχουν αυτομάτως αντιστοιχηθεί σε φορτιστικές καταστάσεις με το ίδιο όνομα. Οι καταστάσεις *Dead* (για τα ίδια βάρη) και *Modal* (ιδιομορφική ανάλυση) προϋπάρχουν, αλλά θα παρουσιάσουν αποτελέσματα μόνο όταν ορίζονται μη-μηδενικές τιμές για τα ίδια βάρη και τη μάζα της κατασκευής αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορούν να διαγραφούν (διαφορετικά, απλώς θα δίνουν μηδενικά αποτελέσματα μετά την ανάλυση).

Με *Modify/Show* σε κάθε *Load Case* από αυτά που έχουν οριστεί, παρατηρείται (Σχήμα 2.16) ότι οι δυο φορτιστικές καταστάσεις αφορούν γραμμική ελαστική ανάλυση στατικού τύπου (*Load Case Type: Linear Static*). Είναι σημαντικό να ελεγχθεί ότι η αντίστοιχη μορφή φόρτισης είναι ορισμένη μια φορά (*scale factor 1*) στη λίστα *Loads Applied* της κάθε φορτιστικής κατάστασης, διαφορετικά η ανάλυση θα δώσει μηδενική καταπόνηση.



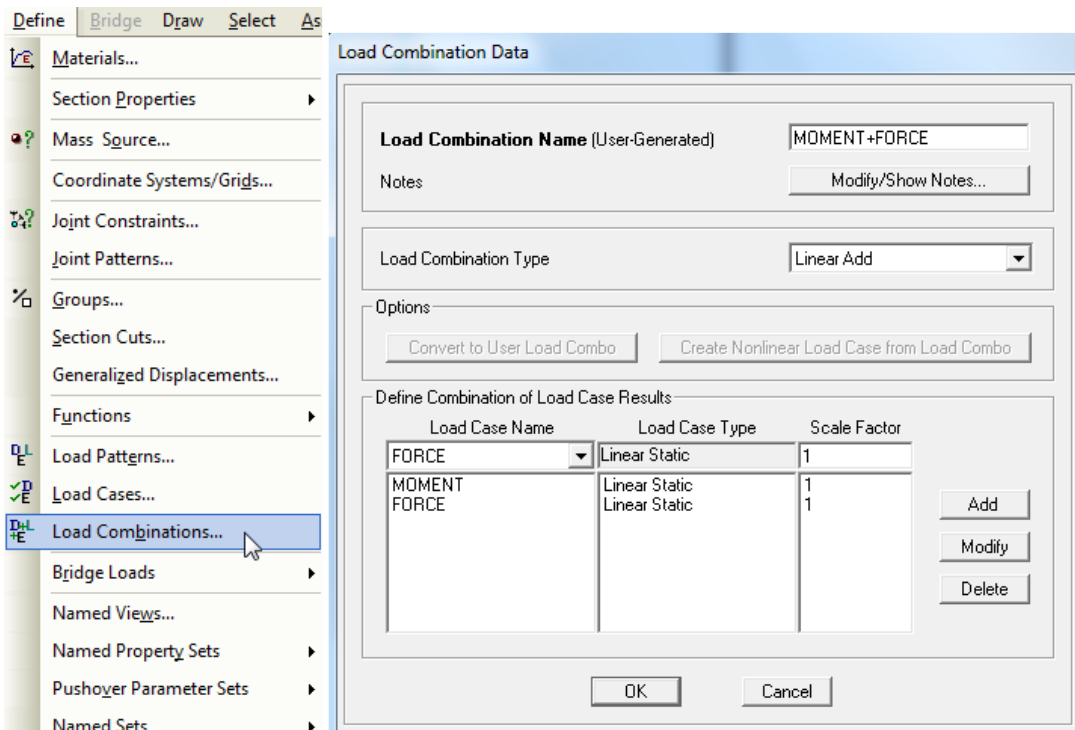
Σχήμα 2.15 Ορισμός φορτιστικών καταστάσεων για ανάλυση (Load Cases).



Σχήμα 2.16 Έλεγχος σωστού ορισμού της φορτιστικής κατάστασης.

2.6.3. Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης

Μετά τον καθορισμό των φορτιστικών καταστάσεων, μπορεί να οριστεί ο συνδυασμός των δυο φορτίων, προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα για τη συνδυασμένη δράση ροπής και δύναμης. Αυτό γίνεται με την εντολή *Define* → *Load Combinations*, όπου επιλέγεται το *Add New Combo* και στη συνέχεια ορίζονται οι παράμετροι του συνδυασμού (Σχήμα 2.17). Δίνεται το όνομα του συνδυασμού (εδώ επιλέγεται το περιγραφικό *MOMENT+FORCE*) και ορίζεται πόσες φορές συμμετέχει το κάθε φορτίο στον συνδυασμό, με χρήση του κατάλληλου συντελεστή *Scale Factor*. Με *Add* εισάγεται το κάθε φορτίο με το συντελεστή του στη λίστα και με συνεχόμενα *OK* αποθηκεύεται ο συνδυασμός και γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας.



Σχήμα 2.17 Καθορισμός συνδυασμού φόρτισης.

Δυνατότητες συνδυασμού φορτίων

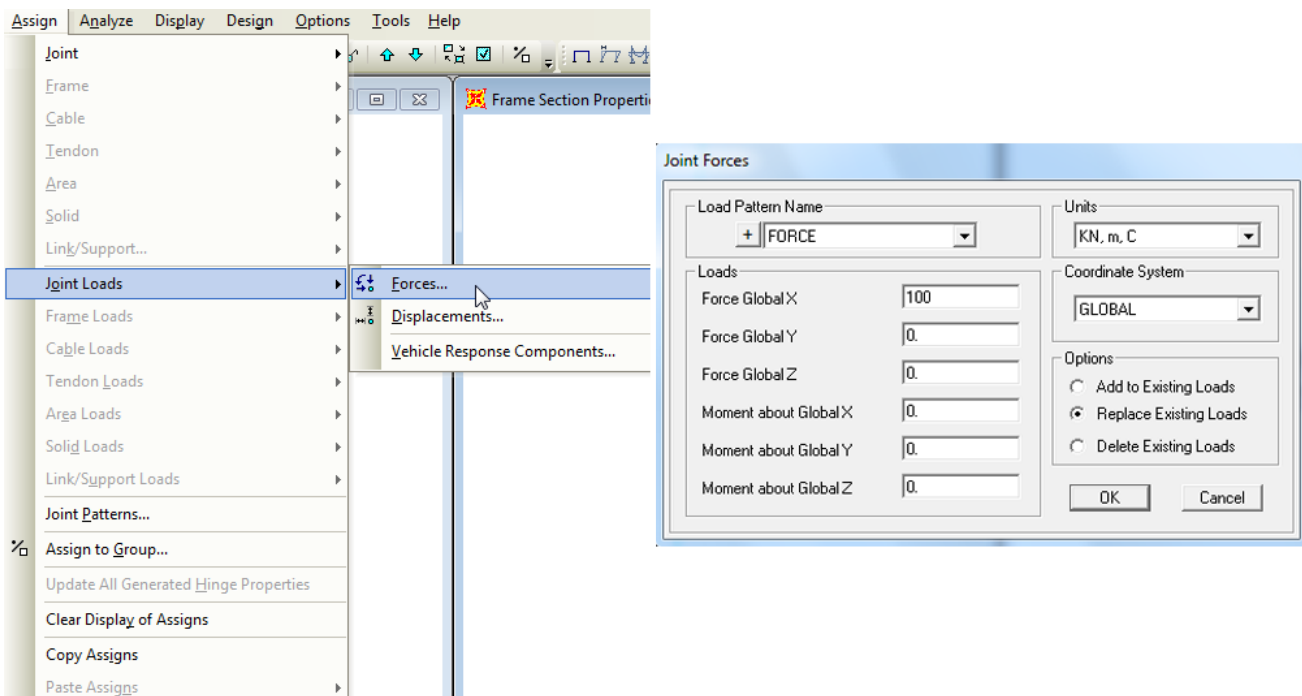
Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο *SAP 2000* δίνονται δυο δυνατότητες συνδυασμού φορτίων:

- Μέσω κατάλληλης φορτιστικής κατάστασης *Load Case*: Θα πρέπει να τεθούν τα επιθυμητά φορτία του συνδυασμού και οι κατάλληλοι συντελεστές *Scale Factors* στο πεδίο *Loads Applied*. Σημειώνεται πως με τον τρόπο αυτόν μπορούν να συνδυαστούν μόνο φορτία ίδιου τύπου, δηλαδή μόνο στατικά φορτία ή μόνο δυναμικά φορτία κτλ.
- Μέσω συνδυασμού φόρτισης *Load Combination*: Μπορούν να γίνουν συνδυασμοί που περιλαμβάνουν ταυτόχρονα μόνιμα, μεταβλητά και σεισμικά φορτία με τους κατάλληλους συντελεστές. Επίσης, τα επιμέρους φορτία μπορούν να συνδυαστούν με διάφορους τρόπους μεταξύ τους, όπως αλγεβρική άθροιση (*Linear Add*), άθροιση απόλυτων τιμών (*Absolute Add*), τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων (*SRSS*), αλλά και να ζητηθεί η εμφάνιση των μέγιστων αποτελεσμάτων επιλεγμένων φορτιστικών καταστάσεων και συνδυασμών (*Envelope*).
- Επισημαίνεται πως ο συνδυασμός μέσω του *Load Case* αφορά συνδυασμένη δράση των φορτίων στην κατασκευή, ενώ ο συνδυασμός μέσω του *Load Combination* αφορά συνδυασμό των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από τη δράση του κάθε φορτίου χωριστά. Στην περίπτωση της γραμμικής, ελαστικής ανάλυσης, λόγω της ισχύος της αρχής της επαλληλίας, τα αποτελέσματα από τις δυο αυτές προσεγγίσεις συμπίπτουν.

2.6.4. Ανάθεση φορτίων στον φορέα

Η ανάθεση των φορτίων γίνεται αφού επιλεγεί ο κόμβος στην κορυφή του προβόλου, με χρήση της εντολής *Assign → Joint Loads → Forces* (Σχήμα 2.18). Επιλέγεται το *Load Pattern* στο οποίο θα οριστεί η τιμή του κάθε φορτίου, και στο κατάλληλο πεδίο, ανάλογα με τη διεύθυνση και τον τύπο του φορτίου (*Force* για δύναμη ή *Moment* για ροπή), δίνεται η τιμή του φορτίου. Το φορτίο που ανατίθεται εμφανίζεται κάθε φορά μόνο στο παράθυρο το οποίο ήταν ενεργό. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το δεύτερο φορτίο. Σημειώνεται πως η επιλογή *Replace Existing Loads* έχει ως αποτέλεσμα τη διαγραφή των ήδη υφισταμένων επικόμβιων φορτίων του ίδιου *Load Pattern*, άρα δεν επηρεάζει τα υπόλοιπα φορτία. Έτσι, εφόσον πρώτα οριστεί το φορτίο F (στη μορφή φόρτισης *FORCE*), όταν στη συνέχεια γίνει ο ορισμός της ροπής στο M (στη διαφορετική μορφή φόρτισης *MOMENT*) δεν θα αντικατασταθεί η δύναμη F=100 που είχε οριστεί προηγουμένως, καθώς αναφέρεται σε άλλο *Load Pattern*.

Η εμφάνιση των ροπών στο πρόγραμμα γίνεται διανυσματικά, με βέλος με διπλή απόληξη που δείχνει τον άξονα γύρω από τον οποίο ασκείται η ροπή. Συνεπώς, είναι σκόπιμο η εφαρμογή της να γίνει στο παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης (συνήθως το αριστερά), έτσι ώστε μετά τον ορισμό του φορτίου να είναι δυνατή η εμφάνιση του -εκτός επιπέδου- διανύσματος. Η τελική εικόνα που λαμβάνεται φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Σημειώνεται πως είναι δυνατή η εμφάνιση ενός μόνο *Load Pattern* σε κάθε παράθυρο, όπως φαίνεται στον τίτλο του παραθύρου, και όχι η ταυτόχρονη προβολή όλων των φορτίων που ανατέθηκαν στον φορέα. Ο έλεγχος της εμφάνισης των υφιστάμενων φορτίων σε κάθε παράθυρο μπορεί να γίνει από την εντολή *Display → Show Load Assigns* και στη συνέχεια επιλογή του *Joint* για τα επικόμβια φορτία ή του *Frame/Cable/Tendon* για τα κατανεμημένα φορτία σε γραμμικό στοιχείο. Επιλογή του *Display → Show Undeformed Shape* (απαραμόρφωτο σχήμα) επαναφέρει την αρχική εικόνα του φορέα κρύβοντας τα φορτία που έχουν ανατεθεί.

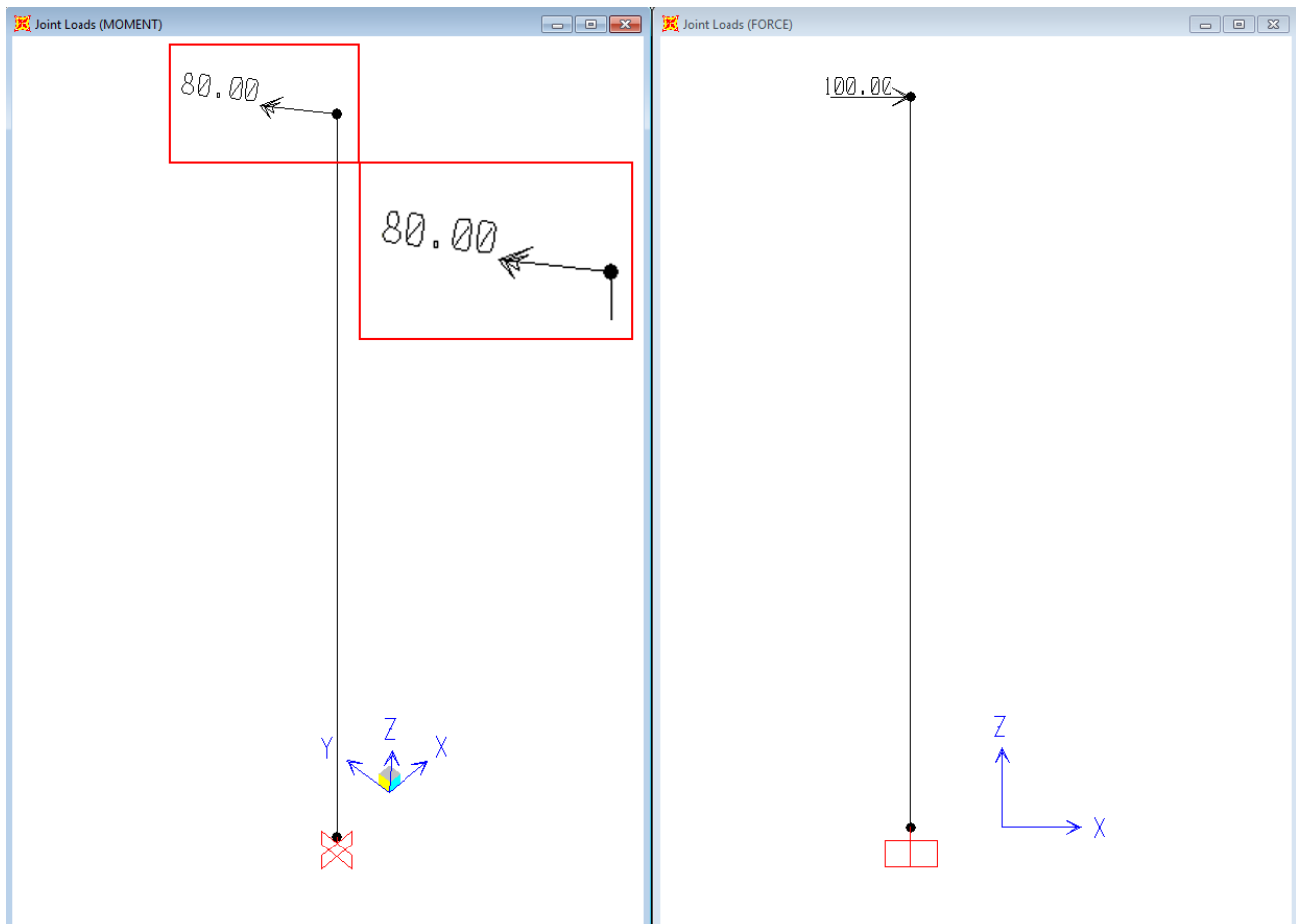


Σχήμα 2.18 Ανάθεση επικόμβιων φορτίων χωριστά σε κάθε *Load Pattern* (εδώ ανάθεση της δύναμης F).

Προσανατολισμός αξόνων συντεταγμένων

Κατά την ανάθεση των φορτίων, και κυρίως των ροπών, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι θετικές φορές του κάθε άξονα. Στα καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων ακολουθείται ο κανόνας του δεξιού χεριού, όπου η θετική φορά ροπής γύρω από έναν άξονα δίδεται από τα δάκτυλα μιας κλειστής παλάμης, όταν ο αντίχειρας δείχνει τη θετική φορά του συγκεκριμένου άξονα.

Υπενθυμίζεται επίσης, πως η σειρά των αξόνων ενός συστήματος συντεταγμένων τύπου XYZ, ΚΛΜ, 123 κτλ, είναι πάντα σαφώς ορισμένη, ενώ η τοποθέτησή τους στον χώρο ακολουθεί τη λογική: Αντίχειρας-άξονας Α, Δείκτης-άξονας Β και Μέσος-άξονας Γ, των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Α.



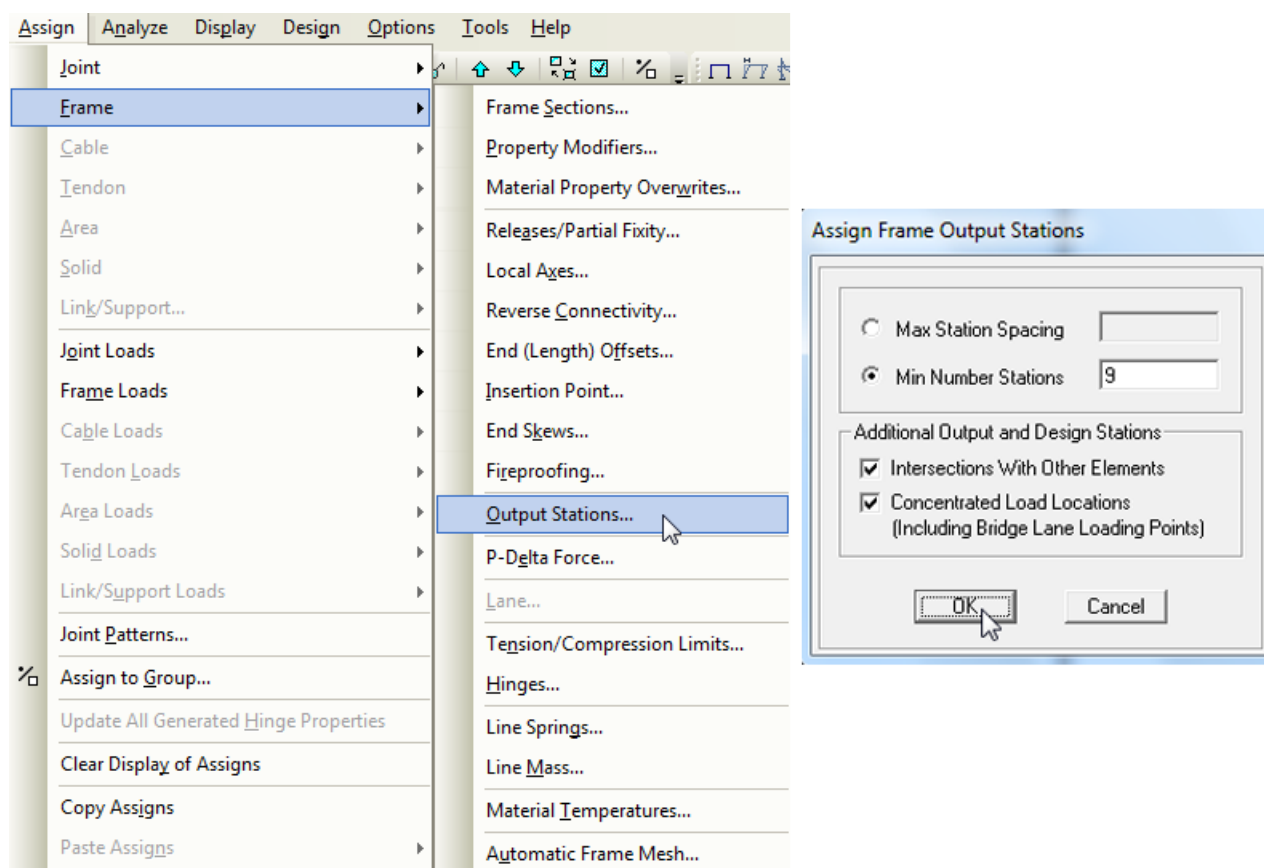
Σχήμα 2.19 Εικόνα του φορέα με τα φορτία (η ροπή δίνεται διανυσματικά γύρω από άξονα Y, όπως φαίνεται στο αριστερά παράθυρο με το βέλος με διπλή απόληξη).

2.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων

Ο υπολογισμός και η αναφορά των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γίνεται σε συγκεκριμένες θέσεις (*output stations*) στον φορέα. Τα άκρα των γραμμικών στοιχείων αποτελούν πάντα θέσεις υπολογισμού και αναφοράς αποτελεσμάτων, ενώ η απόσταση/πυκνότητα των ενδιάμεσων θέσεων μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη. Όπως επισημαίνεται και στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, είθισται οι θέσεις ελέγχου να είναι πυκνότερες στις δοκούς, λόγω της μεταβλητής θέσης των μέγιστων εντατικών μεγεθών κατά μήκος τους, και λιγότερο πυκνές στα υποστυλώματα όπου τα μέγιστα εντατικά μεγέθη υπό συνηθισμένους τύπους φόρτισης εντοπίζονται στα άκρα τους.

Για να μην υπάρξει κάποια αμφιβολία κατά την ανάγνωση αποτελεσμάτων, ακόμη και κατά μήκος των δοκών, επιλέγεται στο παρόν η πυκνωση των θέσεων ελέγχου, ώστε να είναι κοινή σε δοκούς και υποστυλώματα. Αυτό γίνεται με την επιλογή ολόκληρου του φορέα (*Ctrl+A* ή το εργαλείο *All* της κατακόρυφης σειράς εργαλείων στο αριστερά μέρος της οθόνης) και την εντολή *Assign* → *Frame* → *Output Stations*, όπου επιβεβαιώνεται η προεπιλεγμένη τιμή *9* που ανατίθεται με *OK* (Σχήμα 2.20). Η συγκεκριμένη ενέργεια θα έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της απόκρισης σε έναν επαρκή αριθμό θέσεων κατά

μήκος των γραμμικών στοιχείων και συνεπώς τη λεπτομερέστερη παρουσίαση των σχετικών διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών απόκρισης. Όπως παρατηρείται στο σχήμα, οι θέσεις διασταύρωσης με άλλα στοιχεία (*Intersections With Other Elements*) και οι θέσεις επιβολής συγκεντρωμένων φορτίων (*Concentrated Load Locations*) αποτελούν επίσης θέσεις ελέγχου των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

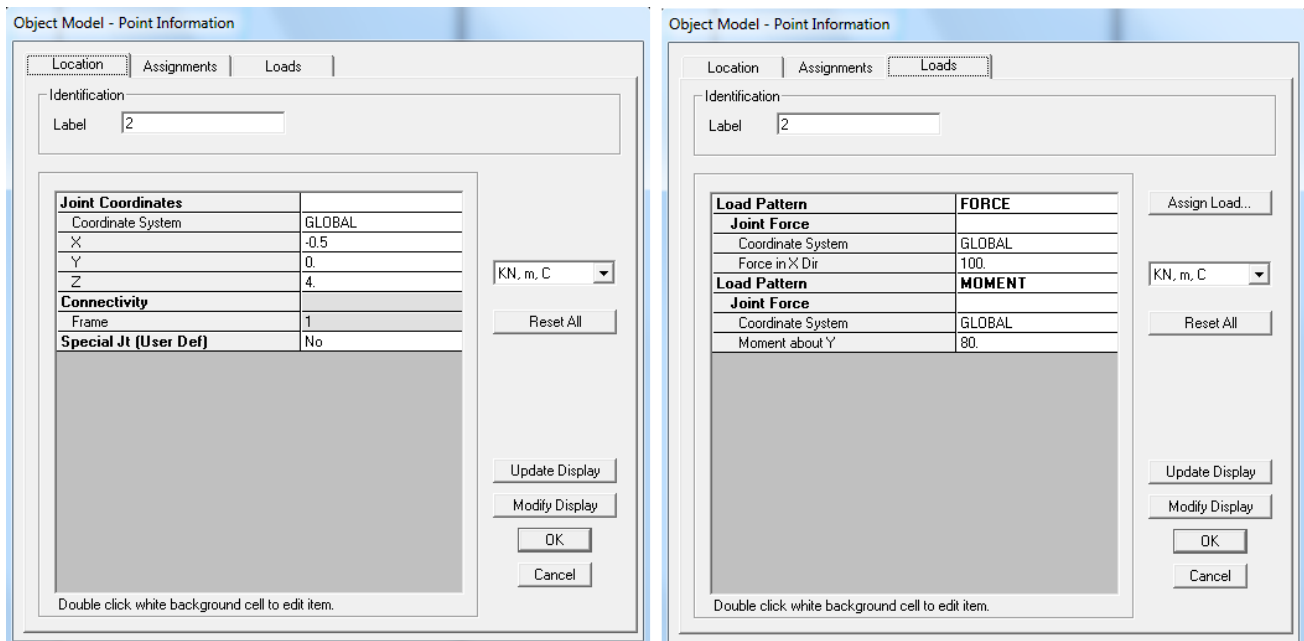


Σχήμα 2.20 Πύκνωση θέσεων ελέγχου (output stations) στον φορέα.

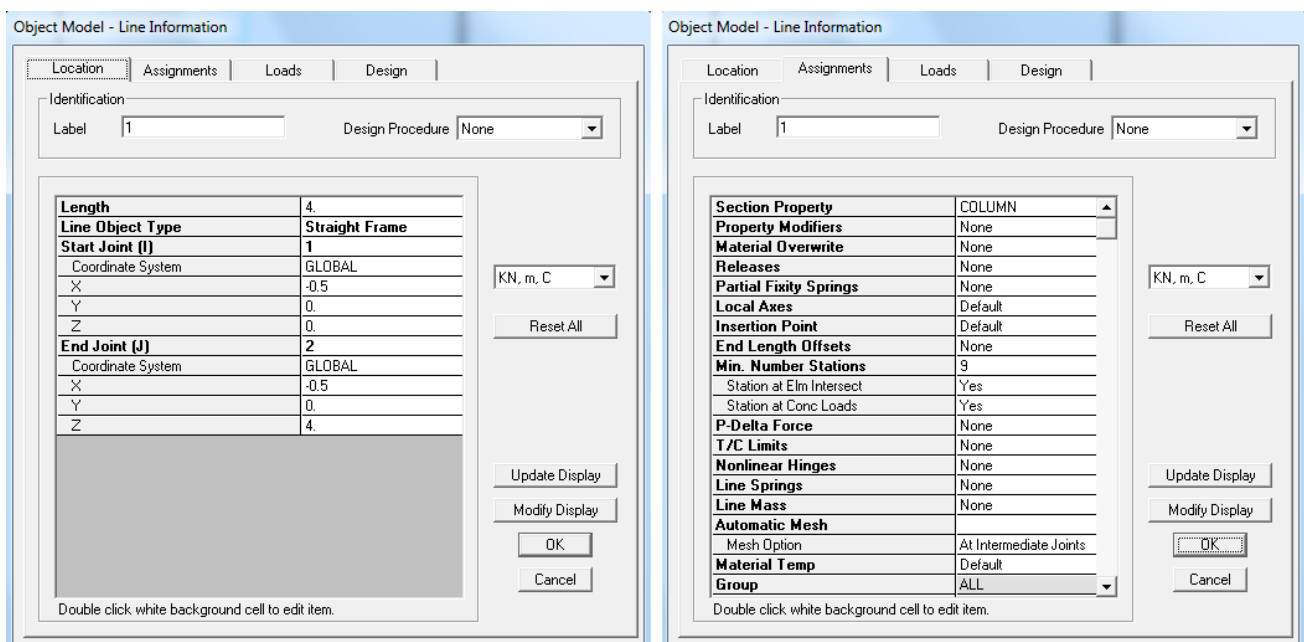
2.8. Γρήγορος έλεγχος προσομοιώματος

Πριν τη διαδικασία της ανάλυσης είναι σκόπιμο να γίνει ένας γρήγορος έλεγχος των στοιχείων του προσομοιώματος. Πέρα από την αναλυτική ανάγνωση των δεδομένων από τις σχετικές εντολές του *menu*, με χρήση της επιλογής *Modify/Show*, ένας γρήγορος έλεγχος των ιδιοτήτων γραμμικών στοιχείων και κόμβων μπορεί να γίνει με δεξί *click* στα εν λόγω στοιχεία. Ενδεικτικά, με δεξί *click* στον κόμβο κορυφής (Σχήμα 2.21), εμφανίζονται οι συντεταγμένες των κόμβων (καρτέλα *Location*) και τα επικόμβια φορτία (καρτέλα *Loads*). Στο Σχήμα 2.7, για τον κόμβο βάσης του φορέα, είχαν εμφανιστεί οι δεσμεύσεις των βαθμών ελευθερίας της στήριξης (καρτέλα *Assignments*). Με δεξί *click* στο γραμμικό στοιχείο του προβόλου (Σχήμα 2.22), φαίνεται στην καρτέλα *Location* η συνδεσμολογία και το μήκος του (*Length*), στην καρτέλα *Assignments* το είδος της διατομής (*Section Property*), στην καρτέλα *Loads* τυχόν κατανεμημένα φορτία κτλ.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, η εμφάνιση των φορτίων σε κάθε παράθυρο μπορεί να γίνει από την εντολή *Display* → *Show Load Assigns* και στη συνέχεια επιλογή του *Joint* για τα επικόμβια φορτία ή του *Frame/Cable/Tendon* για τα κατανεμημένα φορτία σε γραμμικό στοιχείο.



Σχήμα 2.21 Πληροφορίες κόμβου κορυφής (εμφάνιση με δεξιά click στον κόμβο).



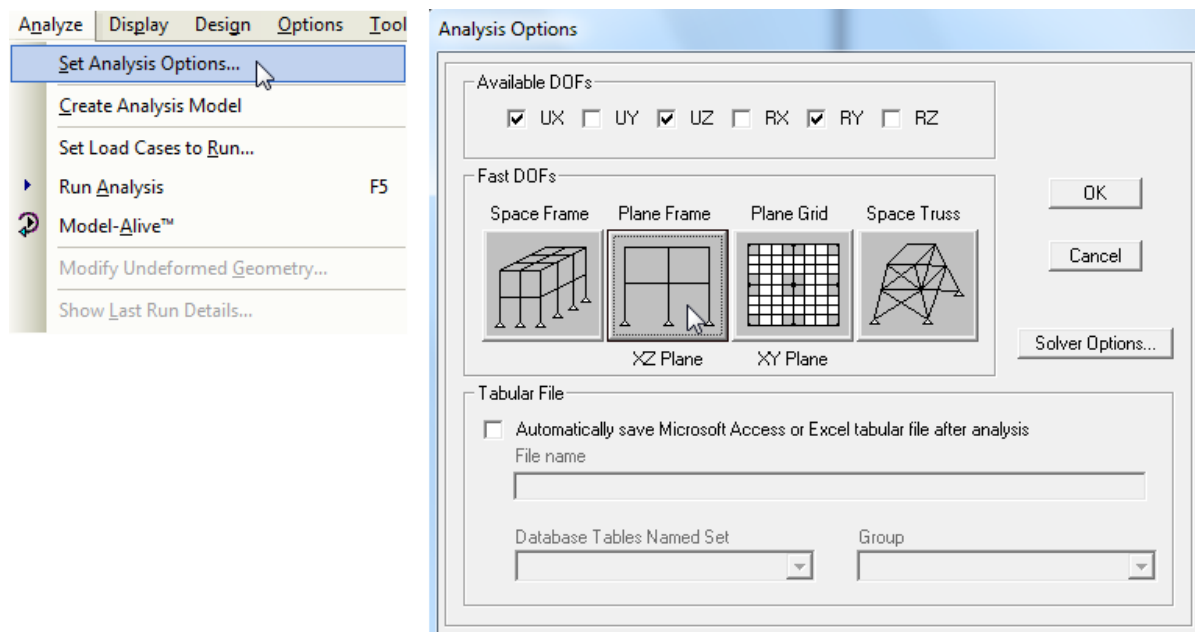
Σχήμα 2.22 Πληροφορίες γραμμικού στοιχείου (εμφάνιση με δεξιά click στο γραμμικό στοιχείο).

2.9. Ανάλυση φορέα

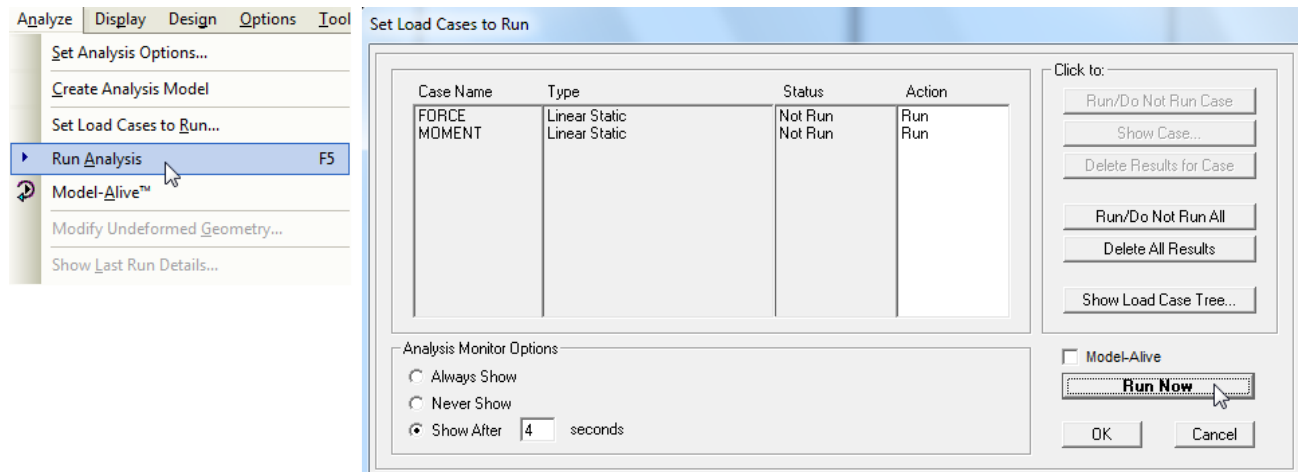
Καθώς τόσο ο φορέας όσο και τα επιβαλλόμενα φορτία αφορούν πρόβλημα στο επίπεδο (η φόρτιση προκαλεί παραμόρφωση στο επίπεδο XZ), υπάρχει η δυνατότητα (δίχως να είναι απαραίτητο) να οριστεί επίπεδη ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται από την εντολή *Analyze* → *Set Analysis Options* και επιλογή του δεύτερου εικονιδίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23. Με την συγκεκριμένη εντολή διατηρούνται μόνο οι βαθμοί ελευθερίας που σχετίζονται με απόκριση στο επίπεδο XZ , δηλαδή οι μετακινήσεις κατά X και Z και η στροφή γύρω από άξονα Y . Σε αντίστοιχες περιπτώσεις όπου περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του φορέα, θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην δεσμεύονται υπαρκτές καταστάσεις

παραμόρφωσης (π.χ. επιλογή επίπεδης ανάλυσης για φορέα που αναμένεται να παρουσιάσει απόκριση εκτός επιπέδου, θα οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα).

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now* (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.23 Επιλογή ανάλυσης του φορέα στο επίπεδο XZ.



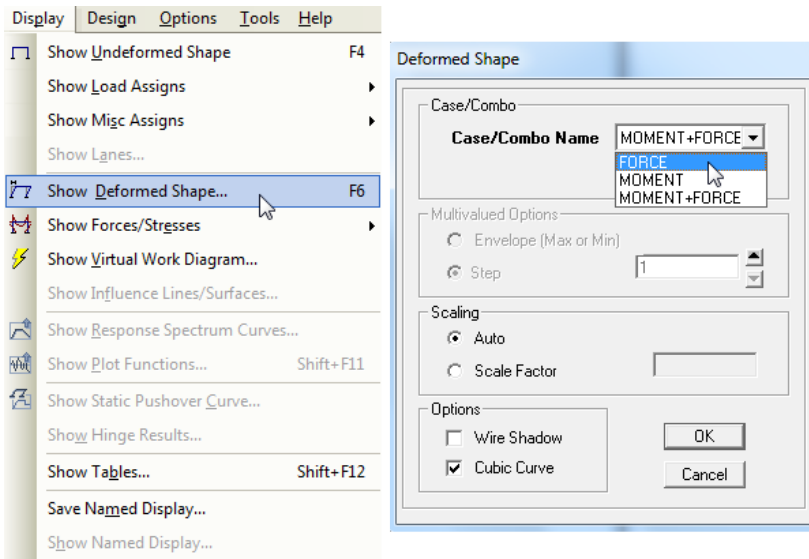
Σχήμα 2.24 Εκκίνηση της διαδικασίας ανάλυσης του φορέα.

2.10. Αποτελέσματα

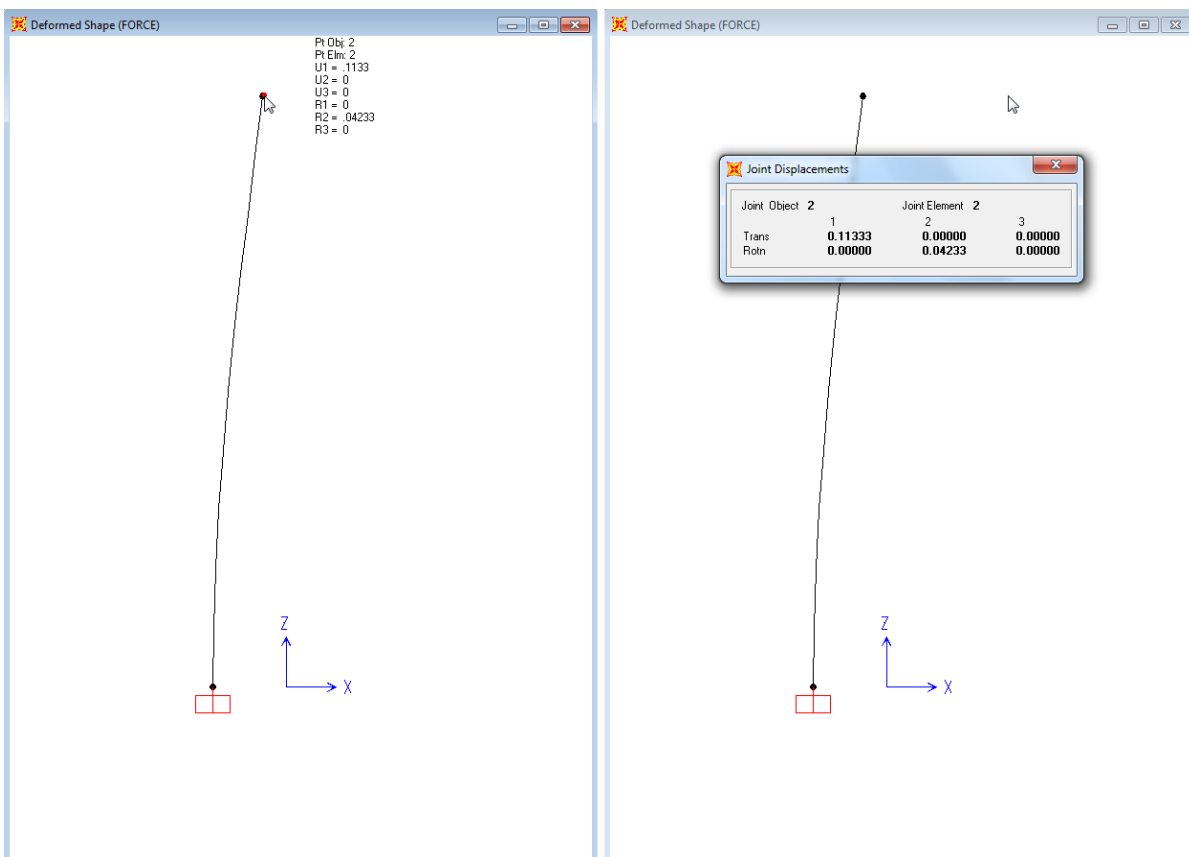
2.10.1. Παραμορφωμένη γραμμή και μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις του φορέα στους διάφορους κόμβους εμφανίζονται μέσω της παραμορφωμένης γραμμής για την κάθε φορτιστική κατάσταση. Η παραμορφωμένη γραμμή μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε από τα δυο παράθυρα είναι βολικότερο για τον χρήστη. Έτσι, από την εντολή *Display* → *Show Deformed Shape* (Σχήμα 2.25), επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και με *OK* εμφανίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα.

Όταν ο κέρσορας πλησιάζει σε κάποιον από τους κόμβους εμφανίζονται οι μετακινήσεις του για τα συγκεκριμένα φορτία που επιλέχθηκαν, ενώ η σχετική ένδειξη υπάρχει και στον τίτλο του παραθύρου (Σχήμα 2.26, αριστερά). Οι τιμές των μετακινήσεων μπορούν να φανούν με μεγαλύτερη ακρίβεια σε ξεχωριστό παράθυρο, με δεξιά *click* στον εξεταζόμενο κόμβο (Σχήμα 2.26 δεξιά), όπου *Trans* είναι οι μετατοπίσεις και *Rotn* οι στροφές. Οι άξονες 1-2-3 αντιστοιχούν στους γενικούς άξονες X-Y-Z (ισχύει μόνο για τους κόμβους, όπως αναλύεται στο Παράρτημα Α). Η επιστροφή στην απαραμόρφωτη κατάσταση γίνεται με το *Display* → *Show Undeformed Shape*.



Σχήμα 2.25 Διαδικασία εμφάνισης παραμορφωμένης γραμμής φορέα για τη φορτιστική κατάσταση FORCE.

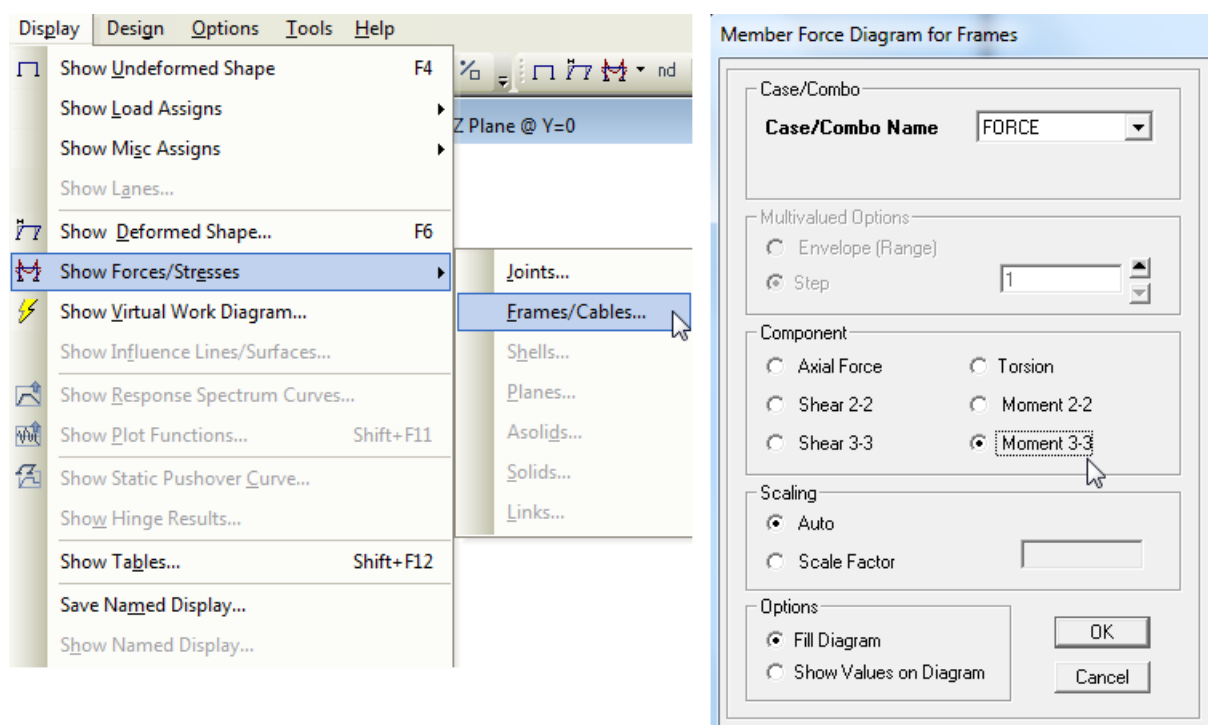


Σχήμα 2.26 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής και μετακινήσεων κόμβου κορυφής (φορτιστική κατάσταση FORCE).

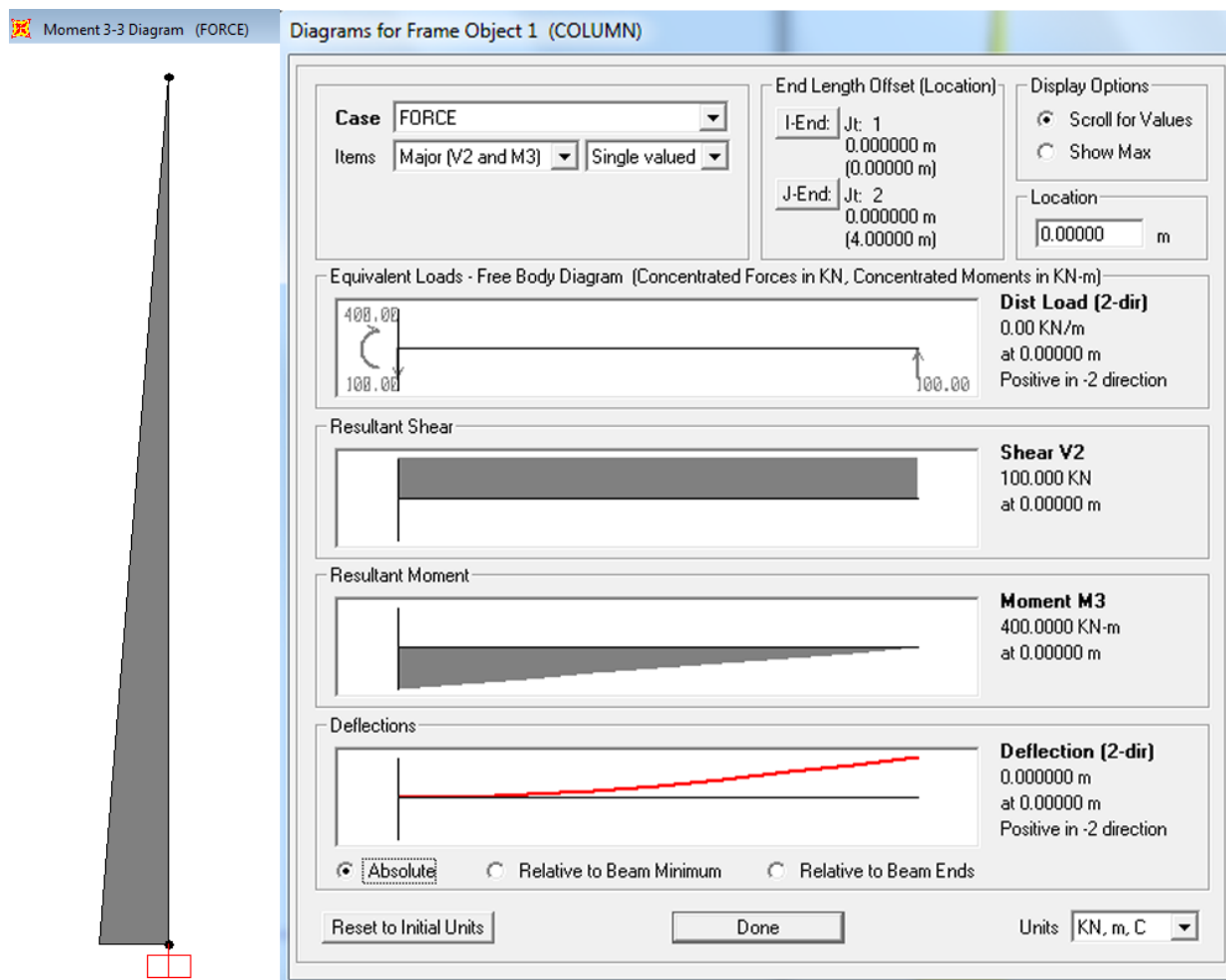
2.10.2. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Για την εμφάνιση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών χρησιμοποιείται η εντολή *Display* → *Show Forces/Stresses* → *Frames/Cables* (Σχήμα 2.27, αριστερά). Στη συνέχεια επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και ζητείται το επιθυμητό εντατικό μέγεθος (Σχήμα 2.27, δεξιά). Η επιλογή *Moment 3-3* θα οδηγήσει στην εμφάνιση του διαγράμματος καμπτικών ροπών (αναλυτική επεξήγηση της συγκεκριμένης επιλογής, που βασίζεται στους τοπικούς άξονες του γραμμικού στοιχείου, γίνεται στο Παράρτημα Α).

Το διάγραμμα καμπτικών ροπών φαίνεται στο Σχήμα 2.28 (αριστερά), όπου το δεξί *click* πάνω στον άξονα του γραμμικού στοιχείου έχει ως αποτέλεσμα το άνοιγμα του παραθύρου στα δεξιά του ίδιου σχήματος. Εκεί εμφανίζονται όλα τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών ανά ζεύγη που σχετίζονται μεταξύ τους, π.χ. η ροπή *M3* με την τέμνουσα *V2* που αποτελούν τον έντονο συνδυασμό φόρτισης για το δεδομένο πρόβολο. Από το *Items* μπορούν να επιλεγούν άλλα εντατικά μεγέθη, όπως π.χ. η ροπή *M2* και η τέμνουσα *V3*, οι τιμές των οποίων είναι μηδενικές καθώς δεν υπάρχει φόρτιση εκτός επιπέδου. Μηδενική επίσης τιμή έχει και η αξονική δύναμη *Axial*. Αλλάζοντας το *Case* παρουσιάζονται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για άλλη φορτιστική κατάσταση στο ίδιο γραμμικό στοιχείο. Η επιλογή *Show Max* δείχνει τη μέγιστη τιμή για το κάθε εμφανιζόμενο μέγεθος.



Σχήμα 2.27 Εμφάνιση διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών για τη φορτιστική κατάσταση *FORCE*.



Σχήμα 2.28 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για τη φορτιστική κατάσταση FORCE.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 2^{ου} Κεφαλαίου

CEN (2002). *EN 1990: Eurocode: Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardisation.

CEN (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.

Computers and Structures Inc. (2010). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA: CSI.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΚΩΣ 2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

Προσομοίωση επίπεδου πλαισιακού φορέα

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 3 παρουσιάζονται, με τη βοήθεια εφαρμοσμένου παραδείγματος, τα βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες που απαιτούνται κατά την προσομοίωση ενός απλού φορέα υπό στατική φόρτιση. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: ρηγματωμένες διατομές σκυροδέματος (στάδιο II), ιδιότητες διατομής κατά την ανάλυση, συνεργαζόμενο πλάτος δοκού, συνδυασμοί δράσεων (με διάρκεια και σεισμικοί), συνυπολογισμός ίδιου βάρους δομικών στοιχείων, εφαρμογή κατανεμημένων φορτίων σε γραμμικό στοιχείο, διαφραγματική λειτουργία πλακών.

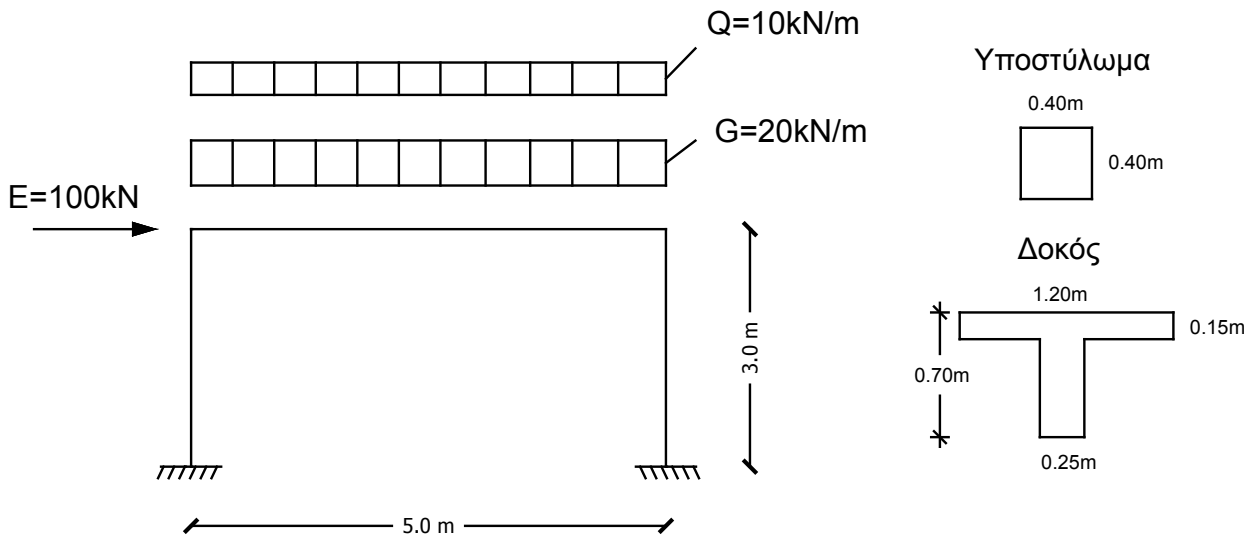
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, ικανότητα ανάγνωσης κανονιστικών κειμένων, όπως και τα αντικείμενα που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

3.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του επίπεδου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος που περιγράφεται στο Σχήμα 3.1, για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης. Να ληφθούν υπόψη τα εξής στοιχεία:

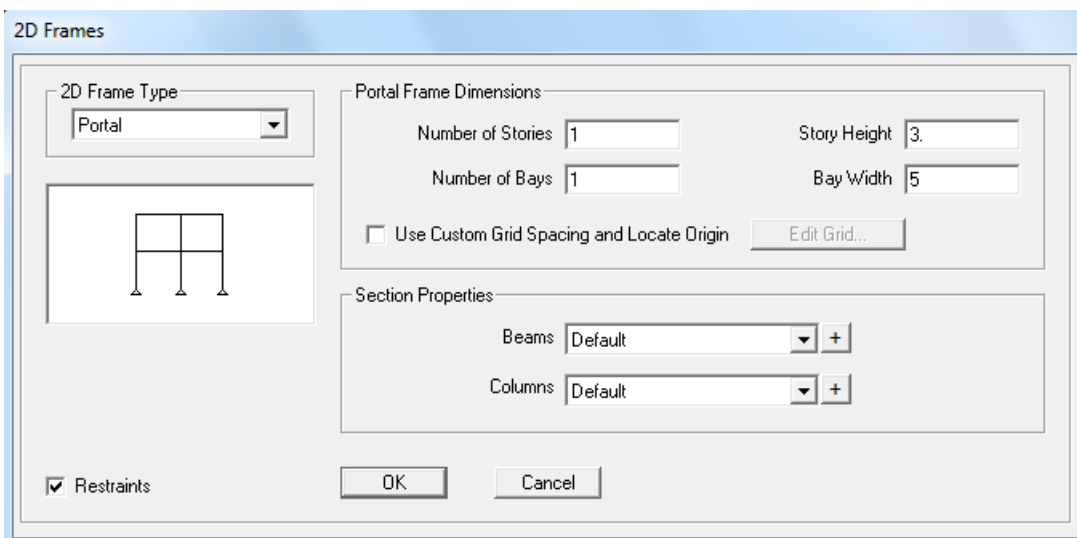
- Η οριζόντια δύναμη E θεωρείται σεισμικό φορτίο, το κατανεμημένο φορτίο G μόνιμη δράση και το Q μεταβλητή δράση.
- Το υλικό να ληφθεί με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 3.1 Πλαίσιο υπό στατική φόρτιση (κατανεμημένα και σημειακά φορτία) και σκαρίφημα διατομών δοκού-υποστυλμάτων.

3.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα

Για την εισαγωγή του επίπεδου πλαισιακού φορέα της εκφώνησης, θα χρησιμοποιηθεί εκ νέου πρότυπος φορέας από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος. Όπως και στο παράδειγμα του προηγούμενου Κεφαλαίου, ο ορισμός νέου προβλήματος γίνεται από την εντολή *File* → *New Model*, όπου αφού οριστούν οι κατάλληλες *μονάδες μέτρησης* (*kN, m, C*), επιλέγεται το επίπεδο πλαίσιο (*2D Frames*) που οδηγεί στην εικόνα του Σχήματος 3.2. Στα κατάλληλα πεδία ορίζονται τα επιθυμητά στοιχεία γεωμετρίας του φορέα, δηλαδή ο αριθμός ορόφων (*Number of Stories*) και το ύψος του κάθε ορόφου (*Story Height*), ο αριθμός ανοιγμάτων (*Number of Bays*) και το μήκος του κάθε ανοίγματος (*Bay Width*), όπως και η ύπαρξη στηρίξεων (*Restraints*) στη βάση των δομικών στοιχείων.

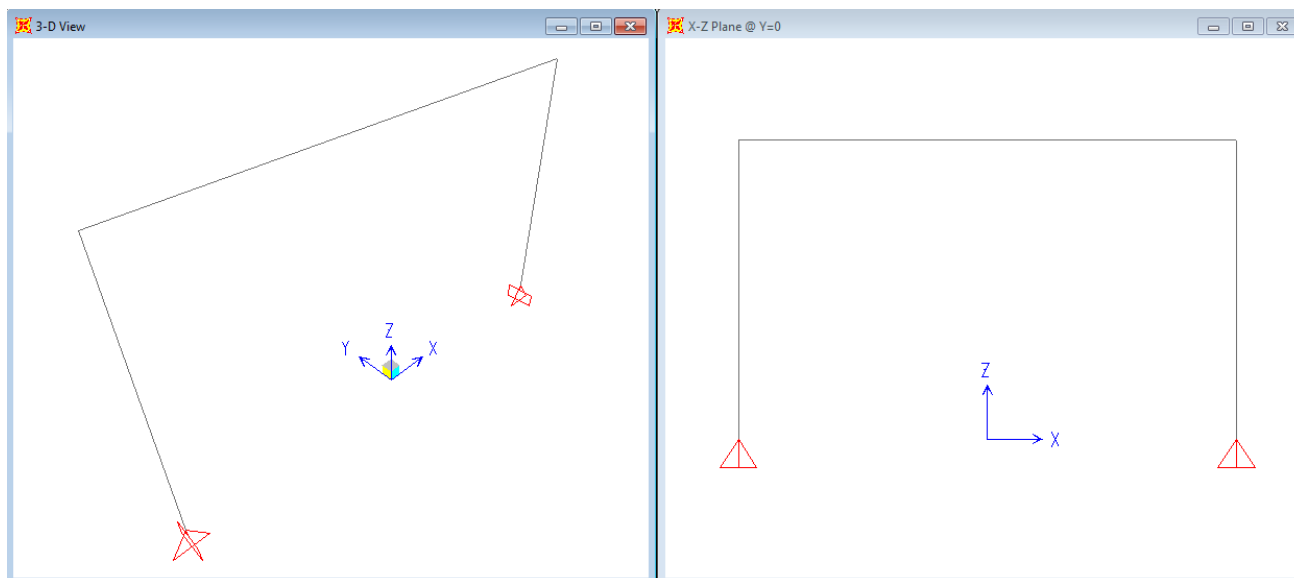


Σχήμα 3.2 Καθορισμός παραμέτρων γεωμετρίας πλαισίου.

Αφού επιλεγεί το **OK**, εμφανίζεται στην οθόνη η εικόνα του Σχήματος 3.3. Στο αριστερά παράθυρο φαίνεται η τρισδιάστατη όψη του φορέα και στο δεξιά η όψη στο επίπεδο **XZ**, όπως άλλωστε αναγράφεται στον τίτλο του κάθε παραθύρου.

Όμοια με το προηγούμενο παράδειγμα, γίνεται αντικατάσταση των αρθρώσεων με πακτώσεις στις βάσεις των υποστυλωμάτων. Επίσης, για την καλύτερη εποπτεία των πεπερασμένων στοιχείων του φορέα, είναι σκόπιμο να επιλεγεί η εμφάνιση των κόμβων από την εντολή **View → Set Display Options**, όπου πρέπει να αποεπιλεγεί το πεδίο **Invisible** στους κόμβους (**Joints**).

Σε αυτό το σημείο μπορεί να γίνει και αποθήκευση του αρχείου, με όνομα **Chapter 03.SDB** και διαδρομή φακέλου αποθήκευσης που πληροί τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 3.3 Μορφή εισαγόμενου πλαισίου.

3.3. Ορισμός υλικού

Ο ορισμός των υλικών στο πρόγραμμα γίνεται από το **Define → Materials**, όπου με **Add New Material** δημιουργείται το νέο υλικό (ονομασία **MATERIAL**) βάσει των δεδομένων που δίνονται στην εκφώνηση, με τρόπο όμοιο με το παράδειγμα του Κεφαλαίου 2. Σημειώνεται πως η τιμή του λόγου Poisson έχει δοθεί μηδενική, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των Κανονισμών για ρηγματωμένες διατομές σκυροδέματος (**EC2 §3.1.3(4)- ΕΚΩΣ 2000 §Σ.2.5.3**).

Υπενθυμίζεται τέλος, ότι η επιλογή **Other** στο υλικό που δημιουργείται έχει ως αποτέλεσμα την απλοποίηση της φόρμας εισαγωγής και τη μείωση των απαιτούμενων δεδομένων, καθώς γίνεται σαφές πως το υλικό θα έχει αυστηρά γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

3.4. Ορισμός διατομών δομικών στοιχείων φορέα

3.4.1. Καθορισμός στοιχείων διατομών

Ο ορισμός των διατομών γίνεται από το **Define → Section Properties → Frame Sections**, όπου για την προσθήκη νέας διατομής επιλέγεται το **Add New Property**.

Για τα υποστυλώματα ορίζεται ορθογωνική διατομή με το επιθυμητό όνομα και τις κατάλληλες διαστάσεις, μέσω της ομάδας διατομών **Concrete** με την επιλογή **Rectangular** (Σχήμα 3.4). Επιλέγοντας το **Section**

Properties (ιδιότητες διατομής), εμφανίζεται ένα παράθυρο που αναγράφονται αναλυτικά οι γεωμετρικές ιδιότητες που υπολογίστηκαν από τις διαστάσεις της διατομής (αριστερά στο Σχήμα 3.4). Έτσι, το εμβαδόν της διατομής (*Cross-section area*) ισούται με $A=0.4 \cdot 0.4=0.16\text{m}^2$, όπως ακριβώς αναφέρεται στο σχετικό πεδίο του σχήματος. Αντίστοιχα, η ροπή αδρανείας ισούται με $I=0.4 \cdot 0.4^3/12=2.133 \cdot 10^{-3}$, όπως επίσης φαίνεται στο πεδίο *Moment of Inertia*.

Επιλέγοντας από το παράθυρο ορισμού της διατομής το *Set Modifiers*, εμφανίζεται ένα παράθυρο με συντελεστές τροποποίησης των γεωμετρικών ιδιοτήτων της διατομής (Σχήμα 3.4, δεξιά). Στο παράθυρο αυτό μπορεί να οριστεί από τον χρήστη η απομείωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής, ώστε να πληρούν τις κανονιστικές διατάξεις για ρηγματωμένες διατομές οπλισμένου σκυροδέματος (Παράρτημα Β). Οι τιμές που τίθενται στο σχήμα καθορίζονται από τον *EC8 §4.3.1(7)* (Πίνακας Β.1), ενώ επισημαίνεται πως διατηρείται και η πρόταση του *EAK 2000 §3.2.3(2)* για απομείωση της δυστρεψιάς των στοιχείων στο 1/10 της αρχικής της τιμής. Τα πεδία που ενδιαφέρουν αφορούν τη ροπή αδρανείας της διατομής σε κάμψη (*Moment of Inertia*), το εμβαδόν ολίσθησης διατομής (*Shear Area*) που σχετίζεται με τη δυστημσία της διατομής, όπως και τον συντελεστή δυστρεψιάς (*Torsional Constant*).

Στην περίπτωση του συγκεκριμένου φορέα ζητήθηκε η χρήση αβαρούς υλικού με μηδενική πυκνότητα, όπως άλλωστε ορίστηκε σε προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης. Εναλλακτικά ή συμπληρωματικά στον ορισμό μηδενικής τιμής ειδικού βάρους και πυκνότητας στις ιδιότητες υλικού, μπορεί να τεθεί μηδενικός συντελεστής *Modifier* στα πεδία *Mass* και *Weight* του παραθύρου τροποποίησης ιδιοτήτων, όπως φαίνεται στο κάτω δεξιά παράθυρο του Σχήματος 3.4. Έτσι, ακόμη και αν στο υλικό είχε δοθεί κανονικά ειδικό βάρος και πυκνότητα, το ίδιο βάρος και η μάζα του συγκεκριμένου δομικού στοιχείου στο οποίο θα ανατεθεί η διατομή θα λαμβάνεται ίσο με το μηδέν.

Ιδιότητες διατομής κατά την ανάλυση

Κατά τη γραμμική ελαστική ανάλυση φορέα, θα πρέπει να σημειωθεί πως το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη τις τιμές των γεωμετρικών ιδιοτήτων που εμφανίζονται στο *Section Properties*, αδιαφορώντας για το ακριβές σχήμα από το οποίο αυτές έχουν προέλθει. Κατά συνέπεια, το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να προκύψει εφόσον χρησιμοποιηθούν δυο εντελώς διαφορετικά σχήματα διατομών, αρκεί να οδηγούν στις ίδιες γεωμετρικές ιδιότητες που υπολογίζονται στο συγκεκριμένο παράθυρο. Προφανώς, οι τελικές τιμές των ιδιοτήτων αυτών κατά την επίλυση θα προκύψουν με τον συνυπολογισμό και των τυχόν τροποποιητικών συντελεστών από το πεδίο *Modifiers*.

Απομείωση χαρακτηριστικών λόγω ρηγματωμένης διατομής σκυροδέματος (στάδιο II)

Όπως αναφέρεται στον *EC8 §4.3.1(7)*, τα ελαστικά καμπτικά και διατμητικά χαρακτηριστικά των ρηγματωμένων (στάδιο II) στοιχείων από σκυρόδεμα μπορούν να ληφθούν ίσα με το ήμισυ των αντίστοιχων τιμών των μη ρηγματωμένων διατομών (στάδιο I). Μια ενδιαφέρουσα και εμπειριστατωμένη ανάλυση για το θέμα της απομείωσης των ελαστικών χαρακτηριστικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος γίνεται από τους Αβραμίδη, Αθανασοπούλου, Μορφίδη και Σέξτο (2011), όπου μεταξύ άλλων προτείνεται και η απομείωση της δυστρεψιάς της διατομής στο 10% της αρχικής της τιμής (σταδίου I). Αντίστοιχη πρόβλεψη για απομείωση της δυστρεψιάς προτείνεται και από τον αμερικανικό Κανονισμό ACI 318-11 (§R8.7), όπου συνίσταται σημαντική απομείωση της δυστρεψιάς των δομικών στοιχείων (πρακτικά αγνοείται), στην περίπτωση που αυτή δεν αποτελεί βασικό στοιχείο για τη στατική ισορροπία του φορέα.

Υπενθυμίζεται πως οι αντίστοιχες διατάξεις του *Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (EAK 2000 §3.2.3(2))* περιλαμβάνουν διαφορετικές τιμές για την απομείωση των ελαστικών ιδιοτήτων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, η δυσκαμψία για τις δοκούς λαμβάνεται στο ήμισυ της αρχικής της τιμής, ενώ στα τοιχώματα στα 2/3 της αρχικής τιμής σταδίου I. Η στρεπτική δυσκαμψία (ορθότερα δυστρεψία) όλων των στοιχείων λαμβάνεται στο 1/10 της αρχικής τιμής.

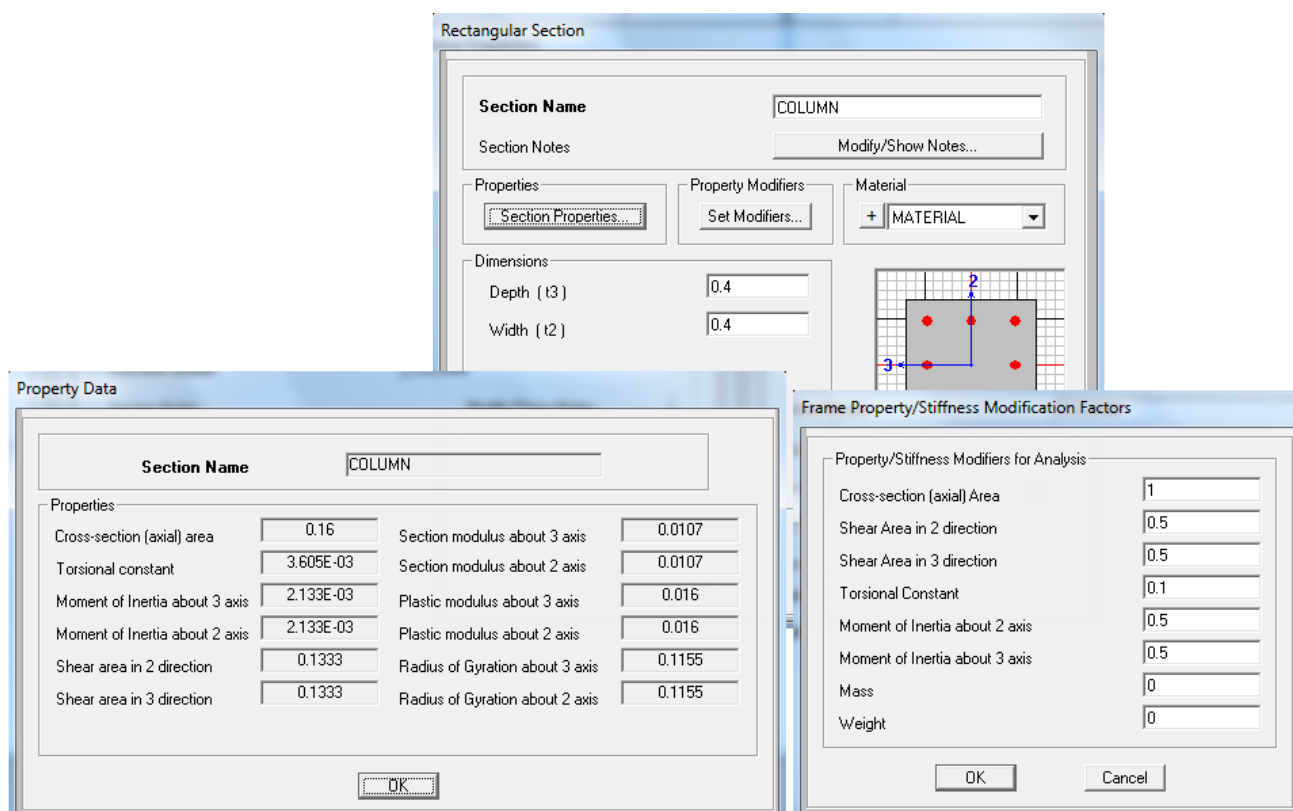
Τέλος, στα σχόλια του *EAK 2000 §3.2.3[2]* αναφέρονται διαφορετικές συνιστώμενες τιμές για την απομείωση της δυσκαμψίας δοκών και υποστυλωμάτων, με την ενεργό δυσκαμψία να ισούται στις δοκούς

με το 0.40 της αρχικής της τιμής, στα περιμετρικά υποστυλώματα 0.60 και στα εσωτερικά υποστυλώματα 0.80.

Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τα παραπάνω, όπως και πίνακες με τις απαιτήσεις του κάθε Κανονισμού, μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Β.

Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων διατομής (Modifiers)

Λόγω ρηγματώσης, όπως προβλέπεται από τις κανονιστικές διατάξεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να γίνει απομείωση της δυσκαμψίας, δυστένειας ή/και δυστρεψίας των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος. Ο καθένας από τους παραπάνω όρους ελαστικών χαρακτηριστικών περιλαμβάνει ένα γινόμενο μιας ιδιότητας υλικού (μέτρο ελαστικότητας E ή μέτρο διάτμησης G) και μιας γεωμετρικής ιδιότητας διατομής (ροπή αδράνειας σε κάμψη ή σε στρέψη ή τεκμαρτό εμβαδόν ολίσθησης). Το γινόμενο αυτό συσχετίζει τα μεγέθη της επιβαλλόμενης έντασης με αυτά της εσωτερικής παραμόρφωσης του δομικού στοιχείου (Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013). Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται γραμμικά στοιχεία κατά την προσομοίωση, η απομείωση των συγκεκριμένων όρων που επιβάλλεται από τους Κανονισμούς γίνεται πολύ εύκολα, με την απομείωση της αντίστοιχης γεωμετρικής ιδιότητας της διατομής (πεδίο *Modifiers* που παρουσιάστηκε προηγουμένως). Δεν χρειάζεται συνεπώς παρέμβαση στην εμπλεκόμενη τιμή της ιδιότητας του υλικού που χρησιμοποιείται, κάτι που ενδέχεται να αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή σε περιπτώσεις που η απομείωση της γεωμετρικής ιδιότητας δεν είναι εφικτή.



Σχήμα 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής υποστυλώματος και απομείωση ιδιοτήτων λόγω ρηγματωμένης διατομής (βάση EC8).

Για τον ορισμό της διατομής της δοκού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μορφή πλακοδοκού, όπως προκύπτει και από το σχετικό σκαρίφημα στην εκφώνηση του παραδείγματος. Καθώς το αντίστοιχο σχήμα δεν υπάρχει στην ομάδα διατομών *Concrete* (σκυρόδεμα) του προγράμματος, η κατάλληλη διατομή θα αναζητηθεί στην ομάδα διατομών *Steel* (χάλυβας), με την ονομασία *Tee*, οπότε και εμφανίζεται η εικόνα

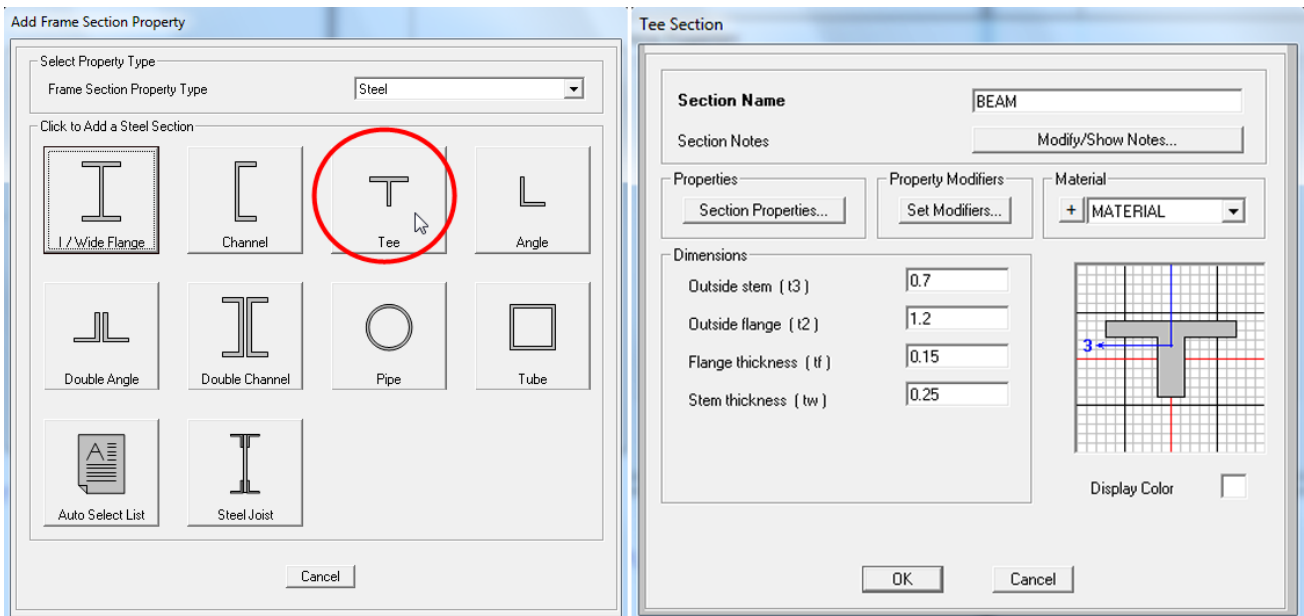
του Σχήματος 3.5. Υπενθυμίζεται πως η επιλογή ενός σχήματος από συγκεκριμένη ομάδα διατομών της βιβλιοθήκης του προγράμματος, δεν είναι δηλωτική του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δομικό στοιχείο, καθώς ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το υλικό που επιθυμεί σε επόμενο στάδιο.

Επιλέγοντας το *Section Properties* (ιδιότητες διατομής) εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου αναγράφονται οι γεωμετρικές ιδιότητες της διατομής πλακοδοκού (αριστερά στο Σχήμα 3.6), αντίστοιχα με τα όσα αναλύθηκαν στην περίπτωση του υποστυλώματος. Τέλος, επιλέγοντας το *Set Modifiers*, εμφανίζεται το παράθυρο με συντελεστές τροποποίησης των γεωμετρικών ιδιοτήτων της διατομής (δεξιά στο Σχήμα 3.6). Εκεί τίθενται οι συντελεστές απομείωσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής δοκού (*EC8 §4.3.1(7)*), όπου και πάλι διατηρείται η πρόταση για απομείωση της δυστρεψιάς των στοιχείων στο 1/10 της αρχικής της τιμής. Τα πεδία που ενδιαφέρουν αφορούν τη ροπή αδρανείας της διατομής σε κάμψη (*Moment of Inertia*), το εμβαδόν ολίσθησης διατομής (*Shear Area*) που σχετίζεται με τη δυστημσία της διατομής, όπως και τον συντελεστή δυστρεψιάς (*Torsional Constant*). Σημειώνεται πως τα πεδία που σχετίζονται με την κάμψη και τη διάτμηση της δοκού εντός του επιπέδου της πλάκας δεν αναμένεται να επηρεάσουν την ανάλυση, καθώς δεν υπάρχουν φορτία που να προκαλούν παραμόρφωση αυτής της μορφής. Στην πραγματικότητα, ακόμη και να υπήρχε αντίστοιχη φόρτιση, η καταπόνηση της δοκού εντός οριζοντίου επιπέδου δεν θα ήταν σημαντική, λόγω της ύπαρξης πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος στο επίπεδο του ορόφου.

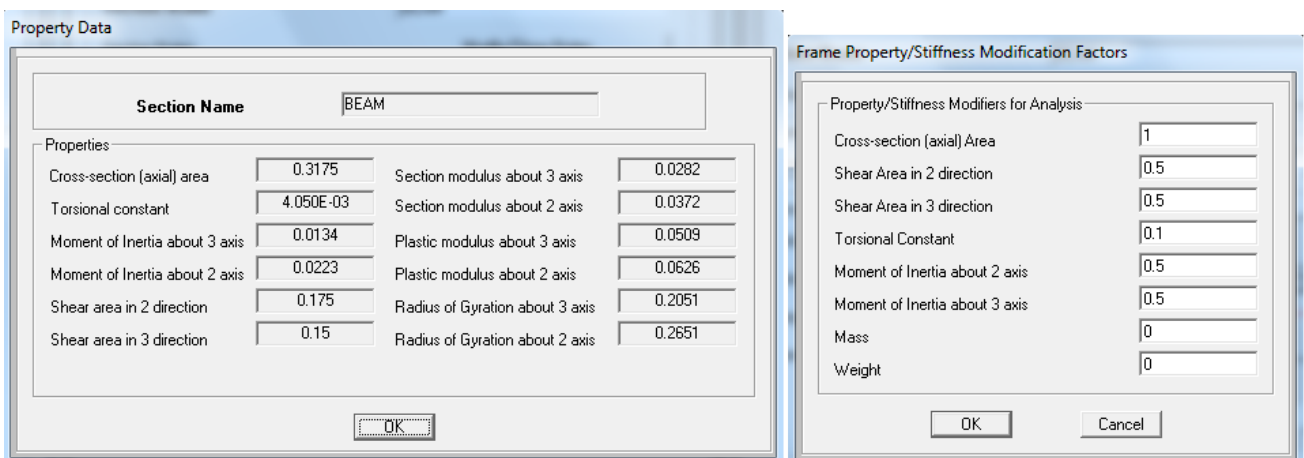
Διατομή πλακοδοκού σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος

Η ολόσωμη κατασκευή δοκών και πλακών σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, έχει ως αποτέλεσμα τη μονολιθική σύνδεση μεταξύ των δυο δομικών στοιχείων, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο κατά τη μελέτη της στατικής λειτουργίας όσο και κατά τη διαστασιολόγηση της δοκού (Ζαράρης & Παπαγιάννη, 1997· Πενέλης, Στυλιανίδης, Κάππος, & Ιγνατάκης, 1995). Η κάμψη της δοκού συμπαρασύρει σε ανάλογη παραμόρφωση και ένα μέρος της πλάκας. Έτσι, οι ορθές θλιπτικές τάσεις από την κάμψη της δοκού δεν περιορίζονται στο πλάτος του κορμού της αλλά συνεχίζουν και μέσα στην πλάκα, με τιμή που βαίνει μειούμενη με την απόσταση από τον άξονα της δοκού. Εισάγεται συνεπώς η έννοια του συνεργαζόμενου πλάτους δοκού, που αφορά κατά βάση την απλοποίηση των υπολογισμών, καθώς η χρήση του επιτρέπει τη θεώρηση ομοιόμορφων συνθηκών έντασης στη διατομή (*EC2 §5.3.2.1(1)P* και *EKΩΣ §8.4*).

Είναι σαφές από τα παραπάνω, πως η τιμή του συνεργαζόμενου πλάτους δεν είναι ίδια σε όλες της δοκούς, καθώς εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που αφορούν τις διαστάσεις κορμού και πέλματος, τη θέση της δοκού, το μήκος, τον τύπο της φόρτισης, τις συνθήκες στήριξης κτλ. Κατά συνέπεια, το συνεργαζόμενο πλάτος δοκού προκύπτει διαφορετικό σε θέση ακραίου ή ενδιάμεσου ανοίγματος, ακραίας ή ενδιάμεσης στήριξης κτλ. Για τον υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους μπορούν να υιοθετηθούν οι κανονιστικές διατάξεις του *Ευρωκώδικα 2* (*EC2 §5.3.2*), όπου αναφέρεται πως κατά την ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί μια ενιαία τιμή για όλο το μήκος συγκεκριμένου ανοίγματος της δοκού (αυτή που προκύπτει στη θέση ανοίγματος της κάθε δοκού). Σημειώνεται πως οι αντίστοιχες προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού του Ελληνικού Κανονισμού (*EKΩΣ 2000 §8.4* και *§§8.4*) ήταν ελαφρώς διαφορετικές από αυτές του Ευρωκώδικα, ενώ έδιναν τη δυνατότητα υιοθέτησης ενιαίου συνεργαζόμενου πλάτους σε όλο το μήκος μιας συνεχούς δοκού υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.



Σχήμα 3.5 Επιλογή διατομής πλακοδοκού και εισαγωγή διαστάσεων διατομής.



Σχήμα 3.6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής πλακοδοκού και απομείωση ιδιοτήτων λόγω ρηγματωμένης διατομής (βάση EC8).

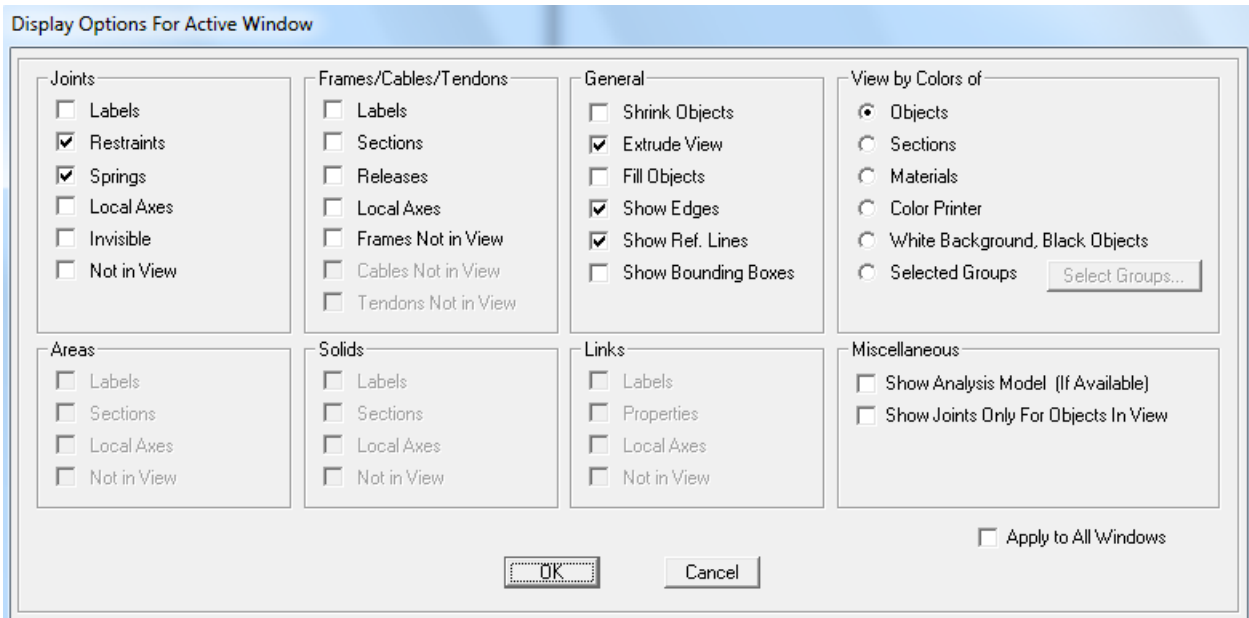
3.4.2. Ανάθεση διατομών στα γραμμικά στοιχεία και εμφάνιση εικόνας φορέα

Όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα, ο καθορισμός των διατομών δεν σημαίνει και την αυτόματη ανάθεσή τους στα αντίστοιχα γραμμικά στοιχεία, τα οποία έχουν αρχικά σχεδιαστεί με την προεπιλεγμένη (*default*) διατομή με όνομα *FSEC1*. Η ανάθεση των νέων διατομών γίνεται με επιλογή κάθε φορά του κατάλληλου δομικού στοιχείου, και στη συνέχεια χρήση της εντολής *Assign* → *Frame* → *Frame Sections*. Για την ανάθεση διατομής στη δοκό επιλέγεται το όνομα διατομής *BEAM*, ενώ για την ανάθεση της διατομής στα υποστυλώματα επιλέγεται η διατομή *COLUMN*. Καθώς τα δυο υποστυλώματα έχουν την ίδια διατομή, είναι δυνατή η ταυτόχρονη επιλογή τους από την επιφάνεια σχεδίασης, ώστε να γίνει η χρήση της εντολής ανάθεσης μια μόνο φορά.

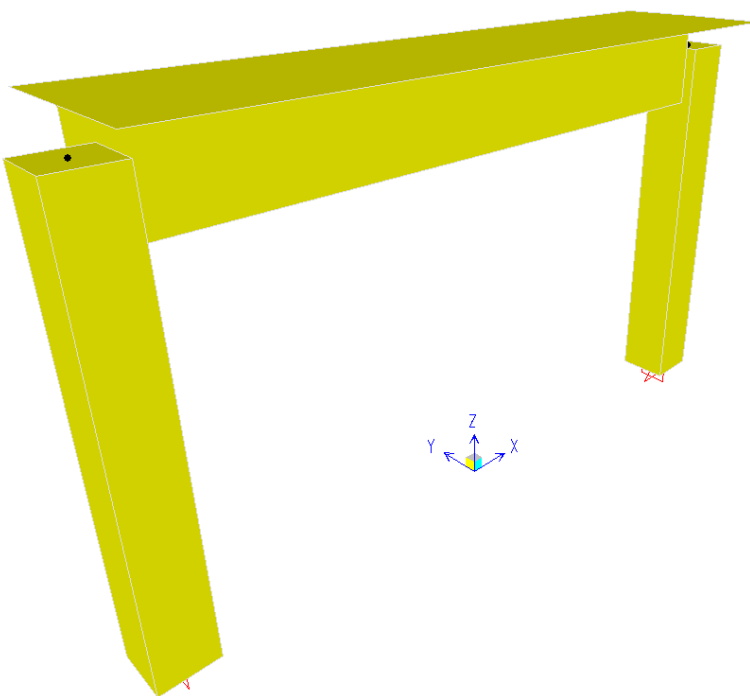
Στο πρόγραμμα *SAP 2000* είναι δυνατή και η σχηματική απεικόνιση των διατομών που έχουν ανατεθεί στον φορέα. Αυτό μπορεί να γίνει από την εντολή *View* → *Set Display Options*, με ενεργοποίηση της επιλογής *Extrude View* (Σχήμα 3.7), έχοντας ενεργό το παράθυρο στο οποίο εμφανίζεται η τρισδιάστατη όψη του πλαισίου. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.8, η τρισδιάστατη απεικόνιση της δοκού δεν είναι ακριβής, καθώς δεν αποτυπώνεται το πάχος του κορμού και των πτερυγίων της πλακοδοκού. Αυτό είναι καθαρά

σχηματικό, δίχως να επηρεάζει καθόλου την ορθότητα της προσομοίωσης, και οφείλεται στην προέλευση της συγκεκριμένης διατομής προήλθε από την ομάδα *Steel*, η οποία κατά βάση προορίζεται για διατομές χάλυβα με ελάχιστο πάχος μελών.

Από το ίδιο παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 3.7, μπορεί να γίνει και η εμφάνιση των κόμβων (*Joints* όπου αποεπιλέγεται το *Invisible*), οι οποίοι δεν είναι αρχικά ορατοί στα δυο παράθυρα του προγράμματος. Είναι επίσης δυνατό ο έλεγχος της εμφάνισης/απόκρυψης και άλλων στοιχείων/πληροφοριών, όπως των στηρίξεων (*Restraints*), τυχόν ελατηρίων (*Springs*), της ονομασίας κόμβων και γραμμικών στοιχείων (*Labels*), του είδους των διατομών σε κάθε στοιχείο (*Sections*), τυχόν εσωτερικών αρθρώσεων (*Releases*), τοπικών αξόνων (*Local Axes*) κτλ.



Σχήμα 3.7 Καθορισμός εμφάνισης/απόκρυψης πληροφοριών φορέα στο κάθε παράθυρο.



Σχήμα 3.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών φορέα.

3.5. Ορισμός φορτίων

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο, ο ορισμός των φορτίων περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- καθορισμό των μορφών φόρτισης (*Load Patterns*),
- καθορισμό των φορτιστικών καταστάσεων (*Load Cases*),
- καθορισμό των συνδυασμών φόρτισης (*Load Combinations*).

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, πέραν της κατακόρυφης στατικής φόρτισης, υπάρχει και σεισμικό φορτίο το οποίο όμως είναι επίσης στατικού, και όχι δυναμικού, τύπου. Στην περίπτωση των φορτίων του παραδείγματος (μόνιμα και κινητά φορτία), ο συνδυασμός δράσεων για καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια (συνδυασμός αστοχίας κατακόρυφων δράσεων) διαμορφώνεται ως εξής:

$$1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q \quad (3.1)$$

Αντίστοιχα, ο συνδυασμός δράσεων για καταστάσεις σεισμικού σχεδιασμού διαμορφώνεται ως:

$$G + 0.30 \cdot Q \pm E \quad (3.2)$$

Συνδυασμός κατακόρυφων δράσεων Ευρωκώδικα

Οι συνδυασμοί δράσεων για καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια, όπως είναι ο συνδυασμός αστοχίας των κατακόρυφων δράσεων που αναφέρεται στην εκφώνηση, μπορούν να ληφθούν από τον Ευρωκώδικα *EN1990 §6.4.3.2, Εξίσωση 6.10*, με συντελεστές που περιλαμβάνονται στο *Παράρτημα Α του EN1990 (§A1.3.1(4), Πίνακας A1.2(B))*, όπου λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση για σχεδιασμό δομικών μελών δίχως γεωτεχνικές δράσεις. Στα παραπάνω πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι τροποποιήσεις του *Πίνακα A1.2(B)* που εισάγονται βάσει του *Εθνικού Προσαρτήματος* του συγκεκριμένου Ευρωκώδικα, καταλήγοντας στην έκφραση:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, με *G* συμβολίζονται οι μόνιμες δράσεις, με *P* οι δράσεις προέντασης, με *Q* οι μεταβλητές δράσεις (κυρίαρχη και συνοδευτικές), ενώ με γ διάφοροι συντελεστές που μπορούν να αναζητηθούν στους σχετικούς Πίνακες του Ευρωκώδικα για την αντίστοιχη περίπτωση φόρτισης.

Εναλλακτικά της παραπάνω εξίσωσης, όπως αναφέρεται στον Ευρωκώδικα *EN1990 §6.4.3.2(3)*, για οριακές καταστάσεις *STR* (εσωτερική αστοχία ή υπερβάλλουσα παραμόρφωση φορέα ή δομικών μελών, συμπεριλαμβανομένων δομικών στοιχείων θεμελίωσης) και *GEO* (αστοχία ή υπερβάλλουσα παραμόρφωση του εδάφους), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λιγότερο ευμενής από τις παρακάτω εκφράσεις:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.5)$$

Παρατηρείται στις παραπάνω εξισώσεις, οι οποίες αφορούν καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια, πως επιτρέπεται η μείωση είτε της κυρίαρχης μεταβλητής δράσης (Εξίσωση 3.4) με την προσθήκη του μειωτικού συντελεστή $\psi_{0,1}$ (λαμβάνει τιμή 0.7 για συνήθη κτίρια από τον *Πίνακα A1.1 του EN1990*), είτε των μόνιμων δράσεων με την προσθήκη μειωτικού συντελεστή ξ_j (έχει επιλεγεί ενδιάμεση τιμή 0.925 στον *Πίνακα A1.2(B) στο Εθνικό Προσάρτημα του EN 1990*). Συνεπώς, η βασική Εξίσωση 3.3 αποτελεί τη δυσμενέστερη επιλογή συνδυασμού φόρτισης συγκρινόμενη με τις δυο επόμενες.

Σεισμικός συνδυασμός φόρτισης Ευρωκώδικα

Οι συνδυασμοί δράσεων για καταστάσεις σεισμικού σχεδιασμού μπορούν να ληφθούν από τον Ευρωκώδικα *EN1990 (§6.4.3.4, Εξίσωση 6.12b και §A1.3.2, Πίνακας A1.3, με συντελεστή $\psi_{2,1}$ από Πίνακα A1.1)*, από τη γενική έκφραση:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.6)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με A_{Ed} συμβολίζονται οι σεισμικές δράσεις.

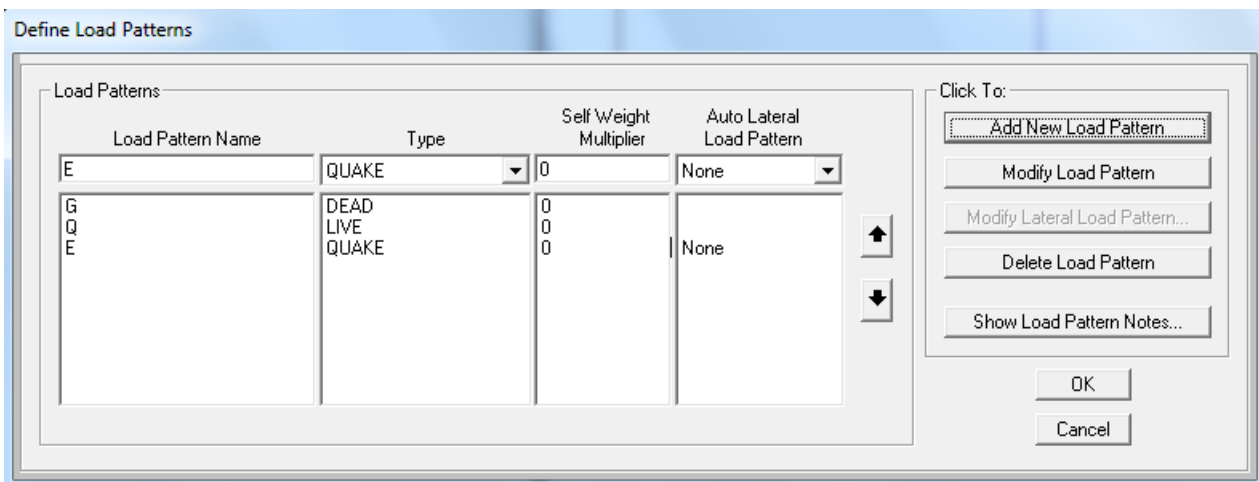
Πληροφορίες αναφορικά με συγκεκριμένες τιμές των μόνιμων και μεταβλητών φορτίων, οι οποίες προβλέπονται για διάφορες περιπτώσεις κατασκευών, μπορούν να αναζητηθούν στον *EC1 (EN 1991)*, ενώ για τις σεισμικές δράσεις στον *EC8 (EN 1998)*, όπου ο μελετητής θα πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στα Εθνικά Προσαρτήματα.

Συνδυασμοί φόρτισης Ελληνικών Κανονισμών

Οι συνδυασμοί δράσεων που προβλεπόταν από τους πρόσφατους Ελληνικούς Κανονισμούς καταλήγουν, για την περίπτωση του παραδείγματος, στις ίδιες ακριβώς εξισώσεις υπολογισμού με αυτές που προέκυψαν από την εφαρμογή των Ευρωκωδίκων. Πιο συγκεκριμένα, ο κατακόρυφος συνδυασμός αστοχίας προκύπτει από όσα περιγράφονται στον *ΕΚΩΣ 2000 (§6.3.2 και §6.4)*, ενώ ο σεισμικός συνδυασμός δράσεων από τον *ΕΑΚ 2000 (§4.1.2.1 και Πίνακας 4.1)*.

3.5.1. Καθορισμός μορφών φόρτισης

Αρχικά ορίζονται τρεις διαφορετικές μορφές φόρτισης, από την εντολή *Define → Load Patterns*, εκ των οποίων η μια αφορά τα μόνιμα φορτία (*G*), μια τα μεταβλητά φορτία (*Q*) και μια τα σεισμικά φορτία (*E*). Βάσει των οδηγιών της εκφώνησης, τίθεται μηδενικός συντελεστής ίδιου βάρους (*Self Weight Multiplier=0*) για την κάθε μορφή φόρτισης. Μπορεί να τεθεί ο κατάλληλος τύπος (*type*) για την κάθε φόρτιση, δηλαδή *DEAD* για τις μόνιμες δράσεις, *LIVE* για τις μεταβλητές δράσεις και *QUAKE* για τις σεισμικές (Σχήμα 3.9). Στην πράξη όμως, ο ακριβής καθορισμός του τύπου της φόρτισης λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ζητηθεί από το πρόγραμμα να κάνει αυτόματα τους συνδυασμούς δράσεων. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να είναι πλήρως προσδιορισμένο το είδος της κάθε δράσης, ώστε να τεθεί από το πρόγραμμα ο κατάλληλος συντελεστής, ανάλογα πάντα με τον Κανονισμό φορτίσεων που εφαρμόζεται. Στο παρόν παράδειγμα ο ορισμός του τύπου της κάθε φόρτισης δίνεται ενδεικτικά, καθώς οι συνδυασμοί δράσεων θα καθοριστούν αποκλειστικά από τον χρήστη.



Σχήμα 3.9 Καθορισμός μορφών φόρτισης (επιβαλλόμενα φορτία στατικού τύπου).

Μηδενισμός ίδιου βάρους δομικών στοιχείων φορέα

Σε πολλά παραδείγματα του συγγράμματος επιδιώκεται ο μηδενισμός του ίδιου βάρους των δομικών στοιχείων του φορέα, ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να αφορούν αποκλειστικά τα εξωτερικά φορτία που εισάγει ο χρήστης. Ο εν λόγω μηδενισμός του ίδιου βάρους μπορεί να επιτευχθεί στο *SAP 2000* με τους παρακάτω τρόπους:

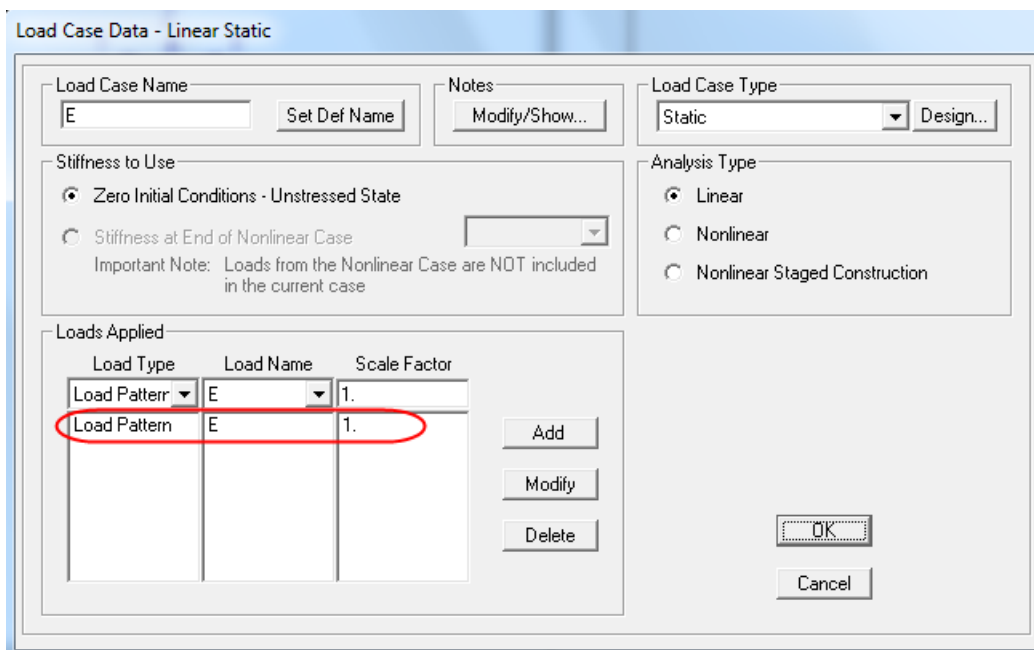
- με μηδενισμό του ειδικού βάρους του υλικού των διαφόρων δομικών στοιχείων,
- με χρήση μηδενικού συντελεστή (*modifier*) κατά τον ορισμό της διατομής, στο πεδίο που αφορά τον πολλαπλασιαστή του βάρους της εν λόγω διατομής,
- με χρήση μηδενικής τιμής συντελεστή *Self Weight Multiplier*, κατά τον ορισμό των μορφών φόρτισης του φορέα.

Οποιαδήποτε από τις παραπάνω επιλογές, ή ακόμη και ο συνδυασμός τους, θα έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη μηδενική επιρροή του ίδιου βάρους κατά την επίλυση του φορέα. Αντίστοιχες δυνατότητες επέμβασης στον συνυπολογισμό του ίδιου βάρους δίνονται σε κάθε πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών γενικής χρήσης, με διαφορετικό ίσως τρόπο υλοποίησης στο κάθε λογισμικό.

3.5.2. Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων

Στο πεδίο *Define* → *Load Cases* εμφανίζονται οι φορτιστικές καταστάσεις για τις οποίες ζητείται να γίνει η ανάλυση. Ο ορισμός των φορτιστικών καταστάσεων (*Load Cases*) για τις στατικού τύπου μορφές φόρτισης (*Load Patterns*), οι οποίες δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, είναι αυτόματος. Οι καταστάσεις *Dead* (για τα ίδια βάρη) και *Modal* (ιδιομορφική ανάλυση) προϋπάρχουν, ενώ στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορούν να διαγραφούν καθώς δεν σχετίζονται με κάποια επιθυμητή κατάσταση φόρτισης. Αν δεν διαγραφούν θα δίνουν απλώς μηδενικά αποτελέσματα, δίχως να επηρεάζουν με κάποιο άλλο τρόπο την ανάλυση.

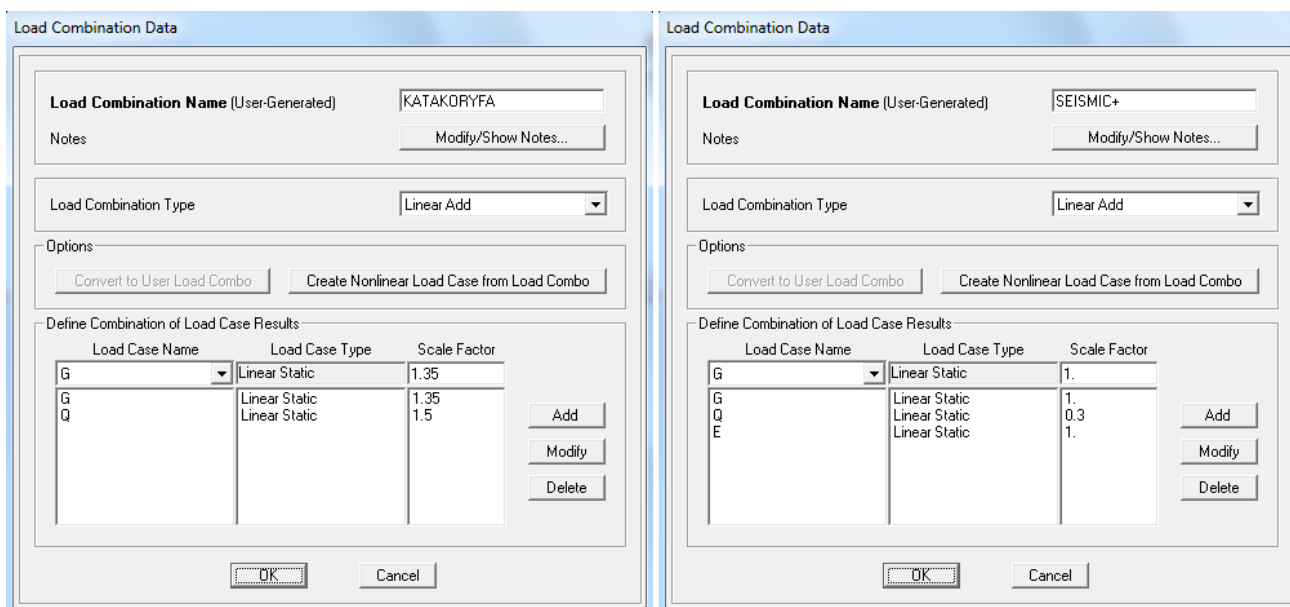
Με *Modify/Show* σε κάθε *Load Case* θα πρέπει να γίνει έλεγχος ότι η αντίστοιχη μορφή φόρτισης εμπεριέχεται μια φορά (*scale factor 1*) στη λίστα *Loads Applied* της κάθε φορτιστικής κατάστασης, διαφορετικά η ανάλυση θα δώσει μηδενική καταπόνηση (ενδεικτικά για το σεισμικό φορτίο στο Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 Έλεγχος ορισμού φορτιστικών καταστάσεων.

3.5.3. Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης

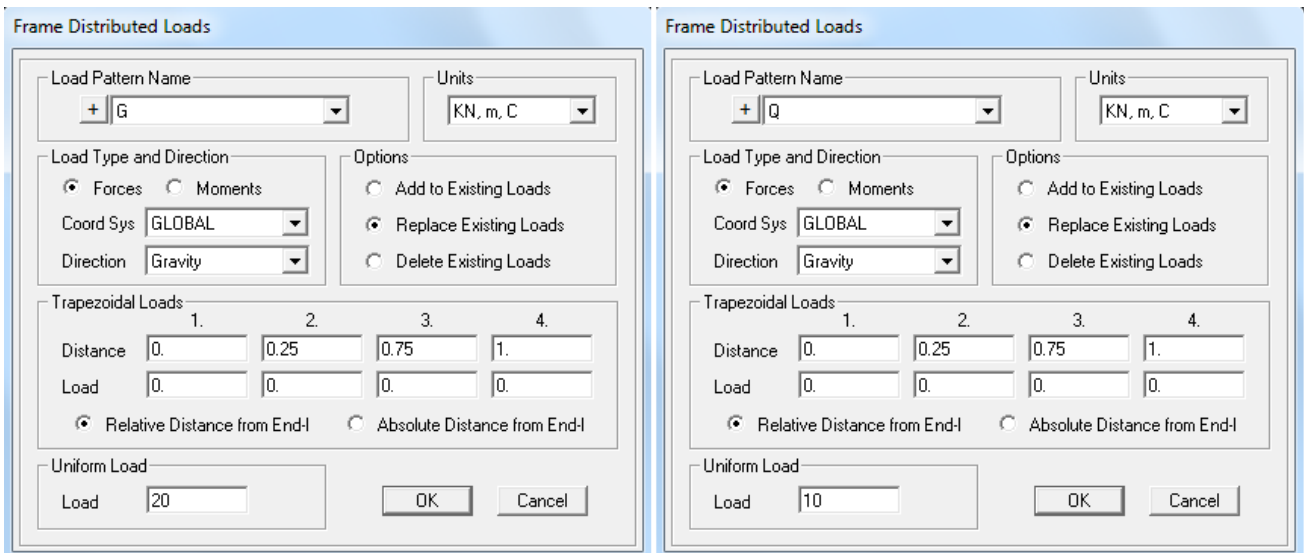
Ο ορισμός των δυο συνδυασμών φόρτισης γίνεται από την εντολή *Define* → *Load Combinations* και στη συνέχεια *Add New Combo*. Ο πρώτος συνδυασμός αφορά τις καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια για τα κατακόρυφα φορτία (*KATAKORYFA*), ενώ ο δεύτερος το σεισμικό συνδυασμό δράσεων (*SEISMIC*), όπως προσδιορίστηκαν προηγουμένως από τις Εξισώσεις 3.1 και 3.2. Καθώς το σεισμικό φορτίο που ορίστηκε στο παράδειγμα είναι στατικού τύπου, θα πρέπει ο συνδυασμός που το περιέχει να οριστεί δυο φορές: μια για τη θετική (*SEISMIC+*) και μια για την αρνητική (*SEISMIC-*) φορά της σεισμικής δράσης. Στο Σχήμα 3.11 εμφανίζονται ενδεικτικά ο συνδυασμός που αφορά τις καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια και ο ένας από τους δυο σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης.



Σχήμα 3.11 Καθορισμός συνδυασμών φόρτισης (στο σχήμα εμφανίζονται δυο από τους τρεις συνολικά συνδυασμούς).

3.5.4. Ανάθεση φορτίων στον φορέα

Η ανάθεση των φορτίων στον φορέα μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε στάδιο της προσομοίωσης, αρκεί να έχουν καθοριστεί οι σχετικές μορφές φόρτισης. Αφού πρώτα επιλεγεί η δοκός, τα κατανεμημένα φορτία ορίζονται ξεχωριστά στην κάθε μορφή φόρτισης με την εντολή *Assign* → *Frame Loads* → *Distributed*. Επιλέγεται το *Forces* (δυνάμεις) για κατανεμημένο φορτίο, ενώ δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διεύθυνση (*Direction*) της φόρτισης, στην οποία επιλέγεται στο παρόν το *Gravity* (βαρύτητα), δηλαδή ίδια διεύθυνση και φορά με τα φορτία βαρύτητας (προς τα κάτω). Εναλλακτικά θα μπορούσε να επιλεγεί η διεύθυνση *Z*, προσέχοντας όμως παράλληλα να τεθεί αρνητικό πρόσημο στην τιμή του φορτίου, καθώς ο συγκεκριμένος άξονας έχει θετική φορά προς τα πάνω. Η τιμή του φορτίου εισάγεται στο πεδίο *Uniform Load*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Ανάθεση κατανεμημένου φορτίου στη δοκό χωριστά σε κάθε Load Pattern.

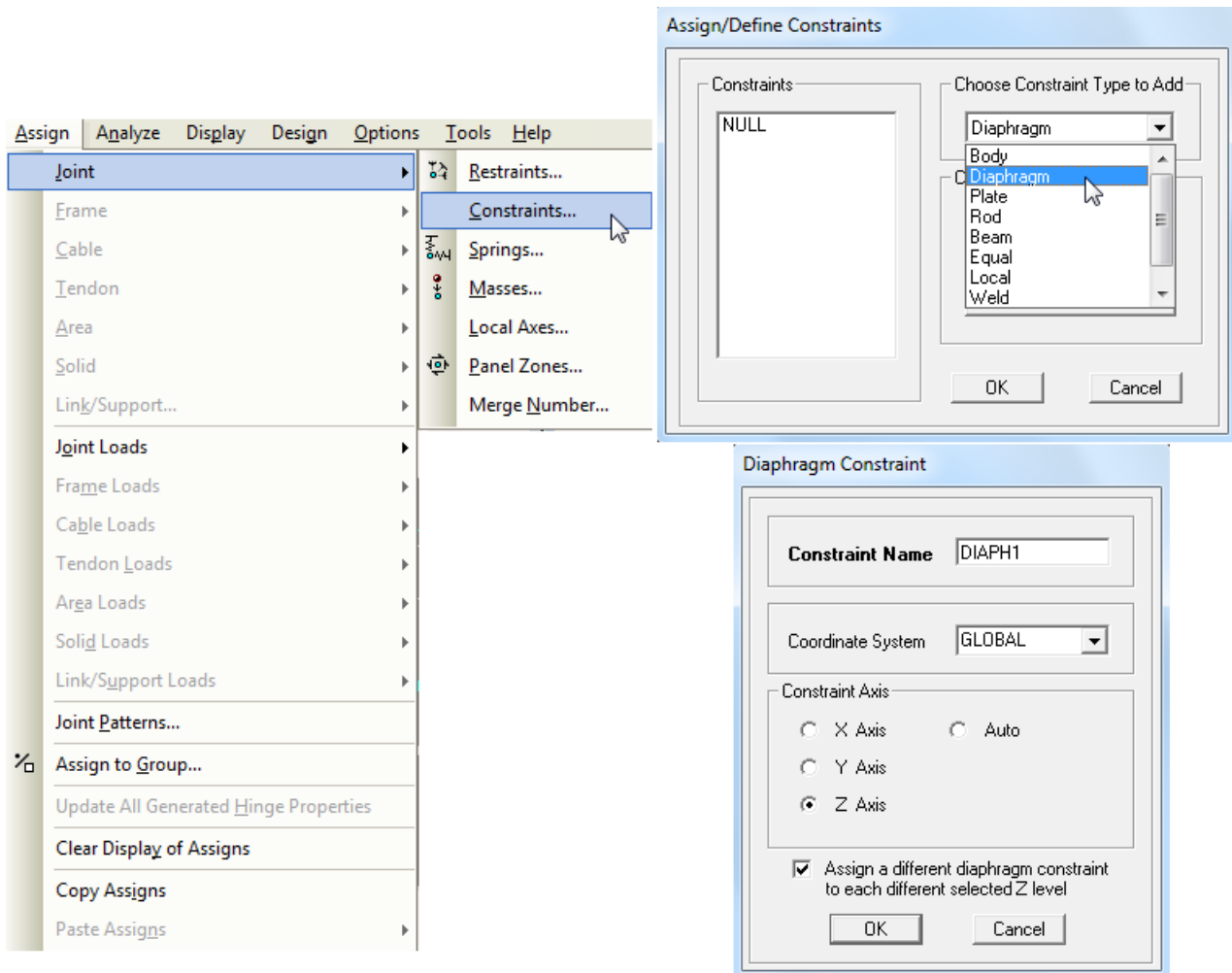
Το οριζόντιο επικόμβιο φορτίο, το οποίο εφαρμόζεται στον αριστερά κόμβο του πλαισίου, ορίζεται κατά τα γνωστά στη μορφή φόρτισης *E* από την εντολή *Assign* → *Joint Load* → *Forces*, όπου τίθεται τιμή *100* στο πεδίο *Force Global X*.

Όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενο παράδειγμα, στο πρόγραμμα είναι δυνατή η εμφάνιση ενός μόνο *Load Pattern* σε κάθε παράθυρο, η οποία αναγράφεται κάθε φορά στον τίτλο του παραθύρου. Ο έλεγχος της εμφάνισης των υφιστάμενων φορτίων μπορεί να γίνει από την εντολή *Display* → *Show Load Assigns* και στη συνέχεια επιλογή του *Joint* για τα επικόμβια φορτία (εδώ του σεισμικού φορτίου *E*) ή του *Frame/Cable/Tendon* για τα κατανεμημένα φορτία σε γραμμικό στοιχείο (εδώ του *G* ή του *Q*). Επιλογή του *Display* → *Show Undeformed Shape* (απαραμόρφωτο σχήμα) επαναφέρει την αρχική εικόνα του φορέα κρύβοντας τα φορτία που έχουν ανατεθεί.

3.6. Ορισμός διαφραγματικής λειτουργίας

Στην περιγραφή του φορέα αναφέρεται πως στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. Η ύπαρξη πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος προσδίδει σημαντική εντός επιπέδου δυστένεια, με αποτέλεσμα η κίνηση του ορόφου να προσομοιάζει αυτήν ενός διαφράγματος. Για να συμβεί βεβαίως αυτό, θα πρέπει οι πλάκες να έχουν ένα κανονικό, συμπαγές και ομοιόμορφο σχήμα, δίχως σημαντικές προεξοχές ή οπές. Επιτυγχάνεται έτσι ευνοϊκότερη σεισμική συμπεριφορά, καθώς οι πλάκες λειτουργούν ως πρακτικά απαραμόρφωτοι δίσκοι εντός του επιπέδου τους, αποτρέποντας τις οριζόντιες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των κόμβων των κατακόρυφων στοιχείων και συμβάλλοντας στην ομοιόμορφη κατανομή των σεισμικών φορτίων (Avramidis, Athanatoroulou, Morfidis, Sextos, & Giaralis, 2015).

Η παραπάνω ιδιότητα μπορεί να ληφθεί με αυτοματοποιημένο τρόπο από το *SAP 2000*, δίνοντας την ιδιότητα διαφράγματος στους κόμβους που αποτελούν τον κάθε όροφο. Αυτό γίνεται αφού επιλεγούν όλοι οι κόμβοι του ορόφου που συμμετέχουν στο διάφραγμα (εδώ οι δυο κόμβοι της δοκού), με χρήση της εντολής *Assign* → *Joint* → *Constraints* (Σχήμα 3.13). Επιλέγεται διάφραγμα (*Diaphragm*) και με *Add New Constraint* ορίζεται το διάφραγμα γύρω από τον κάθετο στην πλάκα άξονα, δηλαδή τον άξονα *Z*. Σημειώνεται πως στις πολυώροφες κατασκευές θα πρέπει να οριστεί ξεχωριστό διάφραγμα στον κάθε όροφο, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί αυτοματοποιημένα ενεργοποιώντας την επιλογή *Assign a different diaphragm constraint to each different selected Z level* (ανάθεση διαφορετικού διαφράγματος σε κάθε διαφορετική στάθμη *Z*).



Σχήμα 3.13 Ανάθεση διαφραγματικής λειτουργίας στους κόμβους του ορόφου.

Διαφραγματική λειτουργία πλακών

Η διαφραγματική λειτουργία των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος περιγράφεται στον **Ευρωκώδικα 8 (EC8 §4.3.1(3))**, όπου αναφέρεται πως ο φορέας αποτελείται από συστήματα ανάληψης κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων που συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντια διαφράγματα. Τα διαφράγματα θεωρούνται απαραμόρφωτα όταν η προσομοίωση με την πραγματική εντός επιπέδου δυστένεια, καταλήγει σε μετακινήσεις ορόφου που σε κανένα σημείο του δεν υπερβαίνουν κατά περισσότερο από 10% τις μετακινήσεις υπό τη θεώρηση διαφραγματικής λειτουργίας, στον σεισμικό πάντα συνδυασμό φόρτισης (**EC8 §4.3.1(4)**).

Μια ποιοτική περιγραφή της παραπάνω απαίτησης για την εξασφάλιση διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας, μπορεί να ληφθεί από τα κριτήρια κανονικότητας σε κάτοψη που τίθενται στον **Ευρωκώδικα 8 (EC8 §4.2.3.2(3) και (4))**. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται πως η διαμόρφωση της πλάκας πρέπει να είναι συμπαγής, ενώ τυχόν ανωμαλίες στην περίμετρο (εισέχουσες γωνίες ή εσοχές) δεν θα πρέπει να έχουν επιπτώσεις στην εντός επιπέδου δυστένεια. Σε κάθε τέτοια ανωμαλία, η περιοχή μεταξύ του περιγράμματος της πλάκας και της κυρτής πολυγωνικής γραμμής που περιβάλλει την πλάκα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% της επιφάνειας του ορόφου. Η επίτευξη σημαντικής δυστένειας εντός επιπέδου δεν είναι σαφής σε κατόψεις με μορφή L, Π, Η, Ι και Χ, οι οποίες θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά, ιδιαίτερα όσον αφορά την επιμέρους συμπεριφορά των κλάδων που πρέπει να είναι συγκρίσιμη με αυτή του κεντρικού σκέλους της κάτοψης. Το απαιτούμενο πάχος της πλάκας για τη θεώρηση διαφράγματος ισούται με τουλάχιστο 70mm (**EC8 §5.10(1)**), ενώ πρέπει να υπάρχει και στις δυο διευθύνσεις ο ελάχιστος οπλισμός που περιγράφεται στον **Ευρωκώδικα 2**.

Στον *Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό* υπάρχουν αντίστοιχες διατάξεις για τη σημασία της ύπαρξης αξιόπιστης διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας. Επισημαίνεται ότι η διαφραγματική λειτουργία δεν θεωρείται εξασφαλισμένη, αν δεν γίνει ακριβέστερος έλεγχος, σε επιμήκη ορθογωνικά κτίρια (ή τμήματα κτιρίων) με λόγο πλευρών μεγαλύτερο του 4, καθώς και σε κτίρια με κενά που υπερβαίνουν το 35% της κάτοψης του ορόφου (*EAK 2000 §3.5.4.[1α]*).

3.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων

Η πύκνωση των θέσεων ελέγχου των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την επιλογή όλου του φορέα (με *Ctrl+A* ή το εργαλείο *All* της κατακόρυφης σειράς εργαλείων στο αριστερά μέρος της οθόνης) και την εντολή *Assign → Frame → Output Stations*, όπου επιλέγεται η τιμή *9* και ανατίθεται με *OK* στην κατασκευή.

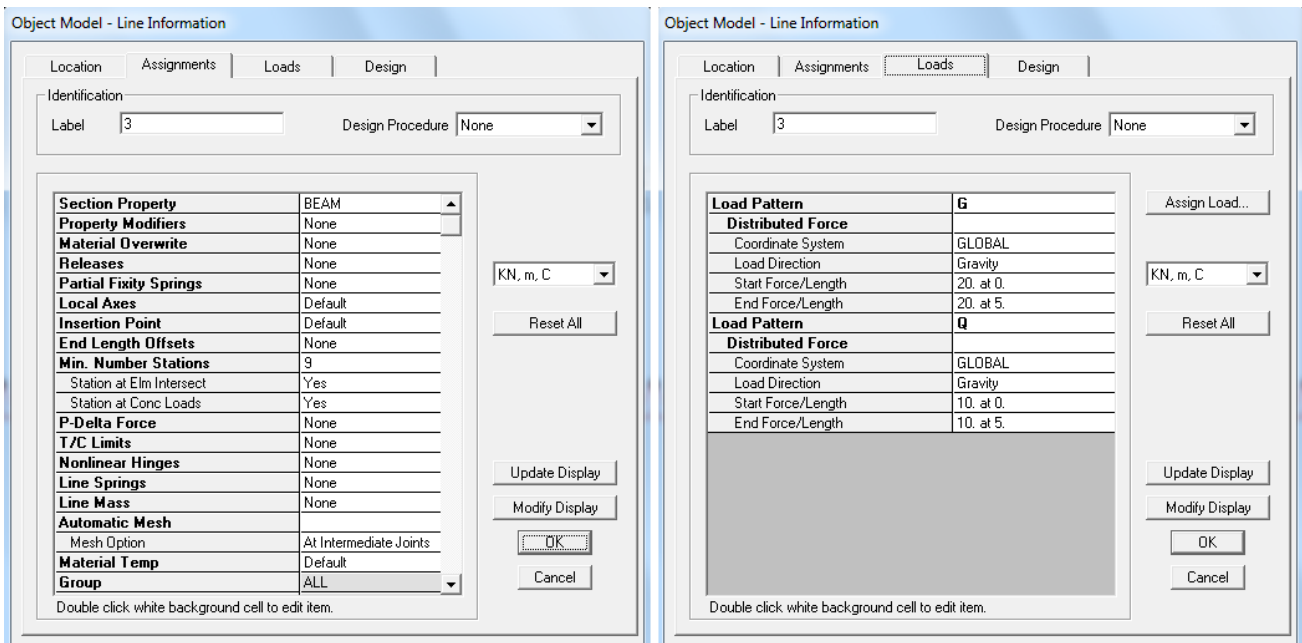
3.8. Γρήγορος έλεγχος προσομοιώματος

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο παράδειγμα, το δεξί *click* σε γραμμικό στοιχείο του φορέα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιων από τα χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα, στην καρτέλα *Location* φαίνεται τόσο το μήκος όσο και οι συντεταγμένες των κόμβων αρχής και τέλους του γραμμικού στοιχείου, στην καρτέλα *Assignments* ο τύπος της διατομής (εδώ *BEAM*) και διάφορες άλλες ιδιότητες που ανατέθηκαν στο συγκεκριμένο γραμμικό στοιχείο, στην καρτέλα *Loads* τυχόν κατανεμημένα φορτία κτλ.

Ειδικότερα στην καρτέλα *Assignments* (αριστερά στο Σχήμα 3.14), υπάρχει το πεδίο *Section Properties* που δείχνει τη διατομή που αντιστοιχεί στο δομικό στοιχείο, και το πεδίο *Property Modifiers* που αντιστοιχεί στους συντελεστές μετατροπής ιδιοτήτων για το συγκεκριμένο γραμμικό στοιχείο. Πρέπει να σημειωθεί πως η σωστή τιμή για το *Property Modifiers* στο συγκεκριμένο πεδίο είναι *None* (καθόλου), καθώς οι συντελεστές απομείωσης ιδιοτήτων (για το στάδιο II των ρηγματωμένων διατομών που απαιτεί ο *EC8*) έχουν ήδη ενσωματωθεί μέσα στην εξεταζόμενη διατομή (δηλαδή στη διατομή *BEAM* για την περίπτωση του Σχήματος 3.14). Ενδεχόμενη προσθήκη *Property Modifiers* στο συγκεκριμένο σημείο θα είναι λανθασμένη, καθώς θα λάμβανε υπόψη για δεύτερη φορά συντελεστές απομείωσης για το δομικό στοιχείο, πέρα από αυτούς που ήδη τέθηκαν κατά τον ορισμό της διατομής.

Στη διπλανή καρτέλα *Loads* περιλαμβάνονται τα κατανεμημένα φορτία που έχουν ανατεθεί στη συγκεκριμένη διατομή, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα του Σχήματος 3.14. Αναφέρεται ο τύπος φόρτισης που εδώ αφορά κατανεμημένο φορτίο (*Distributed Force*), όπως και η θέση αρχής και τέλους του φορτίου κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου.

Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να γίνει ένας σχετικός έλεγχος και στις θέσεις των κόμβων, όπου με δεξί *click* εμφανίζονται οι συντεταγμένες τους, οι δεσμεύσεις των ελευθεριών στήριξης (*Restraints*) για τους κόμβους της βάσης του πλαισίου στις στηρίξεις, αλλά και η ανάθεση καταναγκασμού τύπου διαφράγματος (*Constraints: Diaphragm*) για τους κόμβους της οροφής.



Σχήμα 3.14 Πληροφορίες γραμμικού στοιχείου (εμφάνιση με δεξιά click στο γραμμικό στοιχείο)

3.9. Ανάλυση φορέα

Καθώς τόσο ο φορέας όσο και τα επιβαλλόμενα φορτία αφορούν πρόβλημα στο επίπεδο (η φόρτιση προκαλεί παραμόρφωση στο επίπεδο XZ), υπάρχει η δυνατότητα στο συγκεκριμένο παράδειγμα να οριστεί επίπεδη ανάλυση του φορέα (δίχως να είναι απαραίτητο). Αυτό επιτυγχάνεται από την εντολή **Analyze** → **Set Analysis Options** και επιλογή του δεύτερου εικονιδίου, οπότε διατηρούνται μόνο οι βαθμοί ελευθερίας που σχετίζονται με απόκριση στο επίπεδο XZ .

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή **Analyze** → **Run Analysis** και **Run Now**.

3.10. Αποτελέσματα

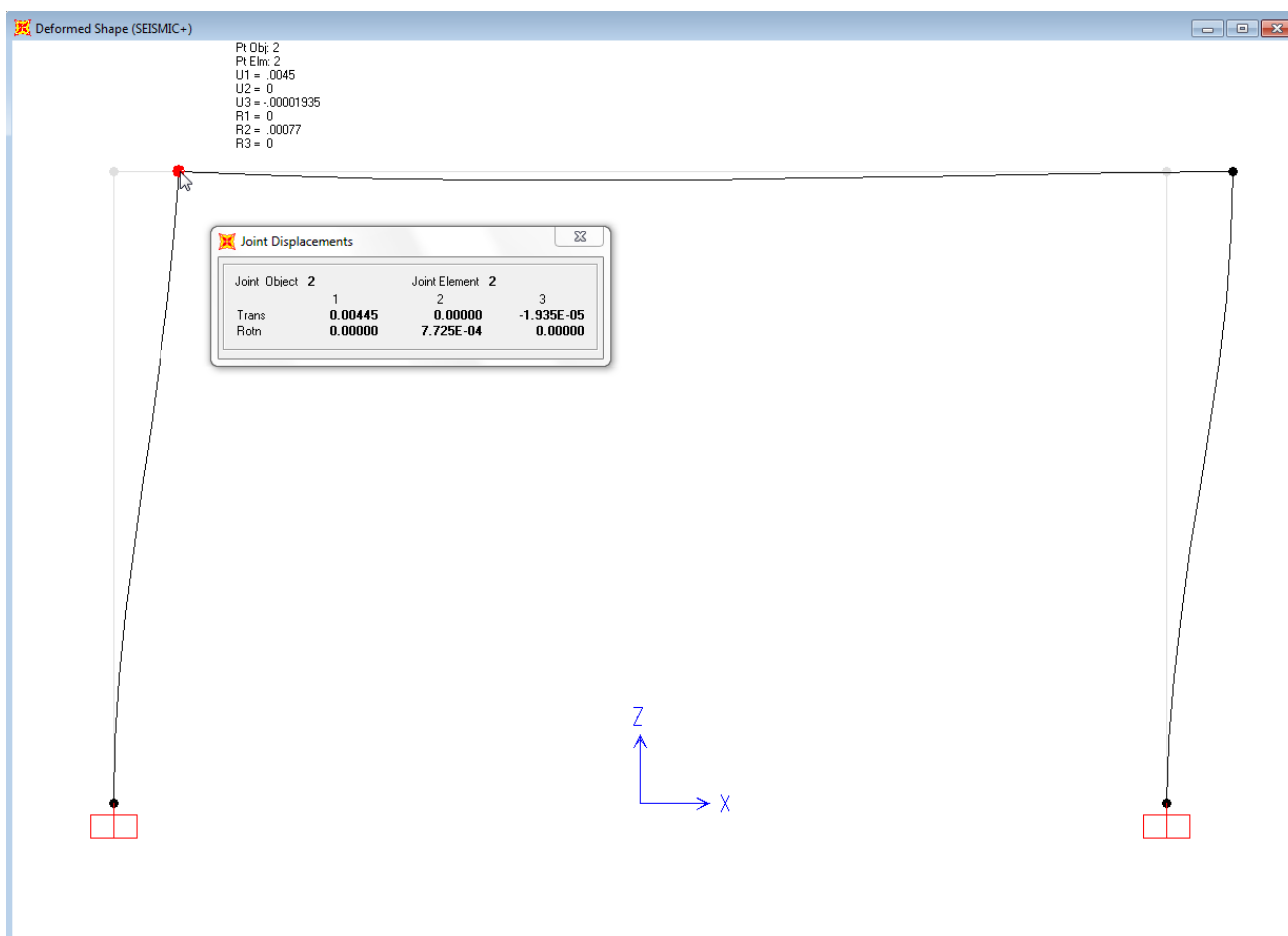
3.10.1. Παραμορφωμένη γραμμή και μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις του φορέα στους διάφορους κόμβους για την κάθε φορτιστική κατάσταση, εμφανίζονται μέσω της παραμορφωμένης γραμμής του φορέα. Η παραμορφωμένη γραμμή μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε από τα δυο παράθυρα είναι βολικότερο για τον χρήστη. Έτσι, από την εντολή **Display** → **Show Deformed Shape**, επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και με **OK** εμφανίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα. Η επιλογή **Wire Shadow** που διατίθεται στο προηγούμενο παράθυρο, προκαλεί την εμφάνιση με αχνό χρωματισμό της απαραμόρφωτης κατάστασης του φορέα, κάτι που είναι συχνά χρήσιμο για να σχηματιστεί η πλήρης εικόνα της παραμόρφωσης λόγω της επιλεγμένης φόρτισης.

Η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+** εμφανίζεται στο Σχήμα 3.15. Πλησιάζοντας σε κάποιον κόμβο εμφανίζονται οι μετακινήσεις του, οι οποίες μπορούν να ληφθούν με περισσότερες λεπτομέρειες με δεξιά **click** επάνω στον κόμβο. Στην πρώτη σειρά αποτελεσμάτων εμφανίζονται οι μετατοπίσεις και στη δεύτερη οι στροφές, ενώ οι άξονες **1, 2, 3** αντιστοιχούν στους γενικούς άξονες **X, Y, Z** (αυτό αφορά αποκλειστικά τους κόμβους, όπως επισημαίνεται στο Παράρτημα Α).

Στον τίτλο του παραθύρου φαίνεται πάντα η κατάσταση φόρτισης για την οποία εικονίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα.

Στο κάτω αριστερά τμήμα του παραθύρου που εμφανίζει την παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα, υπάρχει το εργαλείο *Start Animation*. Εφόσον αυτό ενεργοποιηθεί, προκαλεί την εμφάνιση, με κίνηση, της μετάβασης του φορέα από την απαραμόρφωτη στην παραμορφωμένη κατάσταση. Παρατηρείται πως το αποτέλεσμα δεν είναι ακριβές, καθώς, παρόλο που ο συνδυασμός *SEISMIC+* αφορά τη διεύθυνση του οριζόντιου φορτίου προς τα δεξιά, η κίνηση δείχνει την παραμόρφωση έως και την πλήρη αντιστροφή της κίνησης (η συγκεκριμένη ανακρίβεια γίνεται ευκολότερα αντιληπτή κατά την παραμόρφωση λόγω των κατακόρυφων φορτίων). Σε κάθε περίπτωση, υπό τις δεδομένες συνθήκες, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον χρήστη ώστε να αντιληφθεί την πορεία της παραμόρφωσης ή/και να εντοπίσει τυχόν λάθη στη συμπεριφορά του φορέα.

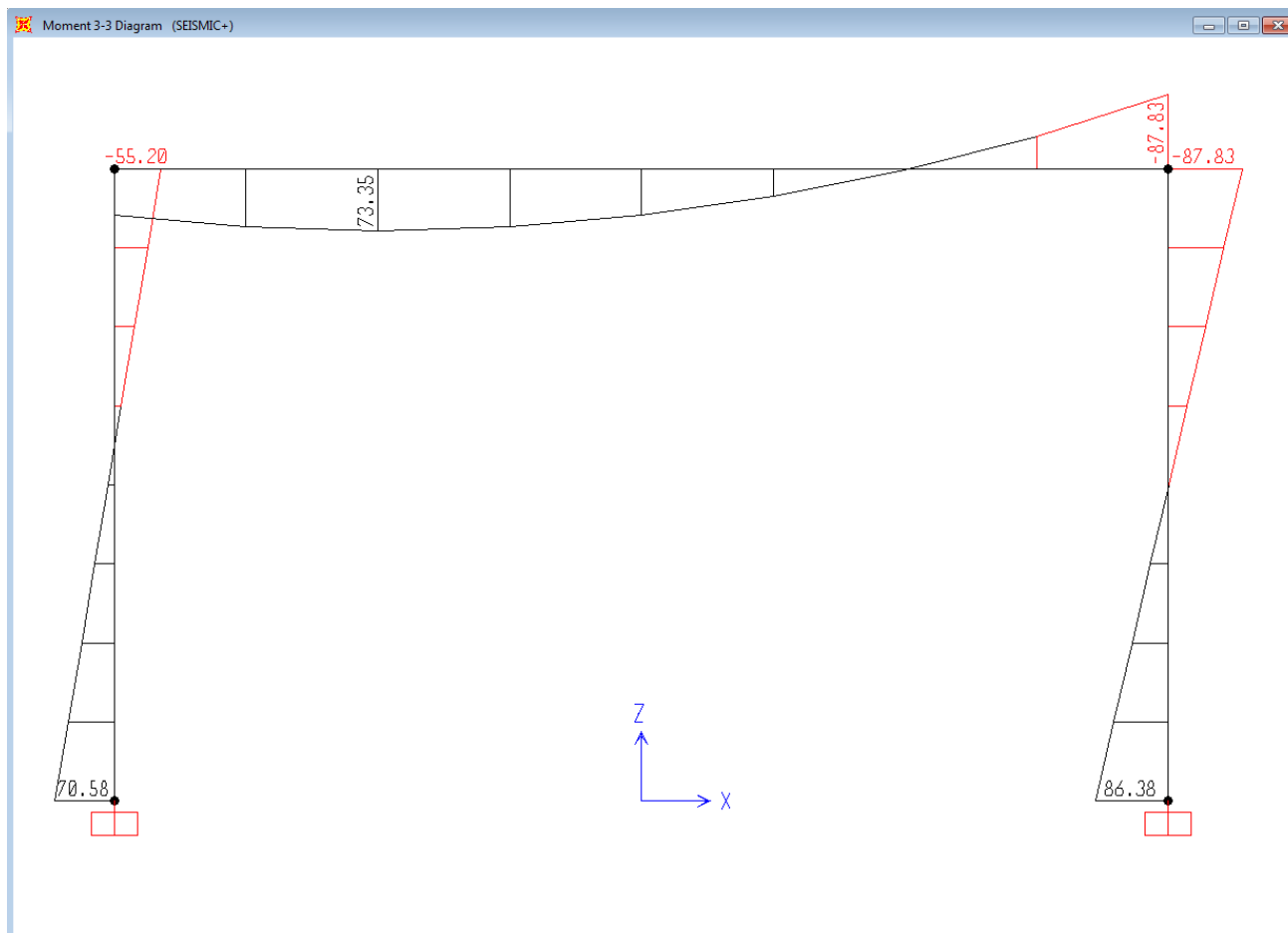


Σχήμα 3.15 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής φορέα και μετακινήσεων κόμβου οροφής για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+*.

3.10.2. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Για την εμφάνιση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών χρησιμοποιείται η εντολή *Display → Show Forces/Stresses → Frames/Cables*, όπου επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και ζητείται το επιθυμητό εντατικό μέγεθος. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεγέθυνσης/σμίκρυνσης του διαγράμματος (*Scaling*), αλλά και η εμφάνισή του με χρωματισμό ή με τιμές σε χαρακτηριστικά σημεία (*Fill Diagram* ή *Show Values on Diagram* αντίστοιχα). Η επιλογή *Moment 3-3* θα οδηγήσει στην εμφάνιση του διαγράμματος καμπτικών ροπών στο Σχήμα 3.16. Αναλυτική επεξήγηση της

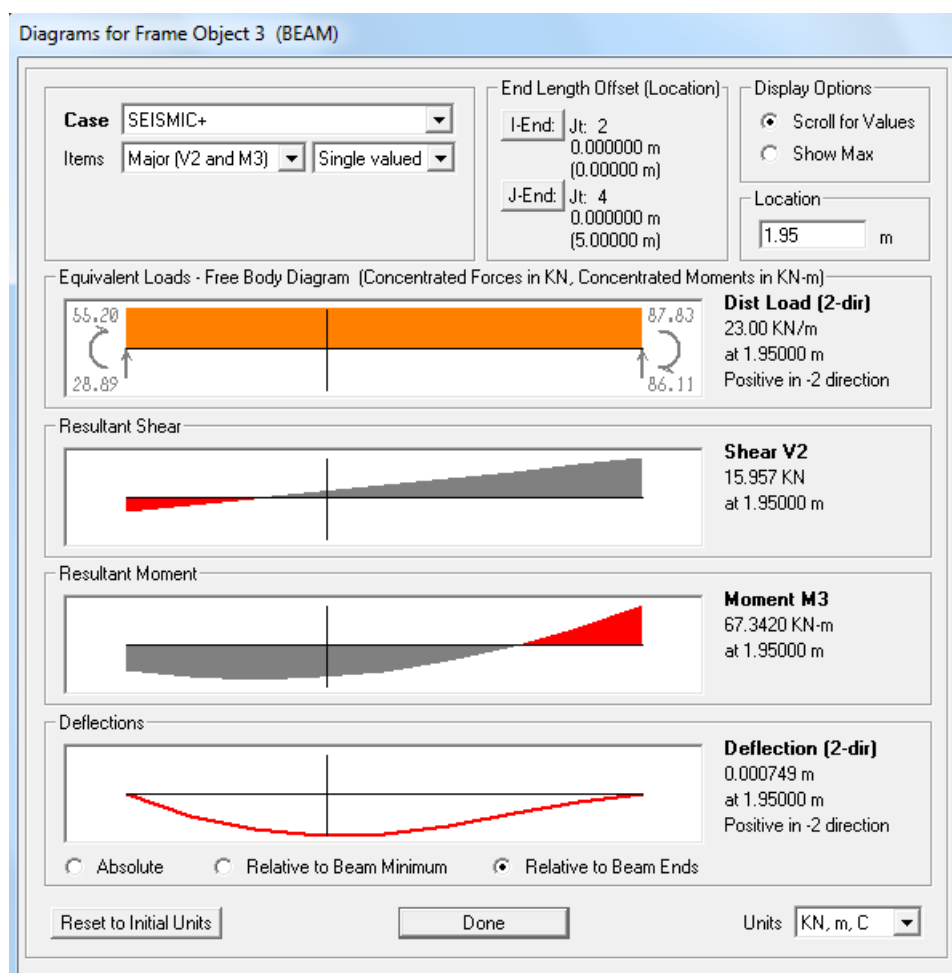
συγκεκριμένης επιλογής, που βασίζεται στους τοπικούς άξονες του γραμμικού στοιχείου, γίνεται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 3.16 Εμφάνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (με επιλογή Show Values on Diagram στο προηγούμενο βήμα).

Με δεξιά *click* πάνω στον άξονα ενός γραμμικού στοιχείου (εδώ στη δοκό), εμφανίζονται λεπτομέρειες της εντατικής κατάστασης ανά ζεύγη σχετιζόμενων μεγεθών (Σχήμα 3.17). Από το *Items* μπορούν να επιλεγούν εντατικά μεγέθη σε άλλες διευθύνσεις, ενώ αλλάζοντας το *Case* παρουσιάζονται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για άλλη φορτιστική κατάσταση στο ίδιο γραμμικό στοιχείο. Η επιλογή *Show Max* δείχνει τη μέγιστη τιμή για το κάθε εμφανιζόμενο μέγεθος. Με την επιλογή *Scroll for Values* και *Location* είναι δυνατός ο καθορισμός συγκεκριμένης απόστασης από το άκρο αρχής του γραμμικού στοιχείου, οπότε και μπορούν να ληφθούν οι τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών στη συγκεκριμένη θέση. Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η εμφάνιση των εντατικών μεγεθών ροπής *M3* και τέμνουσας *V2* της δοκού για τον συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+, ενώ έχει επιλεγεί η εμφάνιση τιμών σε θέση που απέχει 1.95m από το άκρο αρχής της δοκού (αριστερό άκρο).

Κατά την εμφάνιση των λεπτομερειών των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών, είναι δυνατή και η παρακολούθηση της απόκλισης (*deflection*) της δοκού, που αντιστοιχεί στην κατακόρυφη μετακίνηση της. Το συγκεκριμένο πεδίο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή από τον χρήστη, καθώς η μετακίνηση μπορεί να εμφανιστεί με τρεις διαφορετικές παραδοχές: (α) ως απόλυτη τιμή (*Absolute*), (β) ως σχετική τιμή με αναφορά τη μικρότερη τιμή βύθισης της δοκού (*Relative to Beam Minimum*) και (γ) ως σχετική τιμή με αναφορά τα άκρα της δοκού (*Relative to Beam Ends*).



Σχήμα 3.17 Λεπτομέρειες διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών στη δοκό για τη φορτιστική κατάσταση SEISMIC+ (θέση 1.95m από το αριστερά άκρο της δοκού).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 3^{ου} Κεφαλαίου

- American Concrete Institute (2011). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary*. ACI Committee 318.
- Avramidis, I., Athanatopoulou, A., Morfidis, K., Sextos, A., & Gialalis, A. (2015). *Eurocode-compliant seismic analysis and design of R/C buildings: concepts, commentary and worked examples with flowcharts*. Springer.
- CEN (2002). *EN 1990: Eurocode: Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2002). *EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-1: General actions -Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.

- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Ζαράρης, Π., & Παπαγιάννη, Ι. (1997). *Σιδηροπαγές Σκυρόδεμα Ι: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων*.
- Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Πενέλης, Γ., Στυλιανίδης, Κ., Κάππος, Α., & Ιγνατάκης, Χ. (1995). *Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων*.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΚΩΣ 2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

Τροποποίηση γεωμετρίας και ιδιοτήτων φορέα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 4 παρουσιάζεται, με τη βοήθεια εφαρμοσμένου παραδείγματος, η δυνατότητα τροποποίησης και ο καθορισμός πρόσθετων χαρακτηριστικών σε υφιστάμενο αρχείο προσομοίωσης φορέα. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: δυνατότητες τροποποίησης υφιστάμενου φορέα, παραμετρική διερεύνηση, διακριτοποίηση φορέα, εσωτερικές ελευθερίες κίνησης, εναλλακτικοί τρόποι προσομοίωσης στηρίξεων.

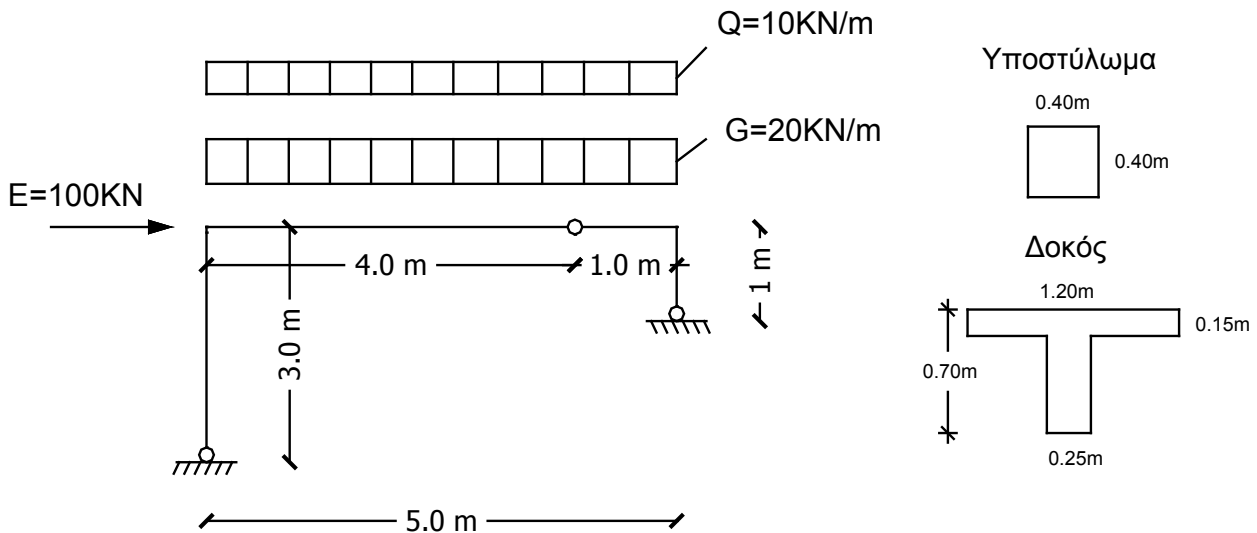
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, ικανότητα ανάγνωσης κανονιστικών κειμένων, κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος, όπως και εφαρμογή του παραδείγματος του Κεφαλαίου 3.

4.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του επίπεδου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος που περιγράφεται στο Σχήμα 4.1, για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης. Να ληφθούν υπόψη τα εξής στοιχεία:

- Η οριζόντια δύναμη E θεωρείται σεισμικό φορτίο, το κατανεμημένο φορτίο G μόνιμη δράση και το Q μεταβλητή δράση.
- Το υλικό να ληφθεί με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 4.1 Τροποποιημένο πλαίσιο υπό στατική φόρτιση (προσθήκη εσωτερικών αρθρώσεων και τροποποίηση γεωμετρίας φορέα του Κεφαλαίου 3).

4.2. Τροποποίηση γεωμετρίας φορέα

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, συγκρίνοντας τα δεδομένα της εκφώνησης με αυτά του προηγούμενου παραδείγματος, πρόκειται για επίλυση του ίδιου φορέα με ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία. Η διαφορά έγκειται στην ύπαρξη αρθρώσεων τόσο στις στηρίξεις όσο και εσωτερικά στη δοκό, αλλά και στη μεταβολή του ύψους του δεξιού στύλου. Για την εισαγωγή της παραπάνω γεωμετρίας δεν είναι απαραίτητη η εκ νέου εισαγωγή των στοιχείων του φορέα, αλλά η απλή τροποποίηση του υφιστάμενου φορέα.

Τροποποίηση-παραμετρική διερεύνηση φορέα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της προσομοίωσης και επίλυσης κατασκευών, όπως υλοποιείται με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε προγράμματα υπολογιστή, είναι η δυνατότητα εύκολης τροποποίησης-παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών του φορέα. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει στον μελετητή να διερευνήσει διαφορετικές παραδοχές μορφοποίησης ή ιδιοτήτων της υπό ανάλυση κατασκευής, ώστε να επιλέξει τη βέλτιστη λύση.

Η βασική χρήση της συγκεκριμένης δυνατότητας, όσον αφορά τυπικές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, σχετίζεται με θέματα μορφοποίησης του φέροντος οργανισμού. Πολύ συχνή εφαρμογή παραμετρικής διερεύνησης αφορά τη θέση και τις διαστάσεις των τοιχωμάτων, τα οποία αποτελούν το σημαντικότερο στοιχείο προσφερόμενης δυσκαμψίας και παραλαβής σεισμικών φορτίων σε ένα μικτό δομικό σύστημα.

Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η υιοθέτηση παραμετρικής διερεύνησης στην περίπτωση που δεν είναι γνωστή, με καλή ακρίβεια, η τιμή κάποιας ιδιότητας ή χαρακτηριστικού. Ενδεικτικά, στην περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί γεωτεχνική μελέτη και δεν υπάρχει σαφής γνώση των χαρακτηριστικών των εδαφικών ιδιοτήτων, είναι σημαντική η διερεύνηση ελαφρώς διαφορετικών συνθηκών θεμελίωσης, ώστε να προβλεφθούν τυχόν δυσμενή σενάρια απόκρισης της κατασκευής. Αντίστοιχη μελέτη μπορεί να γίνει για διαφορετικές τιμές φορτίων σε κάποιες θέσεις, ιδιότητες υλικών κτλ. Ειδικά για τις παραπάνω περιπτώσεις, υπάρχουν λογισμικά που μπορούν να προσφέρουν αυτοματοποιημένα παραμετροποίηση κατά τη μελέτη κάποιας ιδιότητας, αν και συνήθως πρόκειται για προγράμματα που προορίζονται για ερευνητική χρήση και απαιτούν και κάποιο επίπεδο γνώσεων προγραμματισμού από τον χρήστη (Σέζτος & Κατσάνος, 2009).

Για την τροποποίηση της γεωμετρίας του φορέα, γίνεται αποθήκευση του αρχείου του προηγούμενου παραδείγματος με διαφορετικό όνομα (*File* → *Save As* και νέο όνομα αρχείου *Chapter 04.sdb*). Με τον τρόπο αυτόν μπορούν να γίνουν αλλαγές δίχως να μεταβληθεί η προηγούμενη επίλυση.

4.2.1. Πύκνωση διακριτοποίησης δοκού

Οι εσωτερικές αρθρώσεις σε έναν φορέα αποτελούν χαρακτηριστικό των δομικών στοιχείων στα άκρα τους και όχι των κόμβων, όπως λανθασμένα κάποιες φορές θεωρείται. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την αποδέσμευση της στήριξης σε έναν -για το κάθε άκρο- βαθμό ελευθερίας ενός γραμμικού πεπερασμένου στοιχείου. Για την εισαγωγή όμως της συγκεκριμένης ιδιότητας, καθώς αυτή τίθεται σε άκρο γραμμικού στοιχείου στο πρόγραμμα *SAP 2000*, θα πρέπει στη συγκεκριμένη θέση να διαιρεθεί η δοκός σε επιμέρους τμήματα, κάτι που συνεπάγεται και τη δημιουργία νέου κόμβου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς δεν αρκεί απλώς να σχεδιαστεί ένας πρόσθετος κόμβος, αλλά θα πρέπει να διαιρεθεί (διακριτοποιηθεί) η δοκός σε δυο επιμέρους τμήματα.

Η εντολή που χρησιμοποιείται, αφού επιλεγεί πρώτα η δοκός, είναι η *Edit* → *Edit Lines* → *Divide Frames* (Σχήμα 4.2). Επιλέγεται ο διαχωρισμός της δοκού σε δυο (2) τμήματα (*Number of Frames*), με λόγο μήκους του τελευταίου τμήματος προς το πρώτο ίσο με $1m/4m=0.25$ (*Last/First Length Ratio*). Ως πρώτο τμήμα της δοκού θεωρείται το αριστερά και ως τελευταίο το δεξιά, καθώς ο κόμβος τέλους του κάθε γραμμικού στοιχείου είναι προς την κατεύθυνση που δείχνει ο αντίστοιχος τοπικός άξονας (στη δοκό του συγκεκριμένου παραδείγματος ο τοπικός άξονας ταυτίζεται με τον γενικό άξονα *X*, με τη φορά του να εξαρτάται από τη φορά σχεδίασης του στοιχείου, όπως αναλύεται στο Παράρτημα Α).

Ο φορέας που προκύπτει (κάτω δεξιά τμήμα στο Σχήμα 4.2) έχει πλέον έναν πρόσθετο κόμβο στη δοκό, ενώ η αρχική δοκός έχει διαιρεθεί σε δυο τμήματα. Πρέπει να σημειωθεί πως το καθένα από τα επιμέρους τμήματα της δοκού έχει κρατήσει τις ιδιότητες του αρχικού γραμμικού στοιχείου, όπως τύπο διατομής, υλικό, επιβαλλόμενα φορτία κτλ. Σημειώνεται επίσης, πως η συνέχεια της δοκού δεν έχει υποστεί κάποια μεταβολή στατικής φύσεως, καθώς πρόκειται απλώς για μια πύκνωση της διακριτοποίησης. Αν συνεπώς το αρχείο επιλυθεί στην παρούσα μορφή, αναμένεται να δώσει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με αυτά του προηγούμενου παραδείγματος.

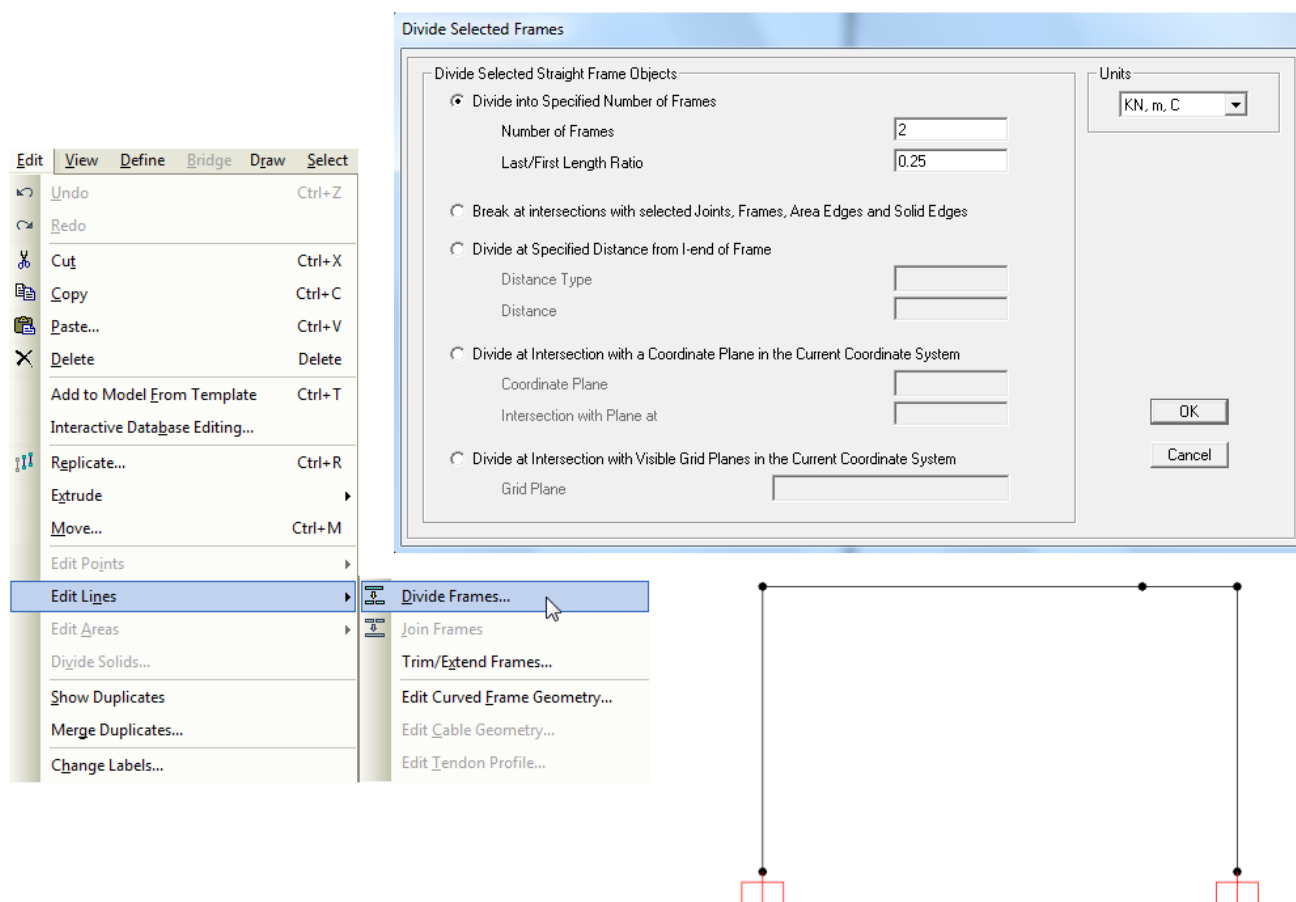
Διακριτοποίηση φορέα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Η διακριτοποίηση ενός φορέα είναι από τις βασικές επιλογές που πρέπει να κάνει ο μελετητής κατά την εισαγωγή της μορφολογίας και των δομικών στοιχείων που αποτελείται η κατασκευή. Ο όρος διακριτοποίηση αναφέρεται στον αριθμό των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση μιας περιοχής του φορέα.

Στην περίπτωση τυπικών φορέων οπλισμένου σκυροδέματος με γραμμικά στοιχεία, η διακριτοποίηση είναι συνήθως δεδομένη, με τη χρήση ενός γραμμικού στοιχείου για κάθε δομικό στοιχείο της κατασκευής. Εξάρτηση αποτελεί η προσομοίωση των τοιχωμάτων που απαιτεί τη συνδυασμένη χρήση περισσότερων γραμμικών στοιχείων. Περαιτέρω πύκνωση της διακριτοποίησης ενδέχεται να χρειαστεί όταν θα πρέπει να προσομοιωθούν πρόσθετα χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως η ύπαρξη εσωτερικών αρθρώσεων κατά μήκος ενός στοιχείου, η στήριξη δοκού σε δοκό, η δημιουργία κοντών υποστλωμάτων κτλ.

Στην περίπτωση προσομοίωσης πιο σύνθετων φορέων, και κυρίως φορέων που απαιτούν τη χρήση επιφανειακών ή/και χωρικών πεπερασμένων στοιχείων, η επιλογή της διακριτοποίησης γίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Όπως παραστατικά φαίνεται στο προσομοίωμα του πέτρινου φάρου με επιφανειακά στοιχεία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1 (Σχήμα 1.3), η διακριτοποίηση σε κρίσιμες θέσεις του φορέα, όπως είναι οι γωνίες όπου παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και σχετική εμπειρία του μελετητή. Στην περίπτωση της προσομοίωσης του πύργου του Σχήματος 1.4, γίνεται εμφανής και η απαίτηση διαδικασίας αυτόματης διακριτοποίησης από το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται, ώστε να ληφθούν υπόψη τόσο οι κανόνες ορθής διακριτοποίησης όσο και οι γεωμετρικές ιδιαιτερότητες διαφόρων περιοχών του φορέα. Αν δεν υπάρχει τέτοια αυτοματοποιημένη λειτουργία, η διαδικασία επακριβούς καθορισμού της γεωμετρίας

και των διαστάσεων των χωρικών στοιχείων γίνεται ιδιαίτερα δυσχερής και χρονοβόρα. Βασικές οδηγίες ορθής διακριτοποίησης περιγράφονται σε σημαντικό αριθμό επιστημονικών συγγραμμάτων (ενδεικτικά Cook, Malkus, & Plesha, 1989· Fagan, 1992· Hitchings ed., 1992), αλλά και στα εγχειρίδια χρήσης προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Όταν μάλιστα η προσομοίωση σχετίζεται με πιο σύνθετες μεθόδους ανάλυσης, όπως δυναμικές αναλύσεις με χρονοϊστορία φόρτισης, διάδοση σεισμικών κυμάτων σε εδαφικό μέσο, ανελαστική συμπεριφορά κτλ, τότε οι απαιτήσεις για την ορθή περιγραφή της απόκρισης είναι περισσότερες (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973· Cook et al., 1989 κτλ).



Σχήμα 4.2 Πύκνωση διακριτοποίησης γραμμικού στοιχείου δοκού.

4.2.2. Εισαγωγή εσωτερικών αρθρώσεων

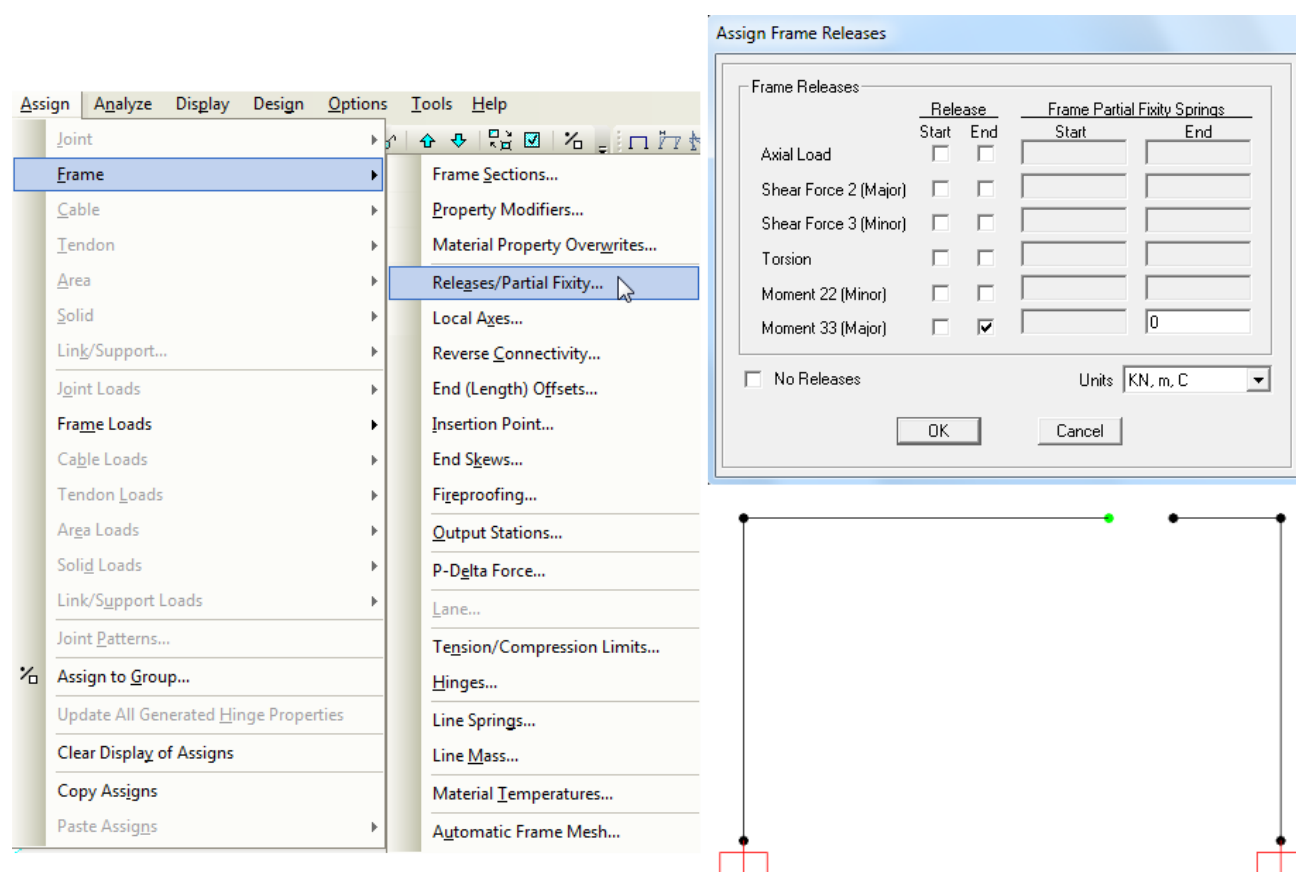
Η εσωτερική άρθρωση μπορεί να τεθεί ως ιδιότητα στο άκρο ενός από τα γραμμικά στοιχεία που αποτελούν τη δοκό. Πρόκειται πρακτικά για απελευθέρωση της δέσμευσης ενός βαθμού ελευθερίας στη θέση σύνδεσης του γραμμικού στοιχείου με το γειτονικό του. Θεωρητικά, αρκεί η εισαγωγή εσωτερικής άρθρωσης είτε στο τέλος του αριστερά τμήματος της δοκού είτε στην αρχή του δεξιά τμήματος, καθώς μηδενισμός της ροπής στη μία ή την άλλη πλευρά του κόμβου σημαίνει γενικότερα μηδενική ροπή και στα δυο στοιχεία λόγω ισορροπίας. Βεβαίως, είναι δυνατή η εισαγωγή της ιδιότητας της εσωτερικής άρθρωσης και στις δυο αυτές θέσεις. Εδώ ενδεικτικά επιλέγεται η αριστερά δοκός και με την εντολή *Assign* → *Frame* → *Releases/Partial Fixity* (Σχήμα 4.3) ορίζεται στο άκρο τέλους της δοκού (*End*) απελευθέρωση στον βαθμό ελευθερίας που σχετίζεται με την κάμψη της δοκού (*Moment 33* για τη δοκό, όπως αναλύεται στο Παράρτημα Α). Η εμφάνιση της άρθρωσης στο πρόγραμμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 4.3, ενώ η σχετική ιδιότητα φαίνεται και με δεξιά *click* στη δοκό, στο πεδίο *Releases End-J* της καρτέλας *Assignments*. Η απόσταση μεταξύ των δυο δοκών στη θέση της εσωτερικής άρθρωσης που

παρατηρείται στο Σχήμα δεν είναι πραγματική, αλλά οφείλεται στην οπτική απεικόνιση της εσωτερικής άρθρωσης από το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Η δημιουργία των αρθρώσεων στη βάση των υποστυλωμάτων μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

- Με χρήση εσωτερικής άρθρωσης στο άκρο αρχής (*Start*) του κάθε υποστυλώματος: ακολουθείται η λογική που αναπτύχθηκε παραπάνω, όπου απελευθερώνοντας την αντίστοιχη δέσμευση βαθμού ελευθερίας μηδενίζεται η ροπή στο κάτω άκρο του γραμμικού στοιχείου, άρα και στη στήριξη λόγω ισορροπίας δυνάμεων.
- Με τροποποίηση της στήριξης του κόμβου στη βάση του υποστυλώματος: πρόκειται για διαφορετική προσέγγιση, όπου τροποποιούνται οι δεσμεύσεις (*Restraints*) των ελευθεριών στήριξης του κόμβου στη βάση, ώστε να αντιστοιχούν σε άρθρωση και όχι σε πάκτωση.

Οι δυο τρόποι που περιγράφονται παραπάνω είναι ισοδύναμοι. Στο παρόν παράδειγμα χρησιμοποιείται η λογική της εσωτερικής άρθρωσης, αν και το σύνθηες στην περίπτωση εξωτερικών στηρίξεων είναι η μεταβολή του τύπου της στήριξης, των δεσμεύσεων δηλαδή στους βαθμούς ελευθερίας του σχετιζόμενου κόμβου. Η νέα εικόνα του φορέα φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.3 Εισαγωγή της εσωτερικής άρθρωσης στο δεξιό άκρο του αριστερού τμήματος της δοκού.



Σχήμα 4.4 Εικόνα του φορέα μετά την εισαγωγή αρθρώσεων στη δοκό και στη βάση των υποστυλωμάτων.

4.2.3. Μεταβολή μήκους γραμμικού στοιχείου

Το τελευταίο βήμα για την τροποποίηση της γεωμετρίας του φορέα είναι η μεταβολή του μήκους του δεξιού υποστυλώματος. Η γεωμετρία των γραμμικών στοιχείων στο *SAP 2000* είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θέση των κόμβων αρχής και τέλους που ορίζουν το στοιχείο. Κατά συνέπεια, η μεταβολή στο μήκος τους μπορεί να επιτευχθεί με μετακίνηση ενός ή και των δύο αυτών κόμβων.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του στύλου του παραδείγματος, απαιτείται η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου αρχής του στοιχείου, δηλαδή του κόμβου της βάσης, κατά 2m προς τα πάνω (προς τη θετική *Z* διεύθυνση). Με τον τρόπο αυτόν το υποστυλόμετρο θα λάβει τη σωστή διάσταση του 1m που περιγράφεται στην εκφώνηση.

Κατά διαδικασία της μετακίνησης επιλέγεται προσεκτικά μόνο ο κόμβος στη βάση του δεξιού στύλου, καθώς οποιοδήποτε άλλο στοιχείο ή κόμβος επιλεγεί θα ακολουθήσει τη συγκεκριμένη μετακίνηση, οδηγώντας σε λανθασμένη τελική γεωμετρία. Στο κάτω αριστερά τμήμα της οθόνης εμφανίζεται κάθε φορά ο ακριβής αριθμός και ο τύπος των στοιχείων που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη. Σημειώνεται πως ο κόμβος της βάσης του γραμμικού στοιχείου είναι αυτός που φαίνεται με μαύρο χρώμα στο Σχήμα 4.4. Το σημείο με πράσινο χρωματισμό δεν είναι κόμβος, αλλά απλώς η οπτική απεικόνιση της ιδιότητας της εσωτερικής άρθρωσης στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Μετά την επιλογή του κόμβου, από την εντολή *Edit* → *Move* δίνεται μετατόπιση κατά 2m προς τα πάνω (+*Z*) σύμφωνα με το Σχήμα 4.5. Στο ίδιο σχήμα εικονίζεται η τελική μορφή του φορέα μετά τη μετακίνηση του κόμβου.

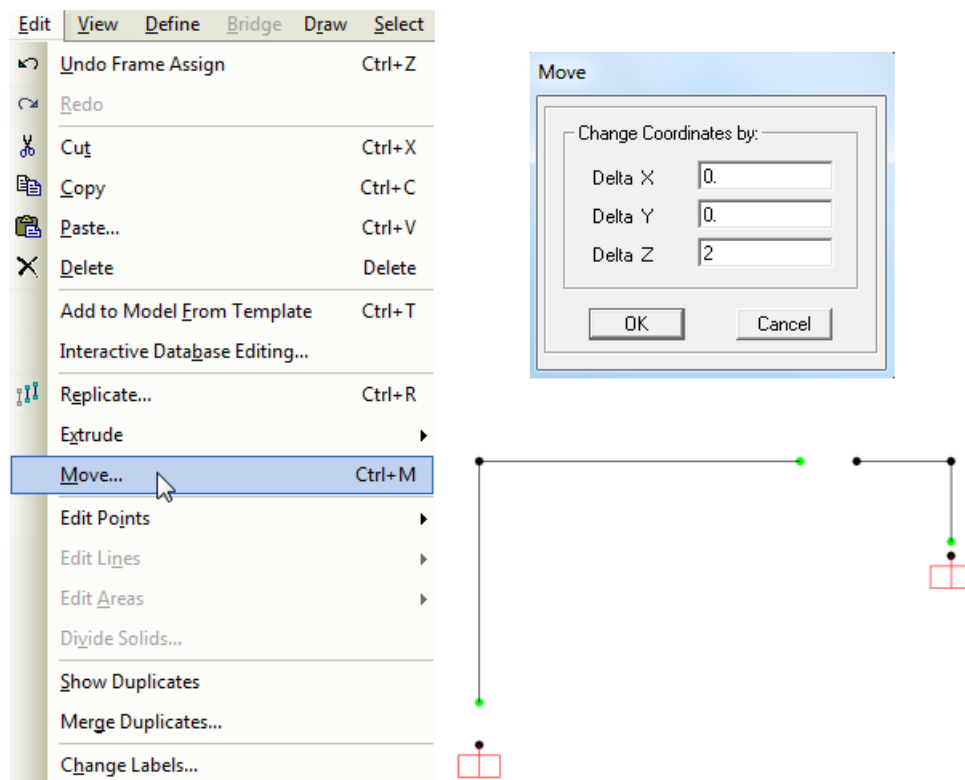
Τροποποίηση σχήματος-διαστάσεων πεπερασμένου στοιχείου

Κάθε γραμμικό, επιφανειακό ή χωρικό πεπερασμένο στοιχείο, αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων που ορίζουν τη γεωμετρία του. Στα περισσότερα προγράμματα δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης των διαστάσεων του στοιχείου με μετακίνηση ενός ή περισσότερων κόμβων τους. Η δυνατότητα αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για κοινούς κόμβους μεταξύ πεπερασμένων στοιχείων, καθώς λανθασμένη επιλογή των κόμβων που θα μετακινηθούν μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στη γεωμετρία του φορέα.

Κατά τη χρήση της συγκεκριμένης εντολής συνίσταται να επιλέγονται μόνο κόμβοι. Ενδεικτικά, αν στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλεγόταν και το γραμμικό στοιχείο του υποστυλώματος κατά την εντολή μετακίνησης, τότε η γεωμετρία που θα προέκυπτε θα ήταν λανθασμένη, καθώς ολόκληρο το υποστυλόμετρο θα μεταφερόταν 2m κατά τη +*Z* διεύθυνση με αποτέλεσμα να προεξέχει από τη στάθμη της δοκού.

Με βάση τα παραπάνω, εφόσον επιλεγούν όλοι οι κόμβοι ενός πεπερασμένου στοιχείου και τους δοθεί ενιαία μετακίνηση, τότε μετακινείται το στοιχείο ως στερεό σώμα, δίχως μεταβολή της γεωμετρίας του. Αν

αντίστοιχα επιλεγούν όλοι οι κόμβοι του φορέα, τότε μετακινείται ο φορέας στο σύνολό του. Η τελευταία παρατήρηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς στα περισσότερα προγράμματα δεν είναι δυνατή η μετακίνηση του συστήματος συντεταγμένων. Αν λοιπόν ο χρήστης θέλει να τοποθετήσει την αρχή των αξόνων σε κάποια συγκεκριμένη θέση του φορέα, αρκεί να μετακινήσει ολόκληρο τον φορέα κατά κατάλληλες αποστάσεις σε οριζόντια διεύθυνση.



Σχήμα 4.5 Μεταβολή του μήκους του υποστυλώματος και τελική γεωμετρία φορέα.

4.3. Ανάλυση φορέα

Οι διάφορες παράμετροι ανάλυσης (π.χ. ανάλυση στο επίπεδο) είναι ήδη καθορισμένες από το αρχείο του προηγούμενου παραδείγματος. Συνεπώς ο φορέας είναι έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*.

4.4. Αποτελέσματα

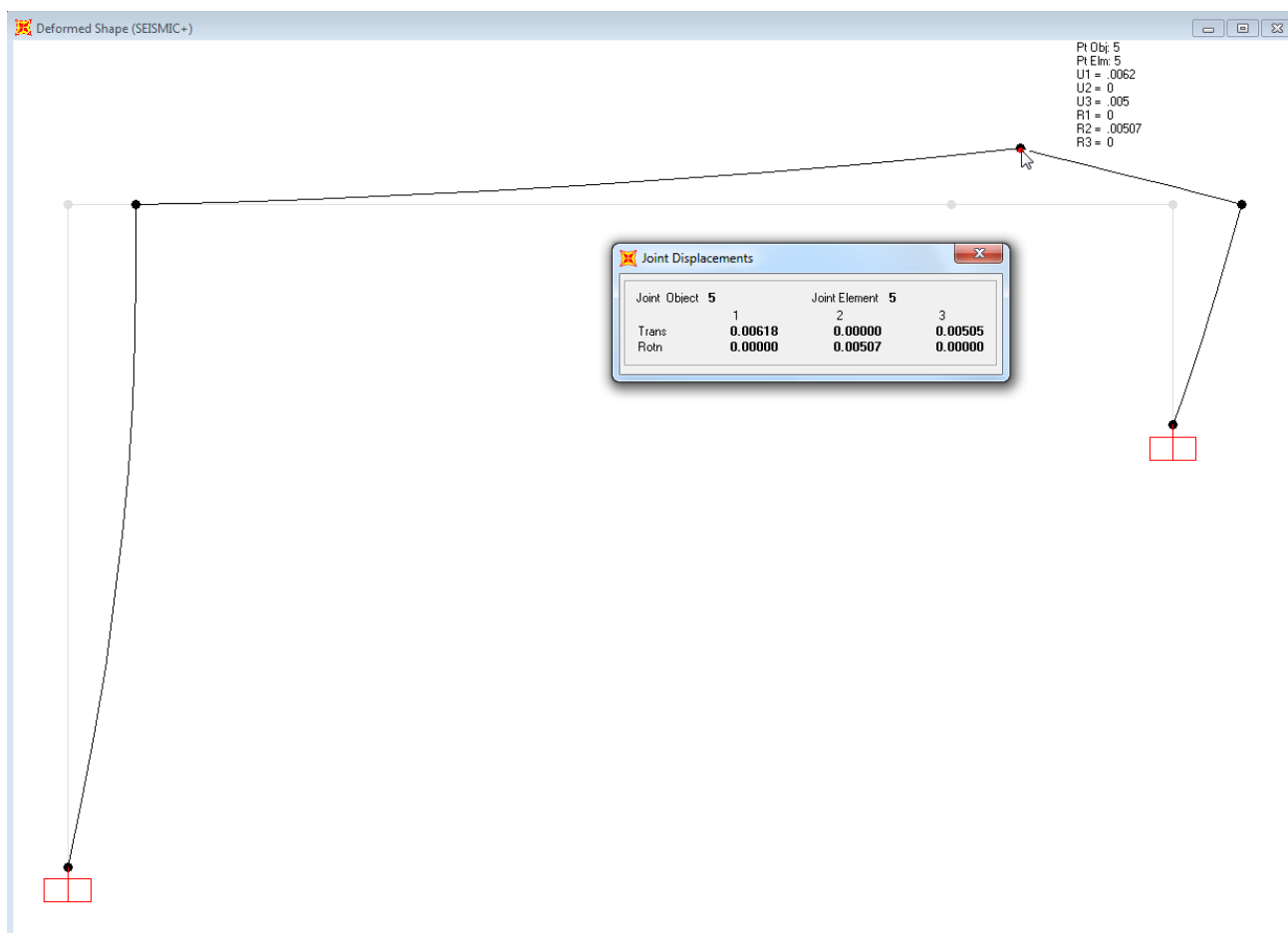
4.4.1. Παραμορφωμένη γραμμή και μετακινήσεις

Η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα εμφανίζεται από την εντολή *Display* → *Show Deformed Shape*, όπου επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης, έχοντας ενεργοποιημένη την επιλογή *Wire Shadow* για την εμφάνιση με αχνό χρωματισμό της απαραμόρφωτης κατάστασης. Η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+* εμφανίζεται στο Σχήμα 4.6. Πλησιάζοντας τον κέρσορα στην περιοχή της εσωτερικής άρθρωσης εμφανίζονται οι μετακινήσεις του συγκεκριμένου κόμβου, οι οποίες λαμβάνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια με δεξί *click* επάνω στον κόμβο.

Από τη μορφή της παραμόρφωσης είναι εμφανής η ύπαρξη μιας ασυνέχειας στη δοκό (γόνατο), όπου λόγω της εσωτερικής άρθρωσης τα δυο τμήματα της δοκού μπορούν να στρέφονται ελεύθερα και ανεξάρτητα

μεταξύ τους. Στην ίδια εικόνα είναι ορατή και η ύπαρξη αρθρωτής σύνδεσης στη βάση των υποστυλωμάτων. Αυτό γίνεται ακόμη πιο έντονα αντιληπτό αν επιλεγεί το *Start Animation*, οπότε και εμφανίζεται, με κίνηση, η μετάβαση του φορέα από την απαραμόρφωτη στην παραμορφωμένη κατάσταση. Υπενθυμίζεται πως η κίνηση που εμφανίζεται δεν είναι ακριβής, καθώς, παρόλο που ο συνδυασμός *SEISMIC+* αφορά τη διεύθυνση του οριζόντιου φορτίου προς τα δεξιά, η κίνηση δείχνει την παραμόρφωση έως και την πλήρη αντιστροφή της κίνησης.

Μια πρόσθετη δυνατότητα που οφείλεται στην εισαγωγή του κόμβου στη θέση της εσωτερικής άρθρωσης, είναι η αναλυτική εμφάνιση των μετακινήσεων στη συγκεκριμένη θέση της δοκού. Συνεπώς, εφόσον χρειάζεται ο προσδιορισμός της μετακίνησης σε κάποια θέση κατά μήκος ενός δομικού στοιχείου, μπορεί να αυξηθεί η διακριτοποίηση του στοιχείου και να δημιουργηθεί ενδιάμεσος κόμβος, δίχως αυτό να σχετίζεται απαραίτητα και με πρόσθετη ιδιότητα όπως π.χ. εισαγωγή εσωτερικής άρθρωσης στη συγκεκριμένη θέση.

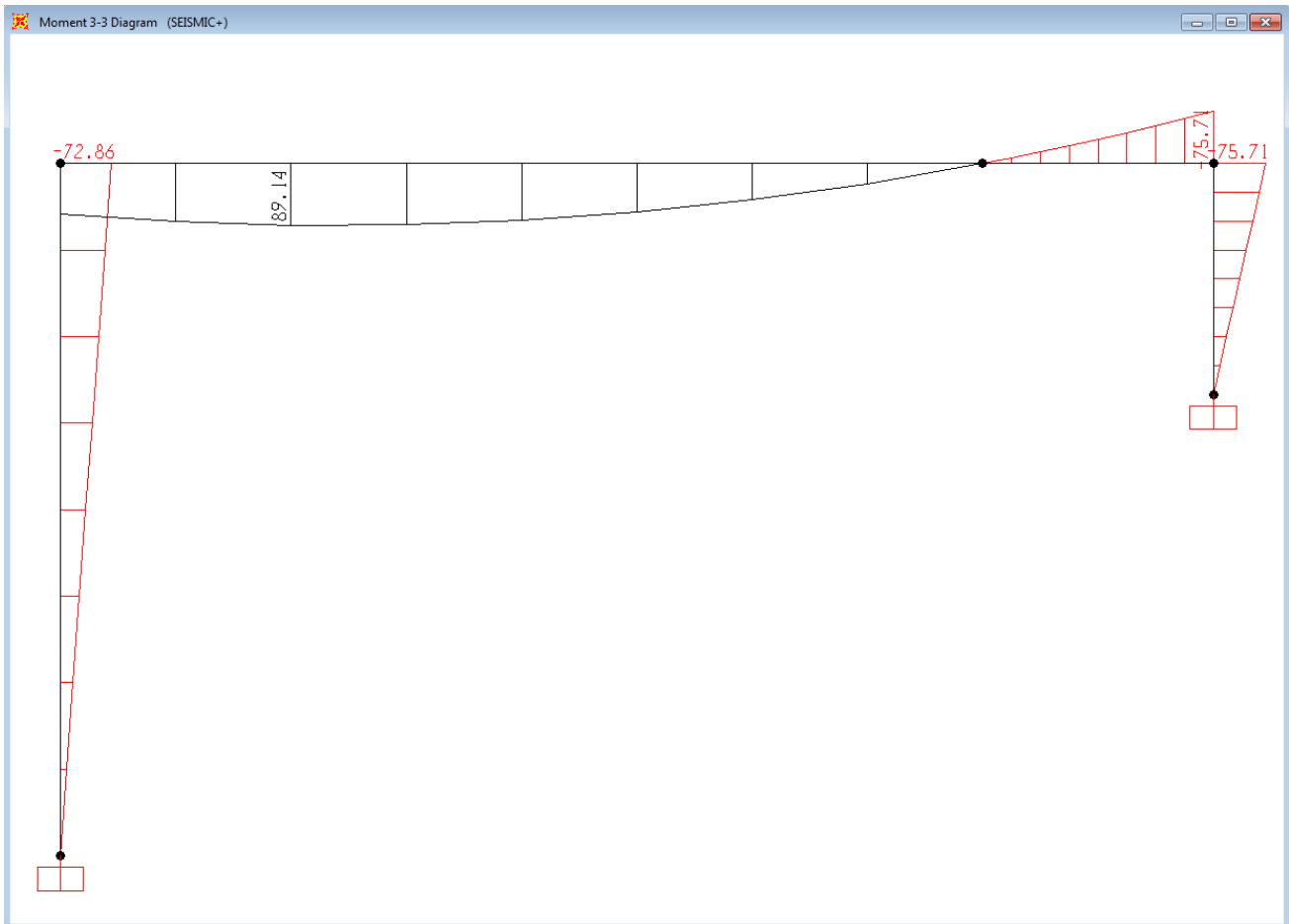


Σχήμα 4.6 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής φορέα και μετακινήσεων κόμβου στη θέση της εσωτερικής άρθρωσης για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+*.

4.4.2. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

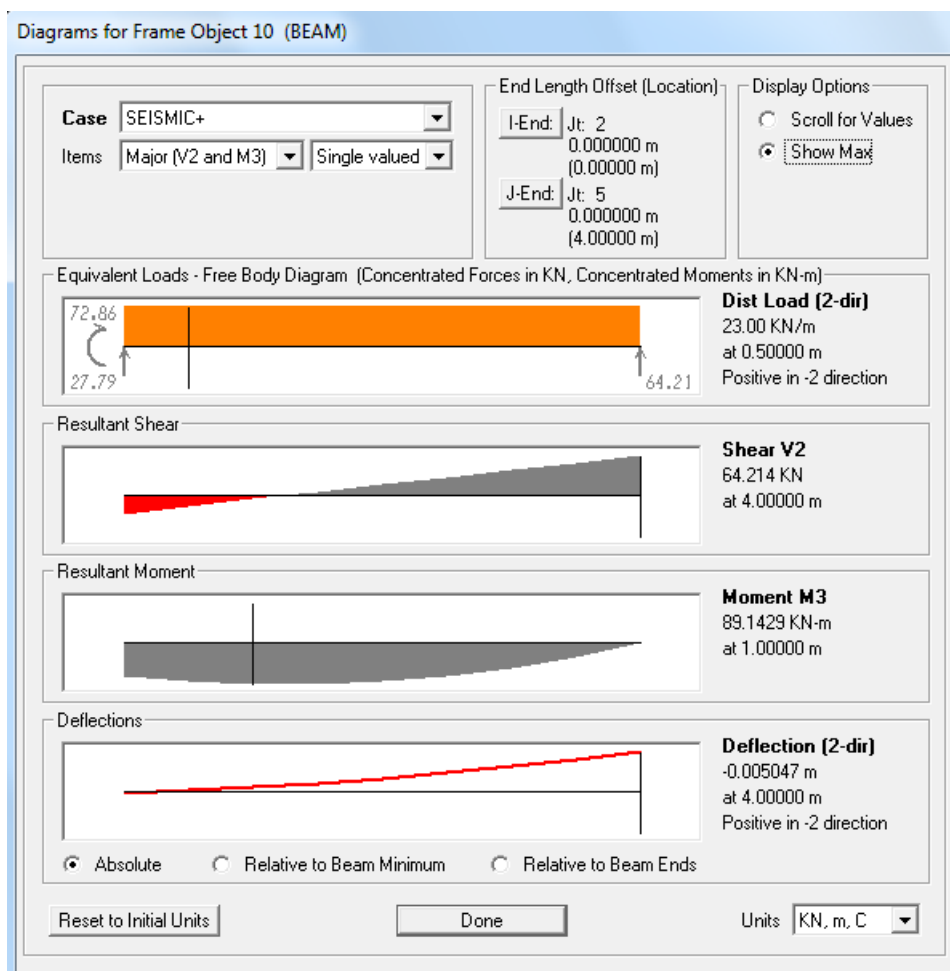
Για την εμφάνιση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών χρησιμοποιείται η εντολή *Display* → *Show Forces/Stresses* → *Frames/Cables*, όπου επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης (ενδεικτικά εδώ το *SEISMIC+*) και ζητείται το επιθυμητό εντατικό μέγεθος (εδώ οι καμπτικές ροπές *Moment 3-3*). Με την επιλογή *Show Values on Diagram* δίνεται η δυνατότητα εμφάνισής του σχετικού διαγράμματος με τιμές στα χαρακτηριστικά του σημεία. Το διάγραμμα καμπτικών ροπών λαμβάνει τελικά τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4.7.

Σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα του προηγούμενου παραδείγματος, παρατηρείται πως η ροπή στη βάση των υποστυλωμάτων είναι πλέον μηδενική, ενώ μηδενική ροπή εντοπίζεται και στη δοκό στη θέση της εσωτερικής άρθρωσης. Αυτό αποδεικνύει πως η προσομοίωση που επιλέχθηκε για τις εσωτερικές αρθρώσεις έφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Σχήμα 4.7 Εμφάνιση διαγράμματος καμπτικών ρομών για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (με επιλογή *Show Values on Diagram* στο προηγούμενο βήμα).

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η δοκός πλέον αποτελείται από δυο γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία. Συνεπώς, όταν γίνεται πλέον δεξί *click* στη δοκό, εμφανίζονται τα σχετικά διαγράμματα εντατικών μεγεθών χωριστά για το αριστερά και χωριστά για το δεξιό τμήμα της δοκού. Πράγματι, με δεξί *click* πάνω στον άξονα του αριστερά τμήματος εμφανίζονται λεπτομέρειες της εντατικής κατάστασης ανά ζεύγη σχετιζόμενων μεγεθών (Σχήμα 4.8). Από το *Items* μπορούν να επιλεγούν άλλα εντατικά μεγέθη, ενώ αλλάζοντας το *Case* παρουσιάζονται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για άλλη φορτιστική κατάσταση στο ίδιο γραμμικό στοιχείο. Η επιλογή *Show Max*, που έχει ενεργοποιηθεί στο Σχήμα 4.8, δείχνει τη μέγιστη τιμή για κάθε εμφανιζόμενο μέγεθος. Η παρακολούθηση της απόκλισης (*deflection*) της δοκού που επιλέγεται στο σχήμα αφορά την περίπτωση απόλυτης τιμής (*Absolute*), οπότε εμφανίζεται η απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου η οποία συμπίπτει με την τιμή που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη θέση στο Σχήμα 4.6 (παραμορφωμένη γραμμή του φορέα).



Σχήμα 4.8 Λεπτομέρειες διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών στο αριστερά τμήμα της δοκού για τη φορτιστική κατάσταση SEISMIC+ (επιλογή Show Max για την εμφάνιση της μέγιστης τιμής του κάθε μεγέθους).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 4^{ου} Κεφαλαίου

- Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (1989). *Concepts and applications of finite element analysis* (Third ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Fagan, M. J. (1992). *Finite Element Analysis: Theory and practice*. Harlow: Longmans.
- Hitchings, D. (Ed.). (1992). *NAFEMS – A finite element dynamics primer*. Birniehill, Glasgow: Bell and Bain Ltd.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99(5), 421-427.
- Σέξτος, Α., & Κατσάνος, Ε. (2009). *Τεχνικές προγραμματισμού και χρήση λογισμικού Η/Υ στις κατασκευές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αιβάζη.

Προσομοίωση πολυώροφου χωρικού φορέα

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 5 αναλύονται, με τη βοήθεια εφαρμοσμένου παραδείγματος, οι παράμετροι που αφορούν την προσομοίωση φορέα οπλισμένου σκυροδέματος στον χώρο. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: εναλλακτικές διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων, τοπικοί άξονες γραμμικών στοιχείων, επισκόπηση-διαχείριση τρισδιάστατου φορέα, σύνδεση και λειτουργία πεπερασμένων στοιχείων στον χώρο, μέθοδοι ανάλυσης σεισμικών δράσεων του EC8 (παρουσίαση μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης), αρίθμηση ορόφων στο στατικό προσομοίωμα, επιρροή στρεπτικών επιδράσεων, χωρική επαλληλία σεισμικών δράσεων, διαφραγματική λειτουργία σε πολυώροφους φορείς Ο/Σ, ανάγνωση αποτελεσμάτων ανάλυσης σε χωρικούς φορείς, ανάγνωση μετακινήσεων από σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης, ανάγνωση εντατικών μεγεθών γραμμικών στοιχείων βάσει των τοπικών αξόνων.

Προαπαιτούμενη γνώση

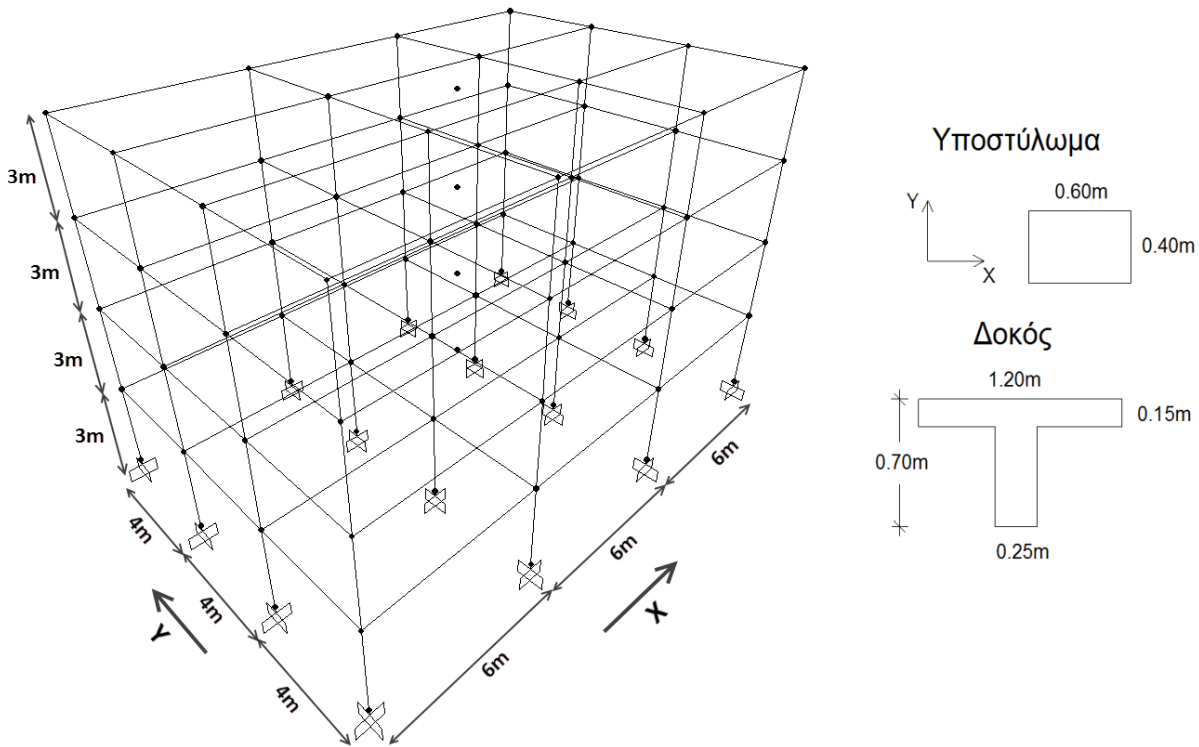
Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών και ικανότητα ανάγνωσης αντίστοιχων κανονιστικών κειμένων, όπως και πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

5.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του χωρικού πλαισίου που περιγράφεται στο Σχήμα 5.1, για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης, με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Το υλικό να ληφθεί με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο του κάθε ορόφου υπάρχει πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.
- Το μόνιμο, κατακόρυφο, ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο των δοκών ισούται με $G=19.5$ kN/m στους τυπικούς ορόφους και $G=13.0$ kN/m στον τελευταίο όροφο (εμπεριέχεται και το ίδιο βάρος της κατασκευής), ενώ το μεταβλητό με $Q=5.5$ kN/m σε όλους τους ορόφους.
- Η επιβολή της οριζόντιας σεισμικής φόρτισης θα γίνει μέσω ισοδύναμων στατικών φορτίων (οριζόντιων δυνάμεων), που θεωρείται πως ασκούνται στο κέντρο μάζας του κάθε ορόφου. Να ληφθεί

υπόψη κτίριο κατοικιών (με μη συσχετισμένη χρήση μεταξύ των ορόφων) για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ι, κατηγορία εδάφους Β και σχεδιασμός για κατηγορία πλαστιμότητας μέση.

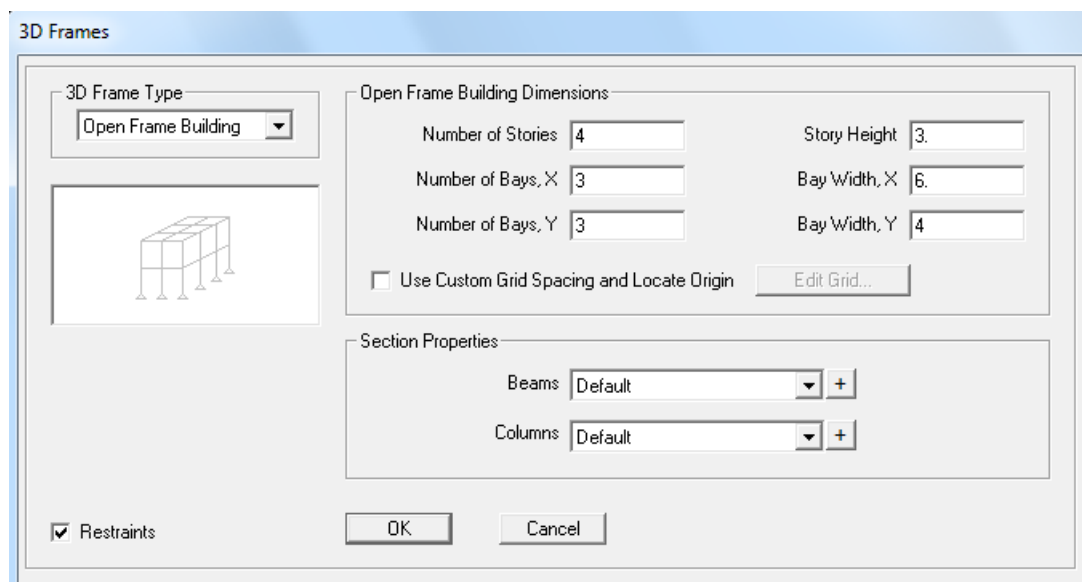


Σχήμα 5.1 Πολυώροφος χωρικός φορέας υπό κατακόρυφα και οριζόντια (σεισμικά) στατικώς επιβαλλόμενα φορτία και σκαρίφημα διατομών δοκών-υποστυλωμάτων.

5.2. Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα παραδείγματα, και στην περίπτωση του χωρικού πλαισίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει από ορισμένα τυποποιημένα πρότυπα που παρέχονται από το πρόγραμμα. Με το *File* → *New Model*, και αφού οριστούν οι κατάλληλες μονάδες μέτρησης (*kN*, *m*, *C*), επιλέγεται το τρισδιάστατο πλαίσιο (*3D Frames*) που οδηγεί στην εικόνα του Σχήματος 5.2. Στα κατάλληλα παιδιά ορίζονται τα επιθυμητά στοιχεία γεωμετρίας του φορέα, δηλαδή ο αριθμός ορόφων (*Number of Stories*) και το ύψος του κάθε ορόφου (*Story Height*), ο αριθμός ανοιγμάτων χωριστά στην κάθε διεύθυνση *X* και *Y* (*Number of Bays, X* και *Y* αντίστοιχα) και το μήκος του κάθε ανοίγματος στην κάθε διεύθυνση (*Bay Width, X* και *Y* αντίστοιχα). Μπορεί ακόμη να επιλεγεί η ύπαρξη στηρίξεων (*Restraints*) στον φορέα που θα δημιουργηθεί.

Καθώς ο αριθμός των δομικών στοιχείων που θα δημιουργηθούν είναι αρκετά μεγάλος, στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα γίνει χρήση της δυνατότητας που παρέχει το πρόγραμμα για εξ αρχής καθορισμό κατάλληλων διατομών σε δοκούς και υποστυλώματα. Αυτό μπορεί να γίνει από το πεδίο *Section Properties*, όπου στο *Beams* θα οριστούν οι διατομές των δοκών και στο *Columns* οι διατομές των υποστυλωμάτων. Με τον τρόπο αυτόν θα γίνει αυτόματα και η ανάθεση της κάθε διατομής στα κατάλληλα στοιχεία, δηλαδή των δοκών στα οριζόντια και των υποστυλωμάτων στα κατακόρυφα, δίχως να χρειαστεί αναλυτική και χρονοβόρα διαδικασία ανάθεσης στη συνέχεια από τον χρήστη.



Σχήμα 5.2 Καθορισμός παραμέτρων γεωμετρίας χωρικού πλαισίου.

Για την εισαγωγή αρχικά των διατομών υποστυλωμάτων, θα πρέπει να επιλεγεί το σύμβολο **+** δίπλα στα υποστυλώματα (*Columns*), οπότε δίνεται η δυνατότητα προσθήκης νέας ορθογωνικής διατομής (*Add New Property* → *Concrete* → *Rectangular*). Οι διαστάσεις της διατομής, όπως και οι συντελεστές τροποποίησης των ιδιοτήτων (*Property Modifiers*), ορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 5.3. Υπενθυμίζεται πως οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων της διατομής, με βάση τον *EC8 §4.3.1(7)* για ρηγματωμένες διατομές, προδιαγράφουν απομείωση της δυσκαμψίας και της δυστημσίας των στοιχείων στο 50% της αρχικής τους τιμής. Η απομείωση στο 10% της δυστρεψιάς, που αποτελεί απαίτηση του *EAK 2000 §3.2.3(2)*, διατηρείται στο παρόν σύμφωνα με σύσταση και σχετική επιστημονική τεκμηρίωση από τους Αβραμίδη, Αθανατοπούλου, Μορφίδη και Σέξτο (2011). Υπενθυμίζεται επίσης, πως η τιμή μηδενικού συντελεστή στα πεδία που αφορούν τη μάζα και το ίδιο βάρος της διατομής σχετίζεται με την απαίτηση για ανάλυση δίχως να ληφθεί υπόψη το ίδιο βάρος των στοιχείων, το οποίο άλλωστε αναφέρεται στην εκφώνηση πως έχει συνυπολογιστεί μέσα στα μόνιμα φορτία *G* των δοκών. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τα παραπάνω μπορούν να βρεθούν σε σχετικό πίνακα τιμών στο Παράρτημα Β.

Στο σημείο αυτό, πριν την ολοκλήρωση του ορισμού της διατομής, θα πρέπει να οριστεί και το υλικό της. Αυτό μπορεί να προστεθεί επιλέγοντας το σύμβολο **+** δίπλα στο *Material* (υλικό) και στη συνέχεια με χρήση της επιλογής *Add New Material* (προσθήκη νέου υλικού). Το νέο υλικό δημιουργείται με τρόπο όμοιο με το παράδειγμα του Κεφαλαίου 2, με τη διαφοροποίηση πως η τιμή του λόγου Poisson λαμβάνεται μηδενική σύμφωνα με τις προδιαγραφές των Κανονισμών για ρηγματωμένες διατομές σκυροδέματος (*EC2 §3.1.3(4)-EKΩΣ 2000 §Σ.2.5.3*). Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας του νέου υλικού και την επιστροφή στο παράθυρο ορισμού της διατομής υποστυλώματος, μπορεί πλέον να γίνει επιλογή του υλικού στο πεδίο *Material*.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την εισαγωγή των διαστάσεων της διατομής του υποστυλώματος στα κατάλληλα πεδία *Depth* και *Width* του Σχήματος 5.3. Το σωστό πεδίο εισαγωγής καθορίζεται από τους τοπικούς άξονες του γραμμικού στοιχείου του υποστυλώματος και τη συσχέτισή τους με τους γενικούς άξονες συντεταγμένων. Περισσότερες πληροφορίες περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

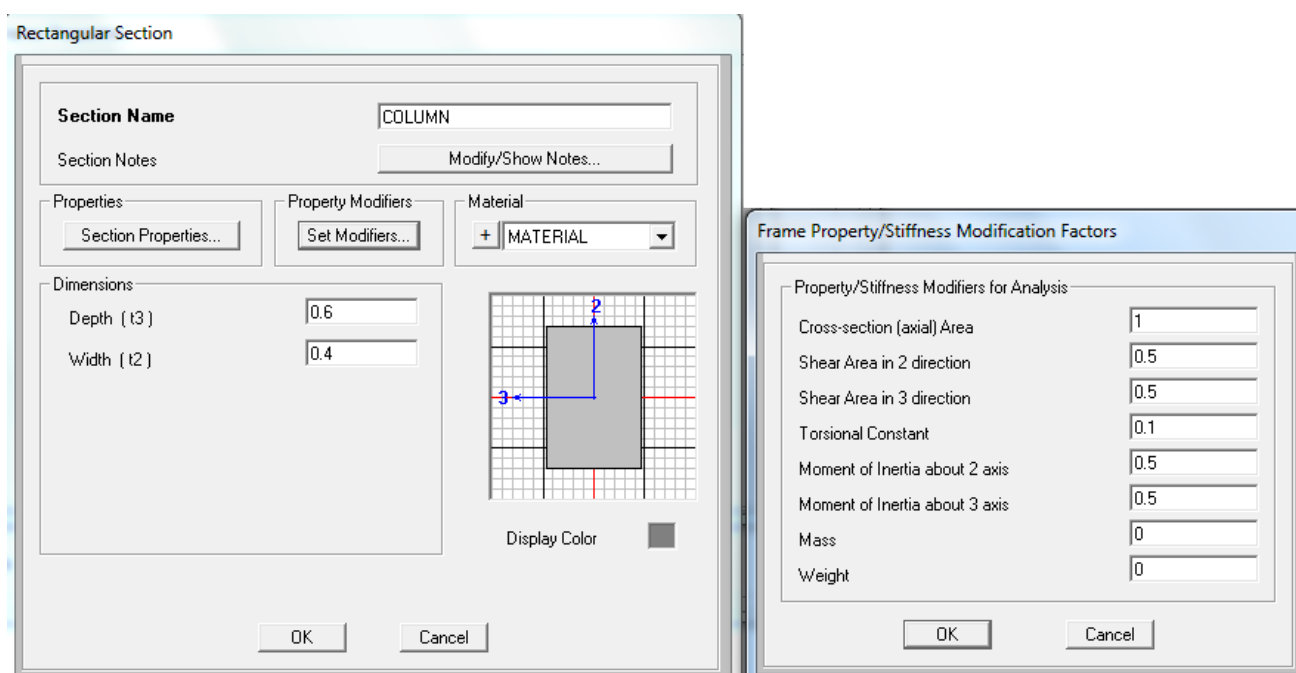
Τοπικοί άξονες γραμμικών στοιχείων

Όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α, ο προσανατολισμός των διατομών γραμμικών στοιχείων ρυθμίζεται από τους τοπικούς άξονες του κάθε στοιχείου που ορίζει το πρόγραμμα. Συνοπτικά αναφέρεται πως οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του *SAP 2000* απαιτούν για το σωστό προσανατολισμό των διατομών τα εξής:

- Ορθογωνικές δοκοί: Το ύψος δοκού τίθεται στο πεδίο *Depth* και το πλάτος δοκού τίθεται στο πεδίο *Width*.
- Πλακοδοκοί: Το ύψος δοκού τίθεται στο πεδίο *Outside Stem*, το συνεργαζόμενο πλάτος δοκού τίθεται στο πεδίο *Outside Flange*, το πλάτος δοκού στο πεδίο *Stem Thickness* και το πάχος της συνεργαζόμενης πλάκας στο πεδίο *Flange Thickness*.
- Υποστυλώματα: Η κατά *X* διάσταση της διατομής του υποστυλώματος τίθεται στο πεδίο *Depth* και η κατά *Y* διάσταση της διατομής τίθεται στο πεδίο *Width*.

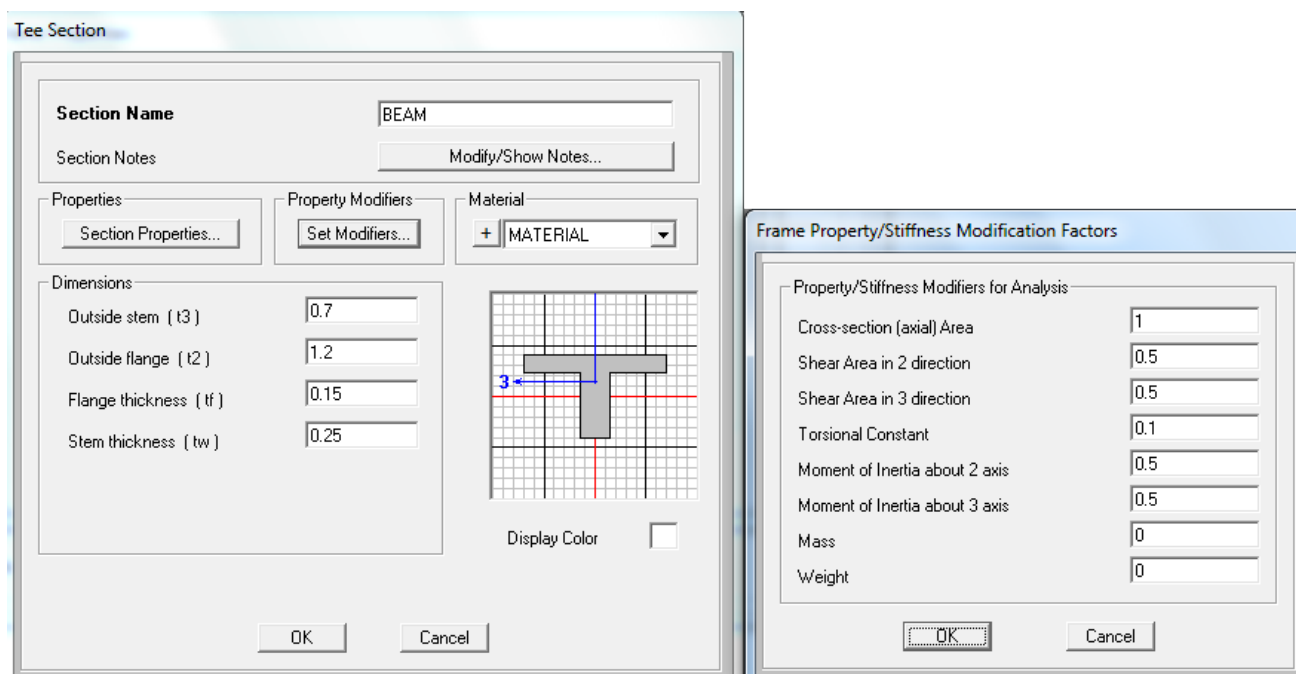
Πρέπει να σημειωθεί πως στο σκαρίφημα της διατομής, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.3, υπάρχει ενδεχόμενο να εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα κάποιες ράβδοι σπλισμού. Η συγκεκριμένη απεικόνιση αναφέρεται στο γεγονός πως η ορθογωνική διατομή προέρχεται από την ομάδα διατομών σκυροδέματος (*Concrete*), και είναι καθαρά σχηματική, δίχως δηλαδή οι ράβδοι που φαίνονται να αντιστοιχούν σε πραγματικό σπλισμό που τίθεται στο δομικό στοιχείο.

Μετά την ολοκλήρωση του καθορισμού της διατομής του υποστυλώματος, γίνεται επιστροφή με συνεχόμενα *OK* στο αρχικό παράθυρο γεωμετρίας του φορέα (Σχήμα 5.2). Εκεί, προς το παρόν, το όνομα της νέας διατομής εμφανίζεται τόσο στα υποστυλώματα (*Columns*) όσο και στις δοκούς (*Beams*).



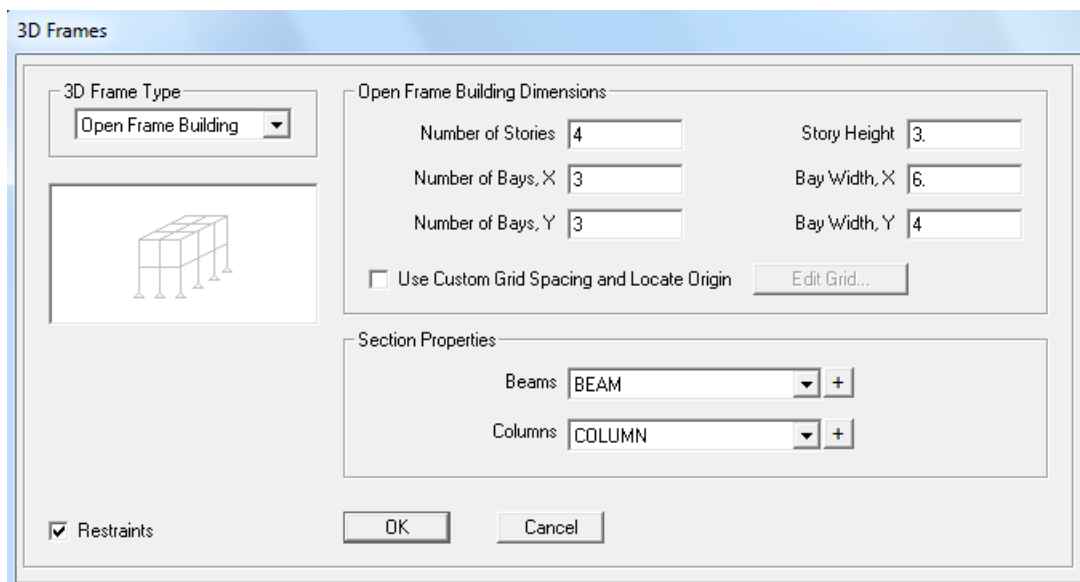
Σχήμα 5.3 Καθορισμός διατομής υποστυλωμάτων.

Στη συνέχεια, με αντίστοιχο τρόπο, εισάγεται η διατομή των δοκών (πλακοδοκός), επιλέγοντας το σύμβολο *+* δίπλα στις δοκούς (*Beams*) και με προσθήκη νέας διατομής τύπου *T* (*Add New Property* → *Steel* → *Tee*). Οι διαστάσεις της διατομής, όπως και οι συντελεστές τροποποίησης των ιδιοτήτων (*Property Modifiers*), ορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 5.4. Καθορίζεται το ύψος της δοκού (*Outside stem*), το συνεργαζόμενο πλάτος δοκού (*Outside flange*), το πάχος πλάκας (*Flange thickness*) και το πλάτος του κορμού της δοκού (*Stem thickness*). Και στην περίπτωση αυτή επιλέγεται το νέο υλικό που δημιουργήθηκε προηγουμένως (*MATERIAL*).

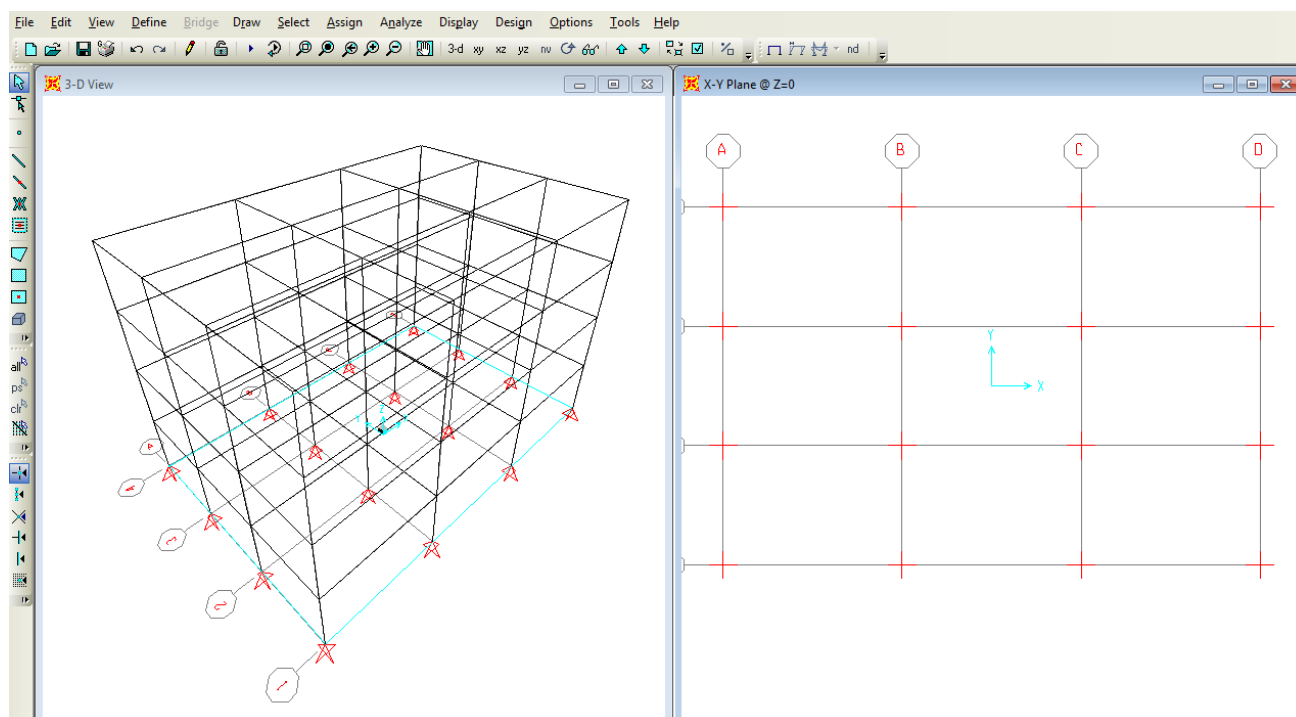


Σχήμα 5.4 Καθορισμός διατομής δοκών.

Επιστρέφοντας στο αρχικό παράθυρο, επιλέγεται η διατομή **BEAM** που μόλις δημιουργήθηκε για τις δοκούς και η διατομή **COLUMN** που δημιουργήθηκε για τα υποστυλώματα (Σχήμα 5.5). Τέλος, με **OK**, εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος ο φορέας του Σχήματος 5.6. Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει και η αποθήκευση του αρχείου ως **Chapter 05.sdb**.



Σχήμα 5.5 Τελικά στοιχεία γεωμετρίας φορέα (με τις διατομές δοκών και υποστυλωμάτων που δημιουργήθηκαν).



Σχήμα 5.6 Εικόνα φορέα στο πρόγραμμα.

Εναλλακτικές επιλογές εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ακολουθήθηκε μια ελαφρώς διαφορετική διαδικασία κατά την εισαγωγή του υλικού και των διατομών στα κατάλληλα στοιχεία του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, στα προηγούμενα παραδείγματα είχε επιλεγεί η σταδιακή εισαγωγή των βασικών δεδομένων, δηλαδή αρχικά της γεωμετρίας, στη συνέχεια του υλικού και μετά των διατομών, με τελευταίο βήμα την ανάθεση τους στα κατάλληλα γραμμικά στοιχεία του φορέα. Σε αυτό το παράδειγμα όλα γίνονται από το παράθυρο του πρώτου βήματος, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κάποιων ενεργειών και την αυτόματη ανάθεση των διατομών δοκών και υποστυλωμάτων στα κατάλληλα γραμμικά στοιχεία. Φαινομενικά η δεύτερη επιλογή είναι αποτελεσματικότερη, καθώς ο χρήστης αποφεύγει το στάδιο της ανάθεσης των διατομών στα κατάλληλα στοιχεία του φορέα. Πρέπει όμως να σημειωθεί, στην περίπτωση της δεύτερης διαδικασίας, πως θα πρέπει να γίνει ένας σημαντικός αριθμός ενεργειών πριν το πρόγραμμα δώσει τη δυνατότητα αποθήκευσης του αρχείου. Είναι συνεπώς συνετό, για έναν αρχάριο χρήστη, να χρησιμοποιεί την πρώτη διαδικασία της σταδιακής εισαγωγής δεδομένων, ώστε να αποθηκεύει σε κάθε βήμα το αρχείο. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται το ενδεχόμενο απώλειας της εργασίας του, σε περίπτωση που μια λανθασμένη ενέργεια οδηγήσει σε κλείσιμο του προγράμματος.

5.3. Επισκόπηση τρισδιάστατου φορέα

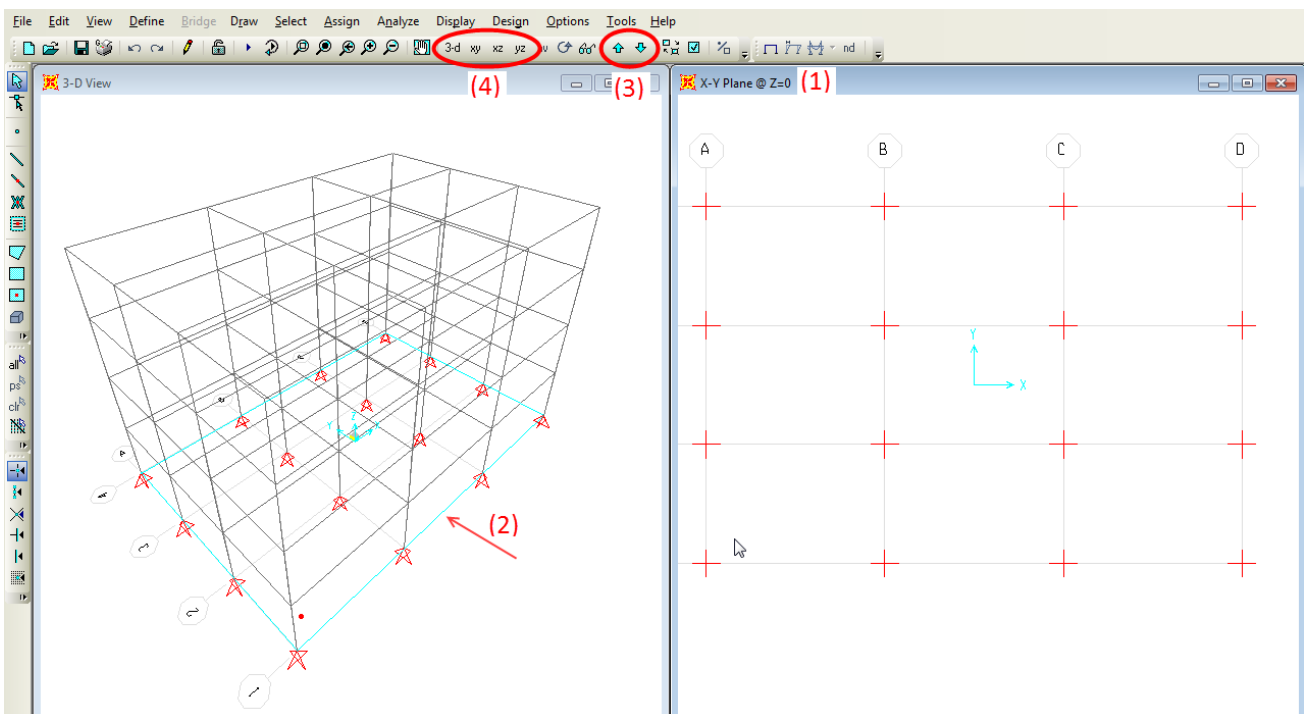
Η εισαγωγή των δεδομένων και ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του κάθε πεπερασμένου στοιχείου δεν είναι απλή διαδικασία, ιδίως όταν αφορά χωρικό φορέα που αποτελείται από σημαντικό αριθμό δομικών μελών. Συχνά η οπτική απεικόνιση στις τρεις διαστάσεις οδηγεί σε επικάλυψη γραμμικών στοιχείων, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα σαφές το στοιχείο το οποίο σχετίζεται με την κάθε ενέργεια του χρήστη. Κατά συνέπεια, είναι πολύ σημαντικό το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται να περιλαμβάνει διαδικασίες και τεχνικές που βοηθούν τον χρήστη και τον διευκολύνουν στη διαχείριση του προσομοιώματος.

Η προεπιλεγμένη εμφάνιση του φορέα στο **SAP 2000** αφορά δυο παράθυρα. Στο αριστερά παράθυρο εμφανίζεται η τρισδιάστατη άποψη του φορέα, ενώ στο δεξί μια επίπεδη όψη του (Σχήμα 5.7). Στο

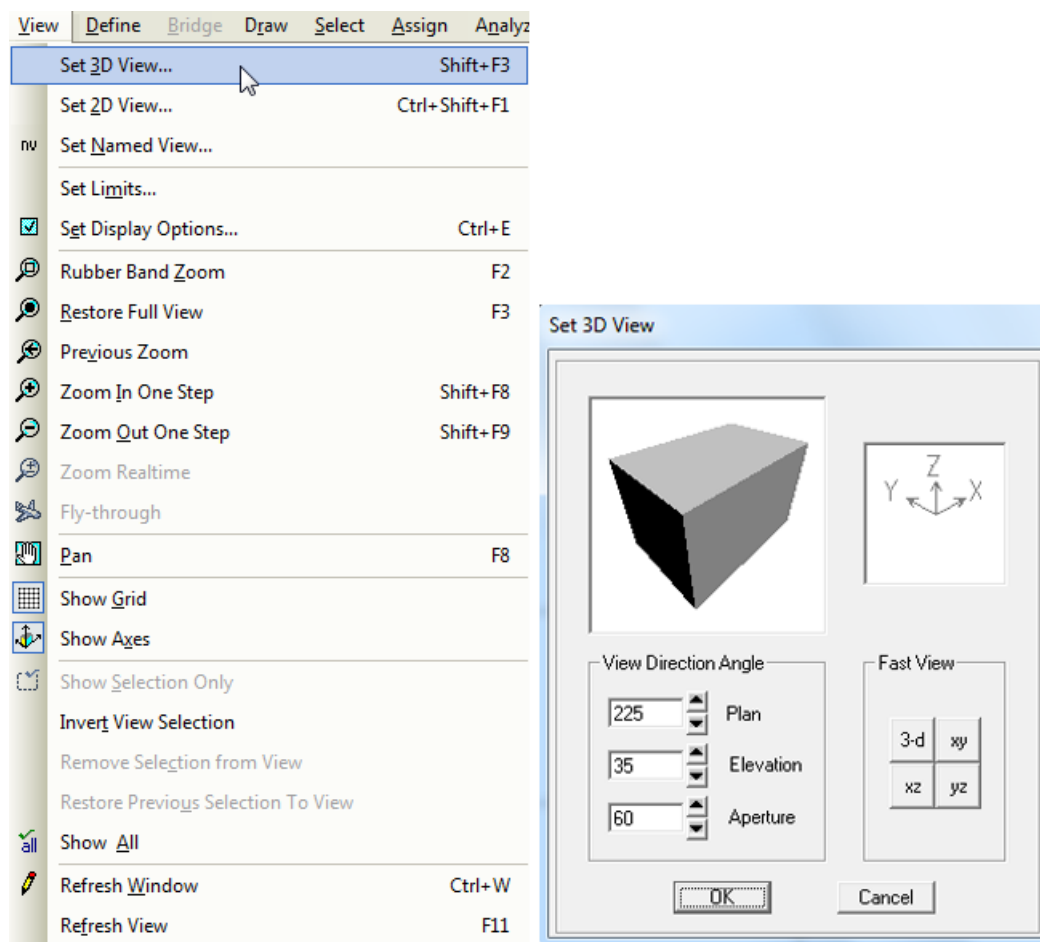
συγκεκριμένο παράδειγμα, στο δεξί παράθυρο εμφανίζεται η κάτοψη του κτιρίου, κάτι που γίνεται σαφές τόσο από τους γενικούς άξονες στο κέντρο της κάτοψης όσο και από τον τίτλο του παραθύρου *X-Y Plane @ Z=0* (επίπεδο *XY*, στάθμη *Z=0*). Η ίδια ένδειξη εμφανίζεται και στο κάτω αριστερά μέρος της οθόνης, όταν είναι επιλεγμένο το δεξί παράθυρο.

Η ένδειξη της στάθμης (ορόφου) της κάτοψης που απεικονίζεται στο δεξί παράθυρο, δηλώνεται από την ένδειξη *Z=0* στον τίτλο του παραθύρου, όπως φαίνεται στο σημείο (1) του Σχήματος 5.7. Παράλληλα, εφόσον ενεργοποιηθεί το συγκεκριμένο παράθυρο, η στάθμη του ορόφου εμφανίζεται ως μια γαλάζια γραμμή στον τρισδιάστατο φορέα του αριστερά παραθύρου, στο σημείο (2) του Σχήματος. Η επιλεγμένη στάθμη μπορεί να αλλάξει εύκολα, με τα κατάλληλα εργαλεία με τη μορφή βέλους που βρίσκονται στο σημείο (3), στην οριζόντια σειρά εργαλείων του προγράμματος. Παρατηρείται πως με ενεργοποίηση του πάνω βέλους, η κάτοψη αναφέρεται σε όλο και υψηλότερη στάθμη (επόμενο όροφο), μεταβάλλοντας παράλληλα την τιμή του *Z* στον τίτλο του παραθύρου αλλά και τη θέση του γαλάζιου περιγράμματος στο παράθυρο με την τρισδιάστατη όψη φορέα. Εναλλακτικά, η επιλογή στάθμης μπορεί να γίνει μέσω της εντολής *View → Set 2D view* και εισαγωγή της επιθυμητής τιμής *Z*.

Τέλος, η γενικότερη μορφή απεικόνισης του φορέα μπορεί να τροποποιηθεί με τα κατάλληλα εργαλεία ελέγχου, τα οποία φαίνονται στο σημείο (4) του Σχήματος 5.7. Μπορεί για το κάθε παράθυρο να επιλεγεί η επιθυμητή εμφάνιση του φορέα, είτε αυτή είναι η τρισδιάστατη (*3-d*), είτε αφορά κάποιο από τα επίπεδα *xy* (κάτοψη), *xz* ή *yz* (όψεις ή τομές). Η τρισδιάστατη όψη του φορέα μπορεί να περιστραφεί ή να μεταβληθεί, τόσο με τα βέλη του πληκτρολογίου όσο και με την εντολή *View → Set 3D view* και εισαγωγή των επιθυμητών τιμών στις διάφορες παραμέτρους που εμφανίζονται (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.7 Εργαλεία ελέγχου της απεικόνισης στο κάθε παράθυρο.

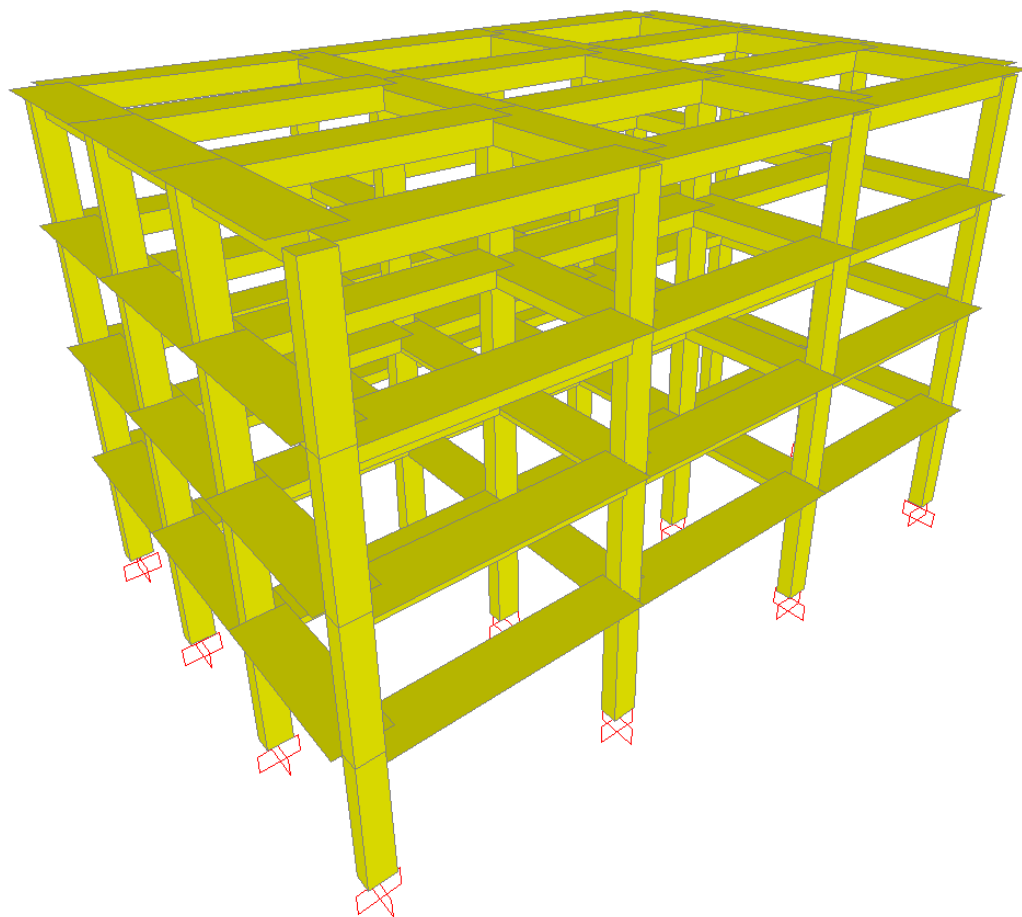


Σχήμα 5.8 Εντολές ελέγχου της τρισδιάστατης απεικόνισης.

Με επιλογή της όψης *xy* στο δεξί παράθυρο και επαναφορά στη στάθμη θεμελίωσης, μπορεί εύκολα να γίνει η επιλογή όλων των κόμβων της βάσης του φορέα, σχηματίζοντας με τον κέρσορα ένα πλαίσιο γύρω τους. Η ενέργεια αυτή διευκολύνεται εφόσον πρώτα ζητηθεί η πλήρης εμφάνιση των κόμβων (*View* → *Set Display Options* και απενεργοποίηση του *Invisible*), κάτι που συνιστάται να γίνει και στα δυο παράθυρα για την ευκολότερη διαχείριση της γεωμετρίας του φορέα. Στη συνέχεια, με την εντολή *Assign* → *Joint* → *Restraints*, γίνεται αντικατάσταση των αρθρώσεων με πακτώσεις στη βάση των υποστυλωμάτων.

Ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων που ακολουθήθηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα επέτρεψε την εξαρχής ανάθεση των διατομών στα αντίστοιχα δομικά στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων. Πράγματι, αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί με δεξί *click* στις αντίστοιχες διατομές, όπου στην καρτέλα *Assignments* στο πεδίο *Section Property* φαίνεται ότι στις δοκούς έχει ήδη δοθεί η διατομή *BEAM* και στους στύλους η διατομή *COLUMN*. Μπορεί συνεπώς να εμφανιστεί και η σχηματική τρισδιάστατη απεικόνιση των διατομών του φορέα, κατά προτίμηση στο αριστερά παράθυρο της *3-d* όψης, με την εντολή *View* → *Set Display Options* → *Extrude View*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9.

Η εικόνα της αμφίπλευρης πλακοδοκού ακόμη και για τις περιμετρικές δοκούς του φορέα ενδεχομένως να ξενίζει, καθώς για τις συγκεκριμένες θέσεις αναμένεται μονόπλευρη πλακοδοκός μορφής Γ. Σημειώνεται όμως πως το τελικό αποτέλεσμα δεν διαφοροποιείται, καθώς αν τεθεί το σωστό συνεργαζόμενο πλάτος προκύπτει η ίδια τιμή ροπής αδρανείας σε κάμψη της δοκού. Επιπροσθέτως, η χρήση διατομών μορφής Γ απαιτεί τη στροφή του τοπικού συστήματος αξόνων στις μισές δοκούς, ώστε το συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας να εμφανίζεται προς τη σωστή πλευρά του φορέα. Κάτι τέτοιο όμως ενδέχεται να προκαλεί σύγχυση και είναι σκόπιμο να αποφεύγεται, ειδικά από αρχάριο χρήστη αντίστοιχων προγραμμάτων ανάλυσης.



Σχήμα 5.9 Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών του φορέα.

5.4. Ορισμός φορτίων

5.4.1. Υπολογισμός σεισμικών φορτίων

Σύμφωνα με την εκφώνηση, ο συνυπολογισμός της σεισμικής δράσης ζητείται να γίνει με χρήση οριζόντιων στατικών φορτίων. Ο *Ευρωκώδικας 8 (EC8, §4.3.3(3))* δίνει τη δυνατότητα μεθόδου ανάλυσης με χρήση οριζόντιων στατικών φορτίων που θα προσομοιώνουν τις σεισμικές δράσεις (μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης), σε κτίρια που πληρούν κατάλληλες προϋποθέσεις κανονικότητας. Η διαδικασία πορείας υπολογισμού των εν λόγω φορτίων περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. προσδιορισμός της μάζας του κάθε ορόφου από τον κατάλληλο συνδυασμό κατακόρυφων φορτίων (αδρανειακό προσομοίωμα), και υπολογισμός της συνολικής μάζας του κτιρίου,
2. προσδιορισμός (έστω προσεγγιστικός) της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_1 για οριζόντια κίνηση στην κάθε διεύθυνση (προκύπτουν δυο τιμές, μια ανά διεύθυνση),
3. προσδιορισμός της επιτάχυνσης σχεδιασμού στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης από το φάσμα απόκρισης σχεδιασμού του *EC8* (προκύπτουν δυο τιμές, μια ανά διεύθυνση),
4. υπολογισμός της σεισμικής τέμνουσας βάσης κτιρίου ανά οριζόντια διεύθυνση,
5. υπολογισμός της σεισμικής δύναμης ανά όροφο που προκύπτει από την κατανομή καθ' ύψος της σεισμικής τέμνουσας βάσης.

Από τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω, ο αναλυτικός προσδιορισμός της μάζας του κάθε ορόφου και της συνολικής μάζας του κτιρίου υπάγονται στη διαδικασία καθορισμού του αδρανειακού προσομοιώματος ανάλυσης, και θα περιγραφούν στο Κεφάλαιο 9. Στο ίδιο Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί και ο προσδιορισμός του φάσματος απόκρισης για τα σεισμικά δεδομένα της κατασκευής.

Μέθοδοι ανάλυσης για σεισμικές δράσεις

Όπως αναφέρεται στον *EC8 §4.3.3(3)*, ανάλογα και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε κτιρίου, δίνονται δυο δυνατότητες γραμμικής ελαστικής ανάλυσης:

α) Μέθοδος Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης (lateral force method of analysis, *EC8 §4.3.3.2*): Είναι αντίστοιχη της Ισοδύναμης Στατικής Μεθόδου Ανάλυσης (ή απλοποιημένης φασματικής) του *EAK 2000 (§3.1.2)* και αφορά τη χρήση οριζόντιων στατικών φορτίων που προσομοιώνουν τις σεισμικές δράσεις. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κτίρια που πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

β) Ιδιομορφική Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης (modal response spectrum analysis, *EC8 §4.3.3.3*): Είναι αντίστοιχη της Δυναμικής Φασματικής Μεθόδου Ανάλυσης του *EAK 2000 (§3.1.2)* και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τύπο κτιρίου.

Σε περίπτωση που συντρέχουν συγκεκριμένες προϋποθέσεις, επιτρέπεται έως και η ανάλυση σε επίπεδα προσομοιώματα στην κάθε διεύθυνση του κτιρίου. Γενικότερα όμως προτείνεται η ανάλυση των κατασκευών στον χώρο, με εφαρμογή των σεισμικών δράσεων στις δυο ορθογώνιες διευθύνσεις που αναπτύσσονται τα φέροντα στοιχεία (υποφορείς) του κτιρίου (*EC8 §4.3.3.1(11)*).

Σημειώνεται πως η ανάγνωση αρκετών όρων στην ελληνική μετάφραση του *Ευρωκώδικα* δεν ανταποκρίνονται στους συνήθεις τεχνικούς όρους ούτε είναι οι πλέον δόκιμοι (Αβραμίδης και συνεργάτες, 2011). Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η Μέθοδος Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης είναι σαφώς καλύτερο να αποδίδεται με τον όρο Ισοδύναμη Στατική Μέθοδος Ανάλυσης ή Απλοποιημένη Φασματική Μέθοδος Ανάλυσης, οι οποίοι είναι ορθότεροι ετυμολογικά και έχουν καθιερωθεί τα τελευταία σχεδόν 20 χρόνια στον τεχνικό κόσμο από τους *Ελληνικούς Αντισεισμικούς Κανονισμούς*. Αντίστοιχα, η Ιδιομορφική Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης έχει επικρατήσει στον ελληνικό χώρο ως Δυναμική Φασματική Μέθοδος Ανάλυσης.

Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (στατικού τύπου φορτία)

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου ανάλυσης μπορεί να γίνει μόνο σε κτίρια η απόκριση των οποίων δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις υψηλότερες ιδιομορφές ανάλυσης, αλλά κυριαρχείται από τη θεμελιώδη ιδιομορφή (*EC8 §4.3.3.2.1(1)*). Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται σε κτίρια που ακολουθούν τα κριτήρια κανονικότητας καθ' ύψος (*EC8 §4.2.3.3*) και έχουν θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους ταλάντωσης στις δυο κύριες διευθύνσεις μικρότερες από 2.0s και 4T_c (τιμή ανάλογα με την κατηγορία εδάφους, σε κάθε περίπτωση προκύπτει τιμή όχι μικρότερη των 1.6s). Η απαίτηση που σχετίζεται με τις ιδιοπεριόδους καλύπτεται στην περίπτωση κατασκευών μέσου ύψους (κάτω από 10-15 ορόφους). Αντίστοιχα, από τα κριτήρια κανονικότητας καθ' ύψος (αναφέρονται και ως κριτήρια κανονικότητας σε όψη), τα σημαντικότερα αφορούν:

- συνεχή κατακόρυφα φέροντα συστήματα,
- σταθερή ή ελαφρώς και ομαλά μειούμενη μάζα και δυσκαμψία από τη βάση προς την κορυφή του κτιρίου,
- συνυπολογισμό τυχόν σημαντικής μη-κανονικότητας καθ' ύψος (π.χ. δραστική μείωση τοιχοπληρώσεων σε έναν ή περισσότερους ορόφους σε σχέση με άλλους) (*EC8 §4.3.6.3.2*),
- διαμόρφωση καθ' ύψος εσοχών που πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις (*EC8 §4.2.3.3(5)*).

Ο υπολογισμός της σεισμικής τέμνουσας βάσης, στην οποία θα βασιστεί ο προσδιορισμός των οριζόντιων φορτίων του κάθε ορόφου, γίνεται από την εξίσωση (*EC8 §4.3.3.2.2*):

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (5.1)$$

Στην παραπάνω σχέση, S_d είναι η τετμημένη του φάσματος σχεδιασμού (*EC8 §3.2.2.5*) στην περίοδο T_1 , m η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση (ή πάνω από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου) (*EC8 §3.2.4(2)*), και λ συντελεστής διόρθωσης της μάζας του κτιρίου που ενεργοποιείται κατά την 1^η ιδιομορφή.

Προσεγγιστικά, για κτίρια με ύψος έως 40m, η τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση (*EC8 §4.3.3.2.2(3)*):

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4} \quad (5.2)$$

Στην παραπάνω σχέση, ο συντελεστής C_t λαμβάνει τιμή 0.075 για πλαίσια από σκυρόδεμα, ενώ H είναι το ύψος, σε μέτρα (m), του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση (ή πάνω από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου). Στην περίπτωση μικτού συστήματος (υποστυλώματα και τοιχώματα) η τιμή του C_t λαμβάνεται ίση με 0.05, ενώ για διαφορετικό τύπο φέροντα οργανισμού κτιρίου προτείνονται από τον **EC8** εναλλακτικές απλοποιητικές προσεγγίσεις.

Όπως επισημαίνεται από τους Αβραμίδη και συνεργάτες (2011), οι διατάξεις του **EC8** που αναφέρονται στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν παρουσιάζονται με τρόπο συμβατό με τις γνωστές έννοιες της Δυναμικής των κατασκευών. Ενδεικτικά, γίνεται αναφορά σε θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους στις δυο κύριες διευθύνσεις, όταν είναι γνωστό πως η έννοια της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου αφορά αποκλειστικά την πρώτη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης του κτιρίου, ενώ εμπεριέχει και τις τρεις διευθύνσεις ταλάντωσης X, Y, Z. Πιθανολογείται ότι ο **Ευρωκώδικας** κάνει αναφορά στις δυο πρώτες ιδιοπεριόδους ταλάντωσης, οι οποίες, εφόσον το κτίριο πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια κανονικότητας, θεωρείται πως είναι μεταφορικές κατά τις δυο οριζόντιες διευθύνσεις του κτιρίου. Ενδέχεται βεβαίως να γίνεται αναφορά σε ασύζευκτη ιδιομορφή ανά διεύθυνση, η οποία όμως έχει ιδιαίτερη διαδικασία υπολογισμού που θα έπρεπε να περιγράφεται στο κανονιστικό κείμενο (όμοια με τον **EAK 2000**). Ταυτόχρονα, η δυνατότητα που περιγράφηκε παραπάνω για προσεγγιστικό υπολογισμό της ιδιοπεριόδου σε κτίρια ύψους έως 40m, κρίνεται από τους γράφοντες ως υπερβολικά απλοποιητική για να χρησιμοποιηθεί σε μια διαδικασία υπολογισμού του σεισμικού φορτίου στο στάδιο της ανάλυσης μιας κατασκευής.

Η καθ' ύψος κατανομή της σεισμικής τέμνουσας βάσης σε καθεμία από τις οριζόντιες διευθύνσεις ανάλυσης του κτιρίου, στην απλούστερη περίπτωση που η θεμελιώδης ιδιομορφή προσεγγίζεται από οριζόντιες μετακινήσεις γραμμικά αυξανόμενες με το ύψος, μπορεί να γίνει με την εξίσωση (**EC8 §4.3.3.2.3**):

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \quad (5.3)$$

Στην εξίσωση αυτή, z είναι τα ύψη των μαζών m πάνω από το επίπεδο εφαρμογής της σεισμικής δράσης (στάθμη θεμελίωσης ή άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου).

Η απλοποιημένη φασματική (ισοδύναμη στατική) μέθοδος του **EAK 2000 (§3.5)**, αντίστοιχη της παραπάνω ως προς τη χρήση οριζόντιων φορτίων στατικού τύπου για την προσομοίωση της σεισμικής καταπόνησης, απαιτεί επίσης τη συμμόρφωση με κάποια κριτήρια κανονικότητας, ενώ η κατανομή της σεισμικής τέμνουσας βάσης προκύπτει με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω στην περίπτωση του **EC8**. Μια συγκριτική παρουσίαση κριτηρίων κανονικότητας μεταξύ **EC8 - EAK 2000** γίνεται από τους Βαδαλούκα και Παπαχρηστίδη (2011). Βεβαίως, στην περίπτωση του **EAK 2000**, προτείνεται διαφορετική σχέση υπολογισμού της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, χρησιμοποιείται το φάσμα απόκρισης και οι κατηγορίες εδάφους του **Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού** (συγκριτική παρουσίαση μεταξύ **EC8 - EAK 2000** μπορεί να βρεθεί στον Σέξτο, 2011), ενώ η θέση εφαρμογής των οριζοντίων δυνάμεων προκύπτει με τρόπο που λαμβάνει υπόψη και τη στρεπτική καταπόνηση. Ο τρόπος κατανομής της σεισμικής δύναμης καθ' ύψος δίνεται από τις ίδιες πρακτικά σχέσεις με τον **EC8**, με μια τροποποίηση στην τιμή της τέμνουσας βάσης για κατασκευές με ιδιοπερίοδο άνω του 1.0s.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις μάζες ανά όροφο και τη συνολική μάζα του κτιρίου (ανάλυση στο Κεφάλαιο 9) φαίνονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 5.1. Ο απλοποιητικός προσδιορισμός της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, βάσει της Εξίσωσης 5.2 για πλαίσιακό φορέα σκυροδέματος συνολικού ύψους 12m, δίνει τιμή όμοια και για τις δυο διευθύνσεις και ίση με:

$$T_1 = 0.075 \cdot 12^{3/4} = 0.48s \quad (5.4)$$

Σημειώνεται πως αντίστοιχος υπολογισμός με τη σχέση που προτείνει ο **EAK 2000 (§3.5.2[1])**, θα έδινε διαφορετική τιμή θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ανά διεύθυνση, ίση με 0.25s κατά τη μεγάλη διεύθυνση και 0.31s κατά τη μικρή διεύθυνση της κατασκευής. Προκύπτει συνεπώς σημαντική διαφορά μεταξύ των

εκτιμήσεων των δυο κανονισμών, αν και σε επίπεδο τελικής φασματικής επιτάχυνσης οι διαφορές στη συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευής δεν είναι εξίσου έντονες, καθώς οι παραπάνω τιμές ιδιοπεριόδου βρίσκονται στο οριζόντιο τμήμα (πλατώ) του φάσματος απόκρισης των δυο Κανονισμών.

Στην περίπτωση του φάσματος σχεδιασμού του **EC8**, με βάση τις παραμέτρους που δίνονται στην εκφώνηση αναφορικά με τη σεισμική δράση, προκύπτει φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού ίση με 1.21m/s^2 (αναλυτικός υπολογισμός φάσματος απόκρισης στο Κεφάλαιο 9). Για τιμή διορθωτικού συντελεστή λ ίση με 0.85 (**EC8 §4.3.3.2.2(1P)**), προκύπτει βάσει της Εξίσωσης 5.1 σεισμική τέμνουσα βάσης ίση με:

$$F_b = 1.21 \cdot 925.06 \cdot 0.85 = 951.42\text{kN} \quad (5.5)$$

Η κατανομή της τέμνουσας βάσης στους επιμέρους ορόφους γίνεται με εφαρμογή της Εξίσωσης 5.3, ενώ η τελική σεισμική δύναμη κάθε ορόφου φαίνεται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 5.1. Σημειώνεται πως από τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, προέκυψε κοινή ιδιοπερίοδος και σεισμική τέμνουσα βάσης και κατά τις δυο διευθύνσεις ανάλυσης του κτιρίου.

Η πλήρης εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης προϋποθέτει και τον συνυπολογισμό των στρεπτικών επιδράσεων κατά τη σεισμική φόρτιση (**EC8 §4.3.3.2.4** και **§4.3.3.3.3**), κάτι που δεν θα συμπεριληφθεί στη συγκεκριμένη επίλυση για λόγους απλοποίησης του παραδείγματος. Εφαρμογή της συνεισφοράς των στρεπτικών επιδράσεων θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 9, κατά την παρουσίαση της δυναμικής φασματικής μεθόδου ανάλυσης με χρήση ιδιομορφών.

Όροφος	Μάζα	Σεισμική δύναμη (X, Y)
1ος όροφος	248.62t	107.10kN
2ος όροφος	248.62t	214.21kN
3ος όροφος	248.62t	321.31kN
4ος όροφος	179.20t	308.80kN
Σύνολο φορέα	925.06t	951.42kN

Πίνακας 5.1 Τιμές μάζας και σεισμικής τέμνουσας βάσης και κατανομή τους ανά όροφο.

Αρίθμηση ορόφων φορέα στο στατικό προσομοίωμα

Συχνά, κατά την ονομασία-αρίθμηση των ορόφων, δημιουργείται μια σύγχυση μεταξύ αρχιτεκτονικού και στατικού προσομοιώματος. Η συνήθης πρακτική, που ακολουθείται και στην αρίθμηση των ορόφων κατά την αρχιτεκτονική μελέτη, είναι η ονομασία του ορόφου ακριβώς πάνω από τη στάθμη του εδάφους ως «ισόγειο», ενώ οι υπόλοιποι όροφοι λαμβάνουν ονομασίες «1ος», «2ος» κ.ο.κ, αναφερόμενοι κάθε φορά σε πλήρη λειτουργικό όροφο μεταξύ δυο επιπέδων.

Κατά τη στατική προσομοίωση ενός φορέα, και κυρίως κατά τη μόρφωση του αδρανειακού προσομοιώματος που προορίζεται για δυναμική ή ιδιομορφική ανάλυση, συνηθίζεται ο αριθμός των ορόφων του κτιρίου να αφορά το συνολικό αριθμό πλακών σε στάθμες πάνω από τη στάθμη του εδάφους. Η συγκεκριμένη επιλογή διευκολύνει σημαντικά τη συσχέτιση με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του φορέα, καθώς η μάζα του κτιρίου θεωρείται συγκεντρωμένη στα επίπεδα των πλακών. Λόγω της διαφοροποίησης από την προηγούμενη πρακτική, οι όροφοι που αναφέρονται στο στατικό μοντέλο θα είναι πάντα κατά ένας περισσότεροι από τους ορόφους που αριθμεί η αρχιτεκτονική μελέτη. Ενδεικτικά, το ισόγειο κτίριο χαρακτηρίζεται από 1 αριθμό ορόφου στο στατικό προσομοίωμα, το διώροφο κτίριο χαρακτηρίζεται από 3 αριθμούς ορόφων (3 στάθμες πλάκας) στο στατικό προσομοίωμα κτλ.

Επιρροή στρεπτικών επιδράσεων για τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης

Η επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων, ειδικά στην περίπτωση της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης, μπορεί να γίνει με προσάυξη των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν σε κάθε στοιχείο ανά

διεύθυνση φόρτισης (EC8 §4.3.3.2.4). Ακριβέστερα, τόσο για τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης όσο και για την περίπτωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, προτείνεται η επιβολή ομόροπων στρεπτικών περί κατακόρυφο άξονα στατικών ροπών (EC8 §4.3.3.3.3) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$M_{oi} = e_{oi} \cdot F_i \quad (5.6)$$

Οι ροπές M πρέπει να εφαρμοστούν τόσο με θετικό όσο και με αρνητικό πρόσημο, ενώ οι εκκεντρότητα e του ορόφου προκύπτει από την εξίσωση (EC8 §4.3.2):

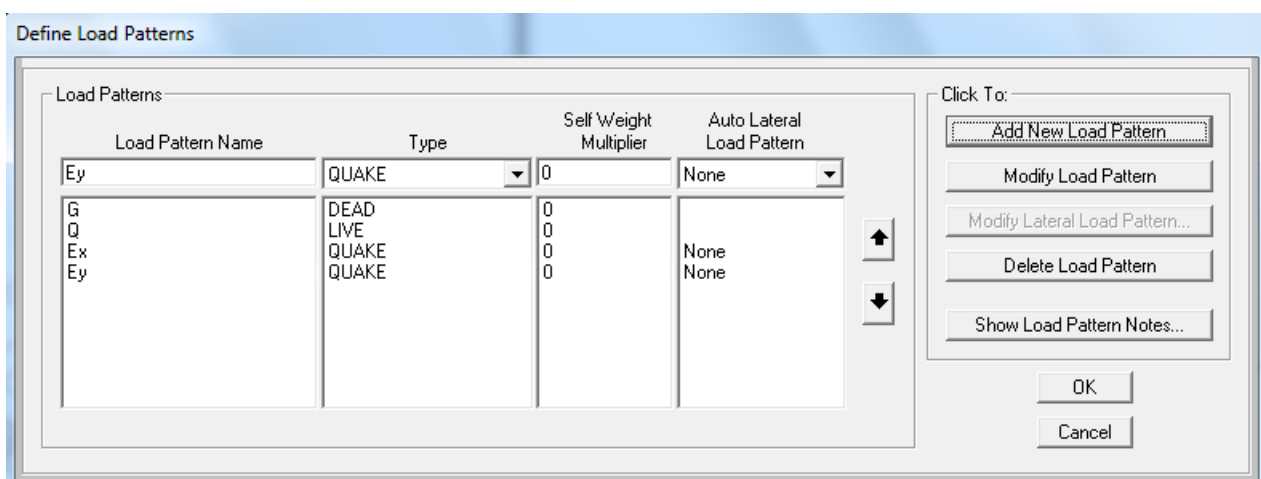
$$e_{oi} = \pm 0.05 \cdot L_i \quad (5.7)$$

Το μήκος L ισούται με τη διάσταση της κάτοψης του ορόφου που είναι κάθετη προς τη διεύθυνση εφαρμογής της σεισμικής δράσης.

Η επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων στην περίπτωση του EAK 2000 λαμβάνεται υπόψη με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μέθοδο ανάλυσης. Στην περίπτωση της ισοδύναμης στατικής μεθόδου, οι σεισμικές δυνάμεις εφαρμόζονται εκατέρωθεν του κέντρου μάζας, λαμβάνοντας υπόψη εκκεντρότητες σχεδιασμού ως προς τον (πραγματικό ή πλασματικό) ελαστικό άξονα του κτιρίου (EAK 2000 §3.3.3).

5.4.2. Καθορισμός μορφών φόρτισης

Οι μορφές φόρτισης (Define → Load Patterns) που πρέπει να καθορισθούν, αφορούν μόνο στατικά επιβαλλόμενα φορτία. Στην περίπτωση του παραδείγματος, θα πρέπει να δημιουργηθούν μορφές φόρτισης για τις κατακόρυφες δράσεις (G , Q) και για τα σεισμικά φορτία κατά τις δυο οριζόντιες διευθύνσεις (Ex και Ey), σύμφωνα με το Σχήμα 5.10. Θα πρέπει να τεθεί μηδενικός συντελεστής ίδιου βάρους (Self Weight Multiplier) για την κάθε μορφή φόρτισης, καθώς τα ίδια βάρη των δομικών στοιχείων του φορέα εμπεριέχονται, σύμφωνα με τα δεδομένα, στα μόνιμα κατανεμημένα φορτία δοκού. Σε περίπτωση που χρειαζόταν ο συνυπολογισμός του ίδιου βάρους για τις διατομές, αυτός θα έπρεπε να δοθεί μόνο στην κατηγορία των μόνιμων φορτίων. Μπορεί να τεθεί ο κατάλληλος τύπος (type) για την κάθε φόρτιση, δηλαδή DEAD για τις μόνιμες δράσεις, LIVE για τις μεταβλητές δράσεις και QUAKE για τις σεισμικές, αν και κάτι τέτοιο δεν κρίνεται απαραίτητο καθώς οι τελικοί συνδυασμοί δράσεων θα καταρτιστούν αναλυτικά από τον μελετητή.



Σχήμα 5.10 Καθορισμός μορφών φόρτισης (μόνιμες, μεταβλητές και σεισμικές δράσεις).

5.4.3. Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων

Στο πεδίο Define → Load Cases εμφανίζονται οι φορτιστικές καταστάσεις για τις οποίες ορίζεται να γίνει η ανάλυση. Ο ορισμός των φορτιστικών καταστάσεων (Load Cases) είναι αυτόματος για τις στατικού τύπου μορφές φόρτισης (Load Patterns) που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Οι καταστάσεις Dead (για τα ίδια βάρη) και Modal (ιδιομορφική ανάλυση) που προϋπάρχουν, δεν είναι απαραίτητες στο

συγκεκριμένο παράδειγμα και μπορούν να διαγραφούν (διαφορετικά, απλώς θα δίνουν μηδενικά αποτελέσματα μετά την ανάλυση).

Με *Modify/Show* σε κάθε *Load Case* θα πρέπει να γίνει έλεγχος ότι η αντίστοιχη μορφή φόρτισης εμπεριέχεται μια φορά (*scale factor 1*) στη λίστα *Loads Applied* της κάθε φορτιστικής κατάστασης, διαφορετικά η ανάλυση θα δώσει μηδενική καταπόνηση.

5.4.4. Καθορισμός συνδυασμών δράσεων

Ο βασικός συνδυασμός των κατακόρυφων και των σεισμικών φορτίων βάσει του *Ευρωκώδικα (EN1990 §6.4.3.2)* δόθηκε στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 3 για απλοποιημένη περίπτωση φορέα. Στο παρόν γίνεται μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της σεισμικής φόρτισης, καθώς απαιτείται επαλληλία των συνιστωσών του σεισμικού φορτίου στον χώρο. Επιλέγεται η χρήση απλοποιημένου συνδυασμού των δυο διευθύνσεων της σεισμικής δύναμης, η οποία, λαμβάνοντας υπόψη και τα κατακόρυφα φορτία, οδηγεί στους παρακάτω συνδυασμούς δράσεων:

$$1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q \quad (5.8)$$

$$G + 0.30 \cdot Q \pm E_x \pm 0.3 \cdot E_y \quad (5.9)$$

$$G + 0.30 \cdot Q \pm 0.3 \cdot E_x \pm E_y \quad (5.10)$$

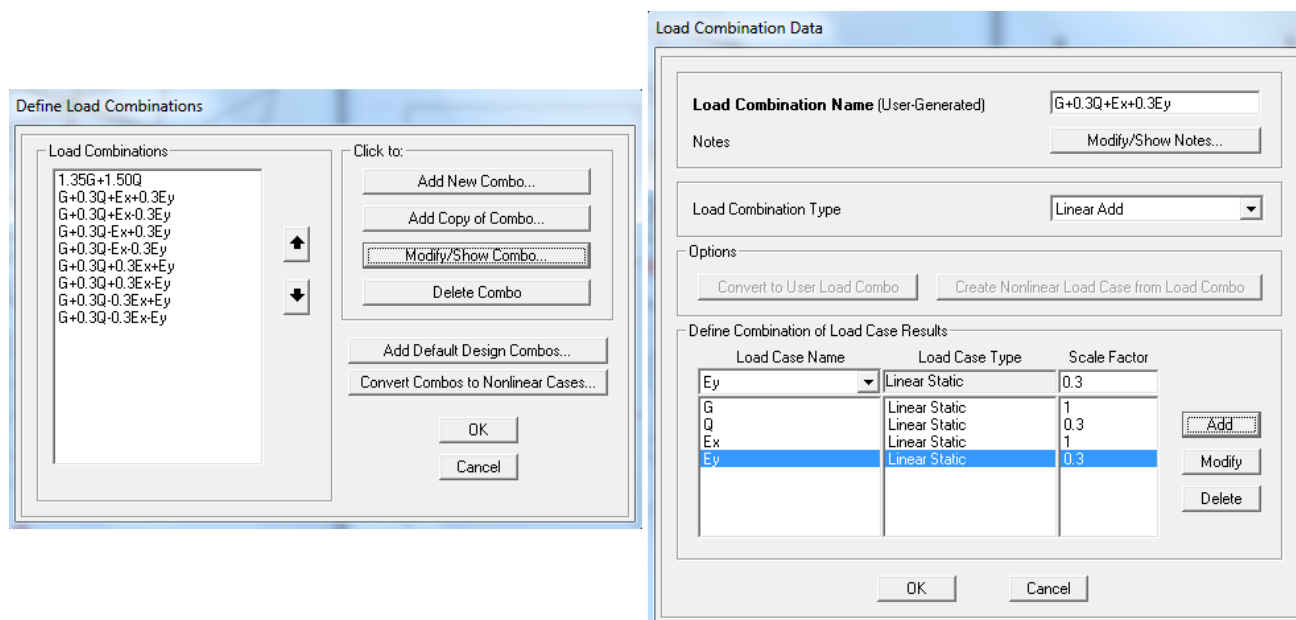
Συνολικά προκύπτουν 8 σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης, οι οποίοι μάλιστα θα τετραπλασιάζονταν αν είχαν συνυπολογιστεί και οι πρόσθετες ροπές που απορρέουν από τις στρεπτικές επιδράσεις στον φορέα. Από την εντολή *Define → Load Combinations*, γίνεται με το *Add New Combo* ο ορισμός των συνδυασμών φόρτισης. Ο ένας συνδυασμός αφορά τις καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια και περιέχει τα κατακόρυφα φορτία, ενώ άλλοι οχτώ αφορούν το σεισμικό συνδυασμό δράσεων, όπως προσδιορίστηκε προηγουμένως. Λαμβάνεται μέριμνα να δοθούν κατάλληλες ονομασίες στους σεισμικούς συνδυασμούς δράσεων ώστε να είναι εύκολη η αναγνώρισή τους (Σχήμα 5.11).

Χωρική επαλληλία σεισμικών δράσεων για τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης

Η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης αφορά κάθε μια από τις δυο οριζόντιες διευθύνσεις ανάλυσης του κτιρίου. Η χωρική επαλληλία των επιμέρους συνιστωσών περιγράφεται από τον *EC8* στην *§4.3.3.5* με τις εξής εναλλακτικές διαδικασίες:

- Υπολογισμός μέγιστης τιμής εντατικού μεγέθους από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων (SRSS – Square Root of the Sum of Squares). Γενικά προκύπτει συντηρητική εκτίμηση των πιθανών τιμών άλλων εντατικών μεγεθών ταυτόχρονων με αυτό που υπολογίζεται (π.χ. στην περίπτωση διαστασιολόγησης υποστυλώματος, η μέγιστη τιμή της ροπής σε μια διεύθυνση κανονικά δεν θα έπρεπε να εμφανίζεται ταυτόχρονα με τη μέγιστη τιμή της ροπής στην άλλη διεύθυνση και τη μέγιστη τιμή αξονικής δύναμης στο στοιχείο).
- Χρήση ακριβέστερων προσομοιωμάτων για την εύρεση των πιθανών ταυτόχρονων τιμών περισσότερων του ενός εντατικών μεγεθών.
- Υπολογισμός βάσει απλοποιημένου συνδυασμού των δυο δράσεων, λαμβάνοντας κάθε φορά τη μια διεύθυνση δράσης ολόκληρη και την άλλη με συντελεστή 0.3.

Η χωρική επαλληλία κατά την εφαρμογή της απλοποιημένης φασματικής (ισοδύναμης στατικής) μεθόδου του *EAK 2000 (§3.5.3)*, προτείνει τη χρήση μέγιστης (ακραίας) τιμής για ένα μέγεθος με διαδικασία SRSS και τον υπολογισμό των πιθανών ταυτόχρονων τιμών των υπόλοιπων εντατικών μεγεθών. Εναλλακτικά, επιτρέπεται η διαστασιολόγηση βάσει απλοποιημένου συνδυασμού των δυο δράσεων, λαμβάνοντας κάθε φορά τη μια διεύθυνση δράσης ολόκληρη και την άλλη με συντελεστή 0.3, όπως ακριβώς και στον *EC8*.

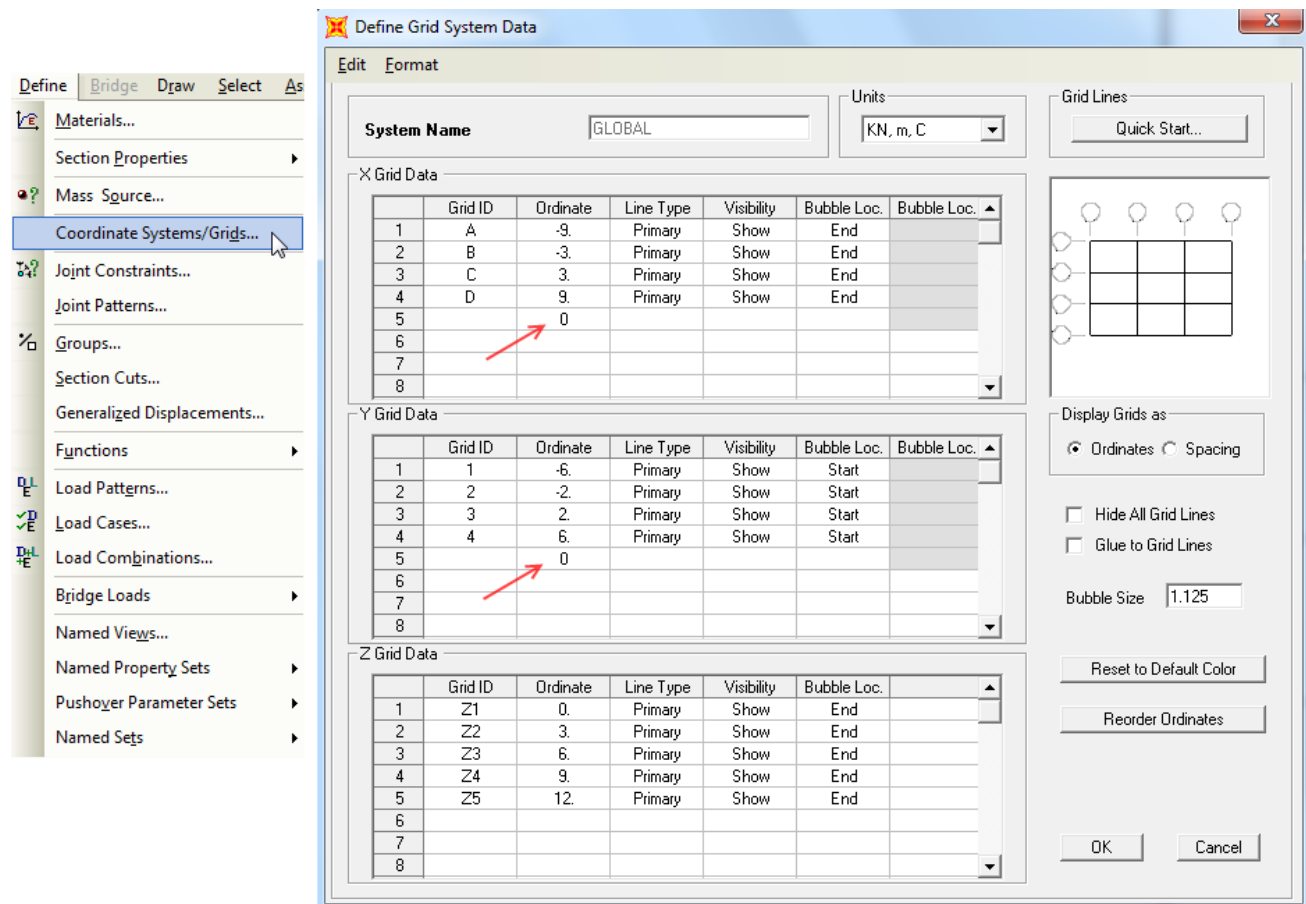


Σχήμα 5.11 Ορισμός συνδυασμών δράσεων (αριστερά) και ενδεικτικός σεισμικός συνδυασμός (δεξιά).

5.4.5. Ανάθεση φορτίων στον φορέα

Αφού καθοριστούν οι φορτιστικές καταστάσεις και οι συνδυασμοί φόρτισης, μπορεί να γίνει η ανάθεση των φορτίων στον φορέα. Η εφαρμογή των σεισμικών φορτίων γίνεται στο κέντρο μάζας της κάτοψης, το οποίο θεωρείται πως συμπίπτει με το γεωμετρικό της κέντρο. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να τοποθετηθεί κόμβος στο κέντρο της κάτοψης. Στο παρόν παράδειγμα ο πρόσθετος κόμβος θα τοποθετηθεί με χρήση των βοηθητικών γραμμών καννάβου (*Grid*).

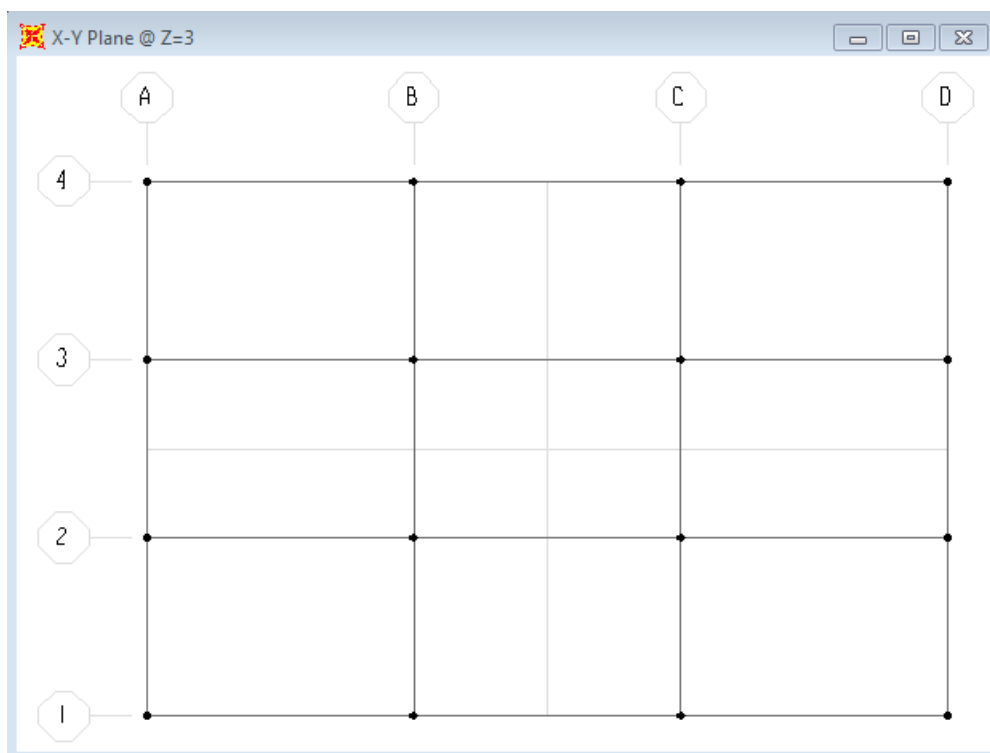
Από την εντολή *Define* → *Coordinate Systems/Grids* γίνεται τροποποίηση (*Modify/Show System*) του υφιστάμενου συστήματος βοηθητικών γραμμών *GLOBAL*. Προστίθενται οι βοηθητικές γραμμές με συντεταγμένες $X=0$ και $Y=0$ (Σχήμα 5.12), που αντιστοιχούν στο κέντρο της κάτοψης σύμφωνα με τη θέση της αρχής των αξόνων. Με *OK* γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας, όπου πλέον έχουν εμφανιστεί οι νέες βοηθητικές γραμμές καννάβου. Παρατηρείται πως οι νέες βοηθητικές γραμμές δεν έχουν κάποια αλφαριθμητική ονομασία. Εφόσον είναι επιθυμητή η ονομασία των νέων γραμμών καννάβου, μπορεί να οριστεί με κατάλληλη εισαγωγή τιμών στο πεδίο *Grid ID* (Σχήμα 5.12) κατά την τροποποίηση του συστήματος των βοηθητικών γραμμών σχεδίασης.



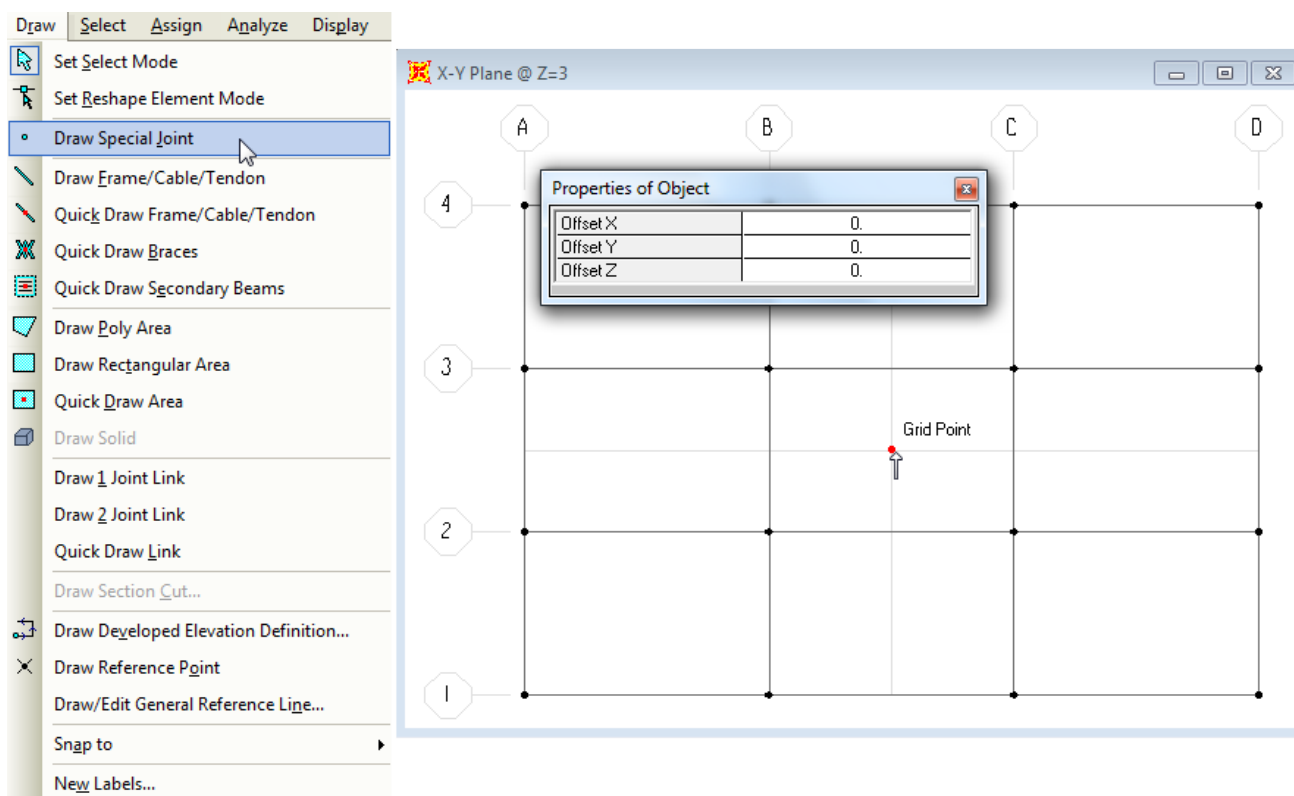
Σχήμα 5.12 Τροποποίηση συστήματος βοηθητικών γραμμών καννάβου.

Στη συνέχεια, επιλέγεται στο δεξί παράθυρο η κάτοψη xy του πρώτου ορόφου του κτιρίου (στάθμη $Z=3$, Σχήμα 5.13). Σημειώνεται πως η εκ νέου επιλογή της κάτοψης xy από το κατάλληλο εργαλείο είναι συχνά απαραίτητη, καθώς μετά από συγκεκριμένες εντολές ενδέχεται το παράθυρο να έχει λάβει 3-d μορφή, κάτι που δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό λόγω της απεικόνισης του κτιρίου από πάνω. Σε μια τέτοια περίπτωση δεν θα είναι ορατή η ένδειξη στάθμης $Z=...$ ούτε στον τίτλο του παραθύρου ούτε στο κάτω αριστερά μέρος του προγράμματος, ενώ επιλογή του δεξιού παραθύρου δεν θα εμφανίζει το γαλάζιο περίγραμμα γύρω από τον επιλεγμένο όροφο στην τρισδιάστατη απεικόνιση του άλλου παραθύρου.

Με την εντολή *Draw* → *Draw Special Joint* (Σχήμα 5.14) γίνεται εύκολα η προσθήκη του κόμβου στο σημείο της αρχής των αξόνων, καθώς όταν ο δείκτης πλησιάζει στο κέντρο της κάτοψης μπορεί να εστιάσει ακριβώς στη θέση που διασταυρώνονται οι βοηθητικές γραμμές. Αμέσως μετά τη σχεδίαση του κόμβου πρέπει να πληκτρολογηθεί το *Esc*, καθώς επαναλαμβανόμενα *click* μπορεί να δημιουργήσουν εσφαλμένα ανεπιθύμητους κόμβους.



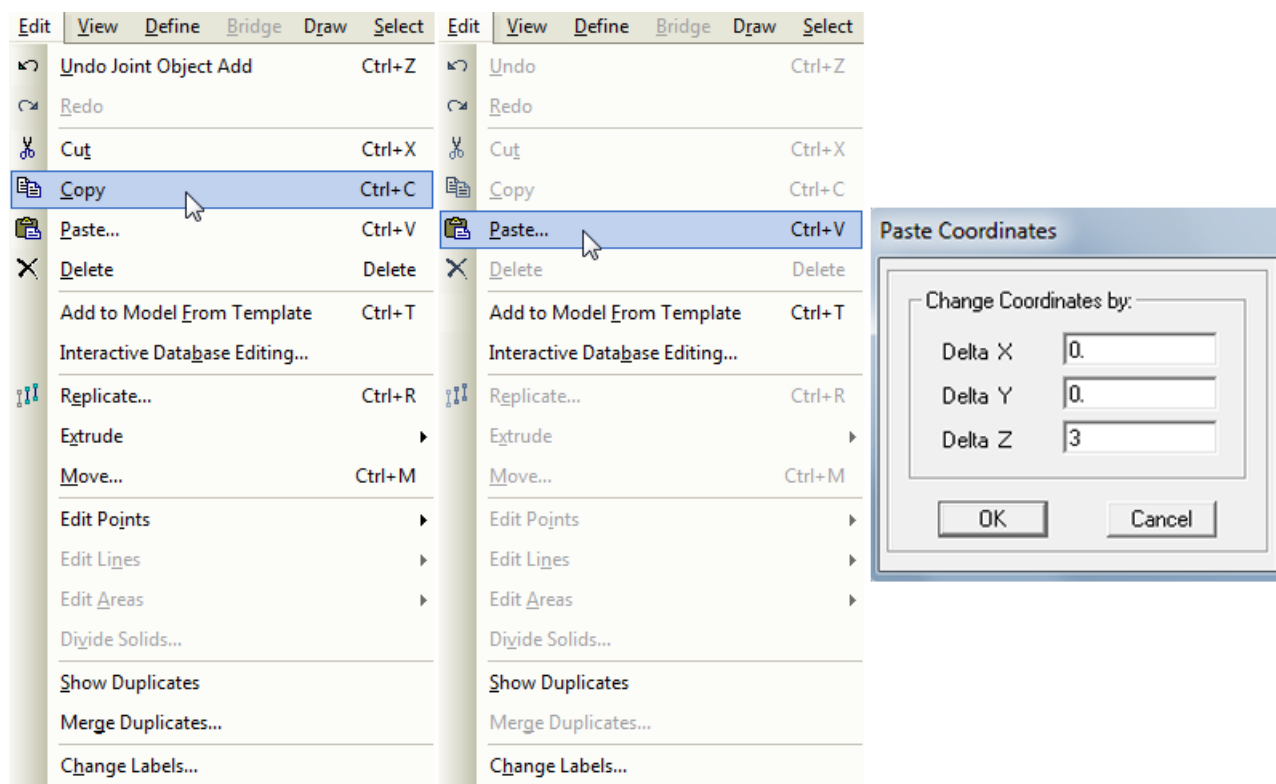
Σχήμα 5.13 Κάτοψη xy του φορέα στη στάση Z=3 (εμφανίζονται και οι νέες βοηθητικές γραμμές καννάβου).



Σχήμα 5.14 Σχεδίαση νέου κόμβου.

Η δημιουργία κόμβων στους υπόλοιπους ορόφους μπορεί να γίνει με τον ίδιο τρόπο. Εναλλακτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15, επιλέγεται ο κόμβος του 1ου ορόφου και γίνεται αντιγραφή του από την εντολή *Edit* → *Copy*. Στη συνέχεια, γίνεται με *Edit* → *Paste* επικόλληση του κόμβου στον 2ο όροφο, θέτοντας τιμή 3

στο πεδίο *Delta Z* (καθώς ο επόμενος όροφος απέχει +3m στη διεύθυνση *Z*). Με επαναλαμβανόμενα *Paste* με τιμές αντίστοιχα $\Delta z=6$ και $\Delta z=9$ γίνεται επικόλληση του κόμβου και στους υπόλοιπους ορόφους (ως τιμή Δz τίθεται πάντα η σχετική απόσταση από τον 1ο όροφο όπου έγινε η αντιγραφή του κόμβου).

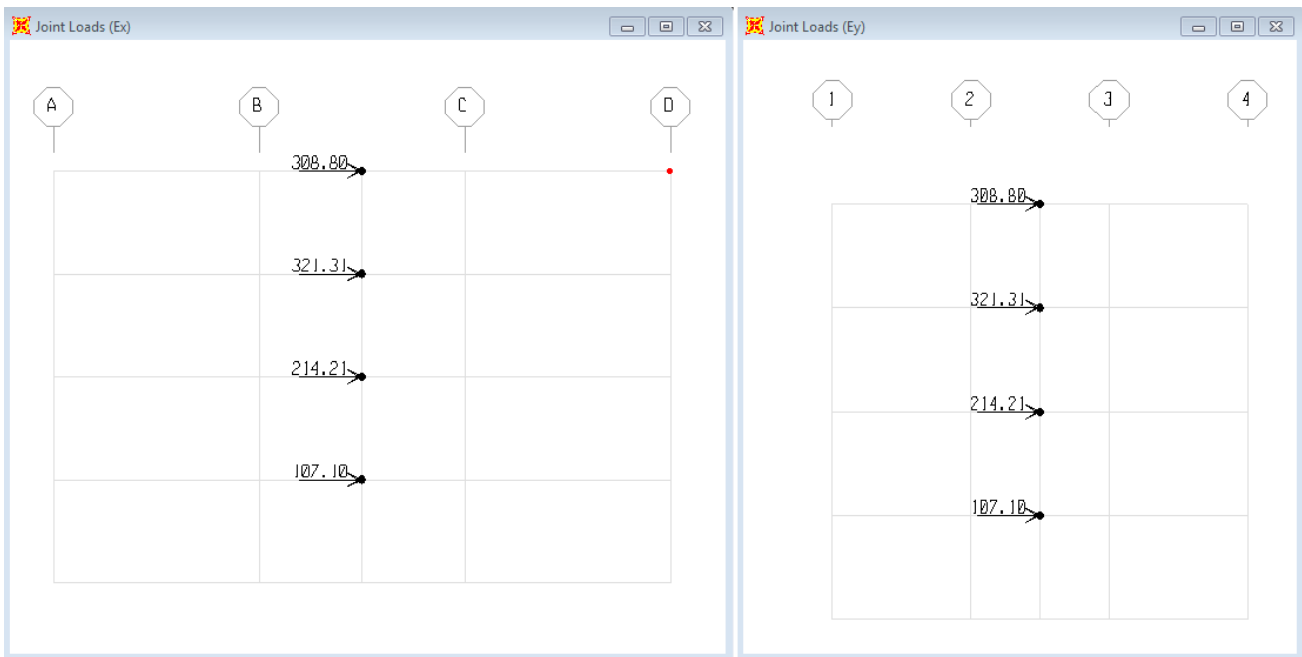


Σχήμα 5.15 Δημιουργία κόμβων στους υπόλοιπους ορόφους με διαδικασία αντιγραφής-επικόλλησης.

Με την ύπαρξη των πρόσθετων γραμμών καννάβου γίνεται πλέον ευκολότερη η εισαγωγή των επικόμβιων σεισμικών φορτίων, η οποία θα πραγματοποιηθεί σε επίπεδο *xz* για τα φορτία *Ex* και σε επίπεδο *yz* για τα φορτία *Ey*.

Επιλέγεται αρχικά το επίπεδο *xz*, μετακινώντας με τα βέλη την όψη του φορέα στη θέση όπου εμφανίζονται οι πρόσθετοι κόμβοι που δημιουργήθηκαν προηγουμένως (τομή με ένδειξη $Y=0$). Στη συνέχεια, αφού επιλεγεί ο κάθε κόμβος και με διαδοχική χρήση της εντολής *Assign* → *Joint Loads* → *Forces*, τοποθετούνται τα οριζόντια σεισμικά φορτία της X-διεύθυνσης στη μορφή φόρτισης *Ex* και στο πεδίο *Force Global X*, με τις τιμές που προσδιορίστηκαν στον Πίνακα 5.1 (Σχήμα 5.16, αριστερά).

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται σε επίπεδο *yz* για τη φορτιστική κατάσταση *Ey*, οπότε και εισάγονται τα φορτία της Y-διεύθυνσης στη μορφή φόρτισης *Ey* και στο πεδίο *Force Global Y* (Σχήμα 5.16, δεξιά). Ο ορισμός της κάθε επιβαλλόμενης σεισμικής δύναμης θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, κατά την επιλογή τόσο της κατάλληλης μορφής φόρτισης όσο και του σωστού πεδίου προς συμπλήρωση, για την αποφυγή λαθών που δεν θα είναι εύκολο να εντοπιστούν στη συνέχεια.

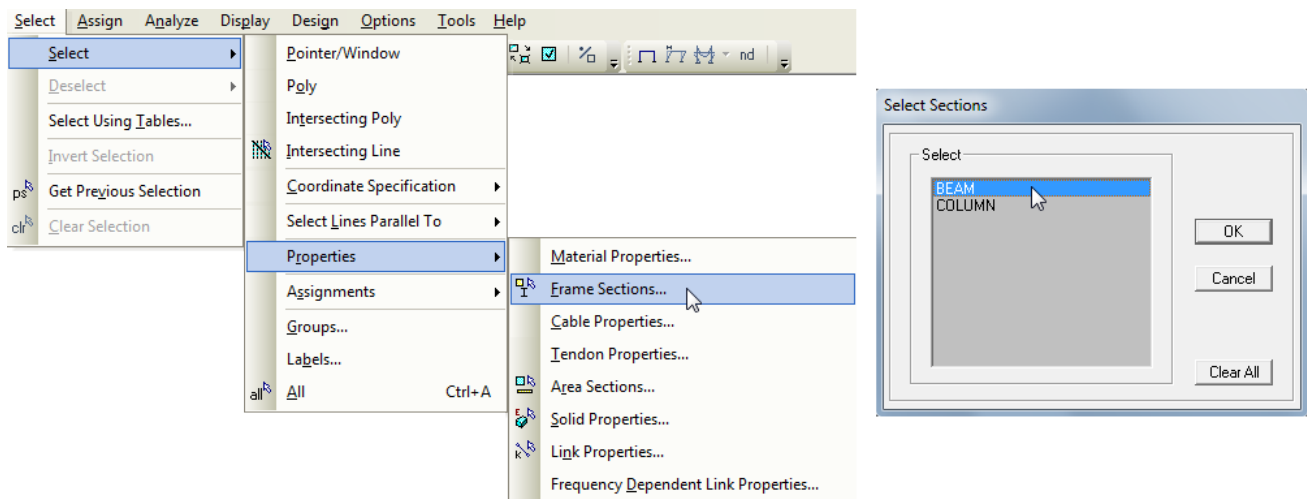


Σχήμα 5.16 Ανάθεση των επικόμβιων σεισμικών φορτίων στις δυο οριζόντιες διευθύνσεις (κατά X αριστερά και κατά Y δεξιά).

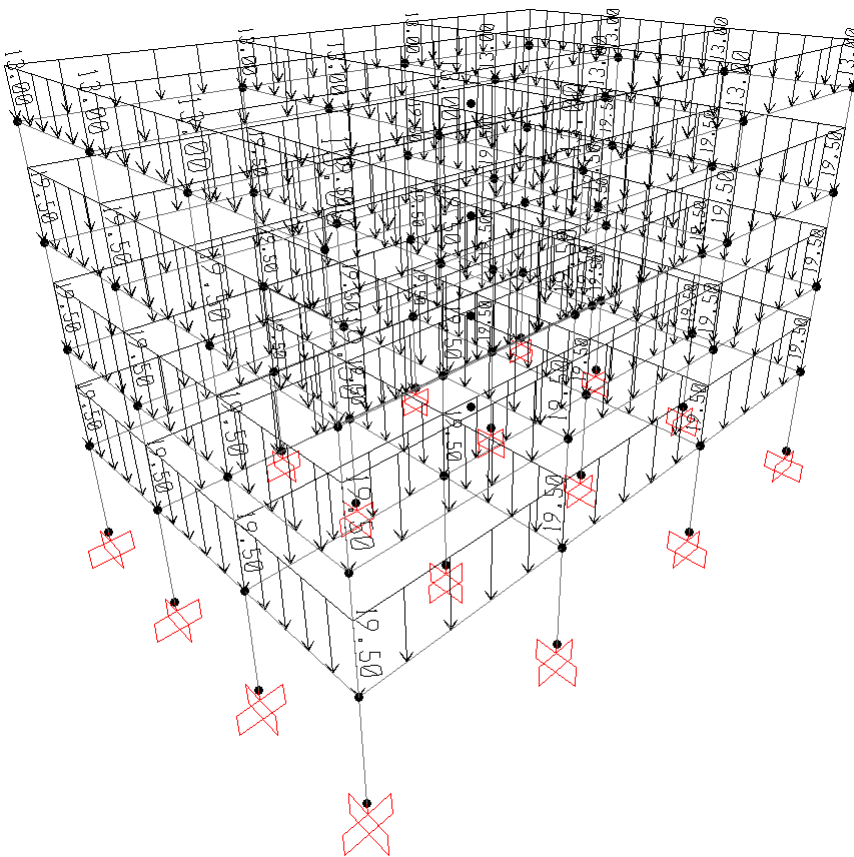
Στη συνέχεια θα πρέπει να ανατεθούν οι κατακόρυφες μόνιμες και μεταβλητές δράσεις στις δοκούς του φορέα. Η γρήγορη επιλογή των δοκών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εντολής *Select* → *Properties* → *Frame Sections* και μετά *BEAM*, προκειμένου να επιλεγούν όλα τα γραμμικά στοιχεία με διατομή δοκού στον φορέα (Σχήμα 5.17). Στο κάτω αριστερά μέρος του προγράμματος θα πρέπει να έχει εμφανιστεί η ένδειξη *96 Frames Selected*.

Η ανάθεση του κατανεμημένου φορτίου γίνεται από την εντολή *Assign* → *Frame Loads* → *Distributed*, οπότε αρχικά ανατίθεται το μόνιμο κατανεμημένο φορτίο των *19.5kN/m* στη μορφή φόρτισης *G*. Στην επόμενη φάση, με επανάληψη της διαδικασίας επιλογής των δοκών που περιγράφηκε, ανατίθεται το μεταβλητό κατανεμημένο φορτίο των *5.5kN/m* στη μορφή φόρτισης *Q*. Τέλος, και καθώς το μόνιμο φορτίο των δοκών του τελευταίου ορόφου είναι διαφορετικό, επιλέγεται στο δεξί παράθυρο η κάτοψη *xy* στη στάθμη των *Z=12m*. Σχηματίζοντας με τον κέρσορα πλαίσιο γύρω από το σύνολο της κάτοψης, επιλέγονται όλες οι δοκοί (*24 Frames selected*, τα επιλεγμένα *Points* είναι αδιάφορα) και τους ανατίθεται εκ νέου φόρτιση μόνιμου κατανεμημένου φορτίου στη μορφή *G*, αυτή τη φορά με τη σωστή τιμή ίση με *13.0kN/m*. Για να γίνει σωστά η διόρθωση της τιμής θα πρέπει να είναι ενεργοποιημένη η επιλογή του παραθύρου με την ένδειξη *Replace Existing Loads* (αντικατάσταση υφιστάμενων φορτίων).

Το τελικό αποτέλεσμα, εφόσον έχει επιλεγεί η τρισδιάστατη όψη του φορέα κατά τον ορισμό των φορτίων, φαίνεται αυτόματα στο Σχήμα 5.18. Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να ζητηθεί η εμφάνιση των κατανεμημένων φορτίων, αφού επιλεγεί το παράθυρο της *3-d* απεικόνισης, από την εντολή *Display* → *Show Load Assigns* → *Frame/Cable/Tendon* και επιλογή της επιθυμητής μορφής φόρτισης. Σχετικός έλεγχος της φόρτισης μπορεί να γίνει με δεξί *click* σε κάθε δοκό, από την καρτέλα *Loads*.



Σχήμα 5.17 Γρήγορη επιλογή δοκών σε όλο τον φορέα (μέσω επιλογής της αντίστοιχης διατομής).



Σχήμα 5.18 Τρισδιάστατη απεικόνιση του φορέα με τα μόνιμα κατανεμημένα φορτία δοκών.

5.5. Ορισμός διαφραγματικής λειτουργίας

Η ύπαρξη πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος στα επίπεδα των ορόφων λαμβάνεται υπόψη με τον ορισμό διαφράγματος στις συγκεκριμένες στάθμες, όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Στην περίπτωση του πολυώροφου φορέα του συγκεκριμένου παραδείγματος, επιλέγονται αρχικά όλοι οι κόμβοι της κατασκευής με την εντολή **Select** → **Select** → **All** ή με τη συντόμευση πληκτρολογίου **Ctrl+A**. Ο ορισμός του διαφράγματος γίνεται με χρήση της εντολής **Assign** → **Joint** → **Constraints**, όπου επιλέγεται διάφραγμα

(*Diaphragm*) το οποίο με *Add New Constraint* ορίζεται γύρω από τον κάθετο στην πλάκα άξονα (δηλαδή τον άξονα *Z*). Καθώς πρέπει να οριστεί ξεχωριστό διάφραγμα στον κάθε όροφο, είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση της επιλογής *Assign a different diaphragm constraint to each different selected Z level* (ανάθεση διαφορετικού διαφράγματος σε κάθε διαφορετική στάθμη *Z*).

Κατά την ανάθεση των διαφραγμάτων, πέρα από τους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων είναι απαραίτητη και η συμμετοχή των πρόσθετων κόμβων που δημιουργήθηκαν στο κέντρο μάζας του κάθε ορόφου. Καθώς μάλιστα οι σεισμικές δράσεις έχουν ανατεθεί στους συγκεκριμένους κόμβους, η συνύπαρξη τους στο διάφραγμα της κάθε στάθμης είναι αυτή που θα εξασφαλίσει τη μεταφορά των οριζόντιων φορτίων και στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του ορόφου.

Σφάλματα στον ορισμό των διαφραγμάτων

Ο ορισμός των διαφραγμάτων στο πρόγραμμα θα πρέπει να γίνεται αυστηρά ανά όροφο, είτε με διαδοχική επιλογή των ορόφων είτε με την αυτοματοποιημένη εντολή διαφορετικού διαφράγματος σε κάθε επίπεδο που προαναφέρθηκε. Ανάθεση του ίδιου διαφράγματος σε δυο διαφορετικούς ορόφους θα οδηγήσει σε λανθασμένη απόκριση του φορέα, καθώς οι δυο στάθμες θα εκτελέσουν ενιαία κίνησης. Συχνά μάλιστα τέτοιου τύπου σφάλματα είναι δύσκολο να εντοπιστούν.

Επισημαίνεται πως σε προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος δεν ήταν δυνατή η ανάθεση διαφράγματος σε κόμβο της βάσης του φορέα. Καθώς οι συγκεκριμένοι κόμβοι έχουν δεσμευμένους τους βαθμούς ελευθερίας λόγω στήριξης, ταυτόχρονη ανάθεση διαφράγματος οδηγούσε σε αδυναμία εκτέλεσης της ανάλυσης με σχετικό μήνυμα σφάλματος. Οι πρόσφατες εκδόσεις φαίνεται πως δεν αντιμετωπίζουν αντίστοιχο πρόβλημα, παραβλέποντας απλώς την ύπαρξη του διαφράγματος στη βάση του φορέα καθώς υπερκαλύπτεται από τις πακτώσεις.

5.6. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων

Για να την πύκνωση των θέσεων ελέγχου των αποτελεσμάτων επιλέγεται όλος ο φορέας (*Ctrl+A* ή το εργαλείο *All* της κατακόρυφης σειράς εργαλείων στο αριστερά μέρος της οθόνης) και με την εντολή *Assign → Frame → Output Stations* επιλέγεται η τιμή *9* και ανατίθεται με *OK* σε ολόκληρο τον φορέα.

5.7. Ανάλυση φορέα

Καθώς ο φορέας είναι χωρικός με φορτία και προς τις δυο διευθύνσεις, απαιτείται να εξασφαλιστεί ανάλυση του στον χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται από την εντολή *Analyze → Set Analysis Options* και επιλογή του πρώτου εικονιδίου (*Space Frame*).

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze → Run Analysis* και *Run Now*.

5.8. Αποτελέσματα

Η αποτύπωση και διαχείριση των αποτελεσμάτων είθισται να γίνεται σε επίπεδο τομών του χωρικού φορέα, κάτι που διευκολύνει και την ενδεχόμενη απαίτηση σχετικών εκτυπώσεων. Συνίσταται όμως η πρώτη ανάγνωση των αποτελεσμάτων, τα οποία αφορούν τόσο την παραμορφωμένη κατάσταση όσο και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών του φορέα, να γίνεται αρχικά στο παράθυρο της τρισδιάστατης απεικόνισης. Με τον τρόπο αυτόν είναι περισσότερο εύληπτη η εικόνα της παραμόρφωσης και οι διευθύνσεις καταπόνησης των διαφόρων δομικών στοιχείων από τα εντατικά μεγέθη. Απευθείας ανάγνωση

από τομές και επίπεδες όψεις του φορέα σχετίζονται πάντα με τον προσανατολισμό του γενικού συστήματος συντεταγμένων και ενδέχεται να προκαλέσουν σύγχυση, ειδικά σε μη έμπειρο χρήστη προγραμμάτων ανάλυσης κατασκευών.

5.8.1. Παραμορφωμένη γραμμή και μετακινήσεις

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραμορφωμένη γραμμή στην περίπτωση χωρικού φορέα είναι σκόπιμο να εμφανιστεί στο παράθυρο της τρισδιάστατης απεικόνισης. Έτσι, από την εντολή *Display → Show Deformed Shape*, επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και με *OK* εμφανίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα. Ενδεικτικά η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$ εμφανίζεται στο Σχήμα 5.19. Πλησιάζοντας σε κάποιον κόμβο εμφανίζονται οι μετακινήσεις του, οι οποίες μπορούν να ληφθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια με δεξιά *click* επάνω στον κόμβο. Στην πρώτη σειρά αποτελεσμάτων εμφανίζονται οι μετατοπίσεις και στη δεύτερη οι στροφές, ενώ οι άξονες 1, 2, 3 αντιστοιχούν στους γενικούς άξονες X, Y, Z (αυτό αφορά αποκλειστικά τους κόμβους, όπως επισημαίνεται στο Παράρτημα Α). Στον τίτλο του παραθύρου φαίνεται πάντα η κατάσταση φόρτισης για την οποία εικονίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα.

Η ενεργοποίηση του εργαλείου *Start Animation*, στο κάτω δεξιά τμήμα του προγράμματος, μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση οριζόντιας φόρτισης φορέα στον χώρο, καθώς μπορεί να δώσει την αίσθηση της διεύθυνσης κίνησης και να βοηθήσει στον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Ανάγνωση μετακινήσεων από σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης

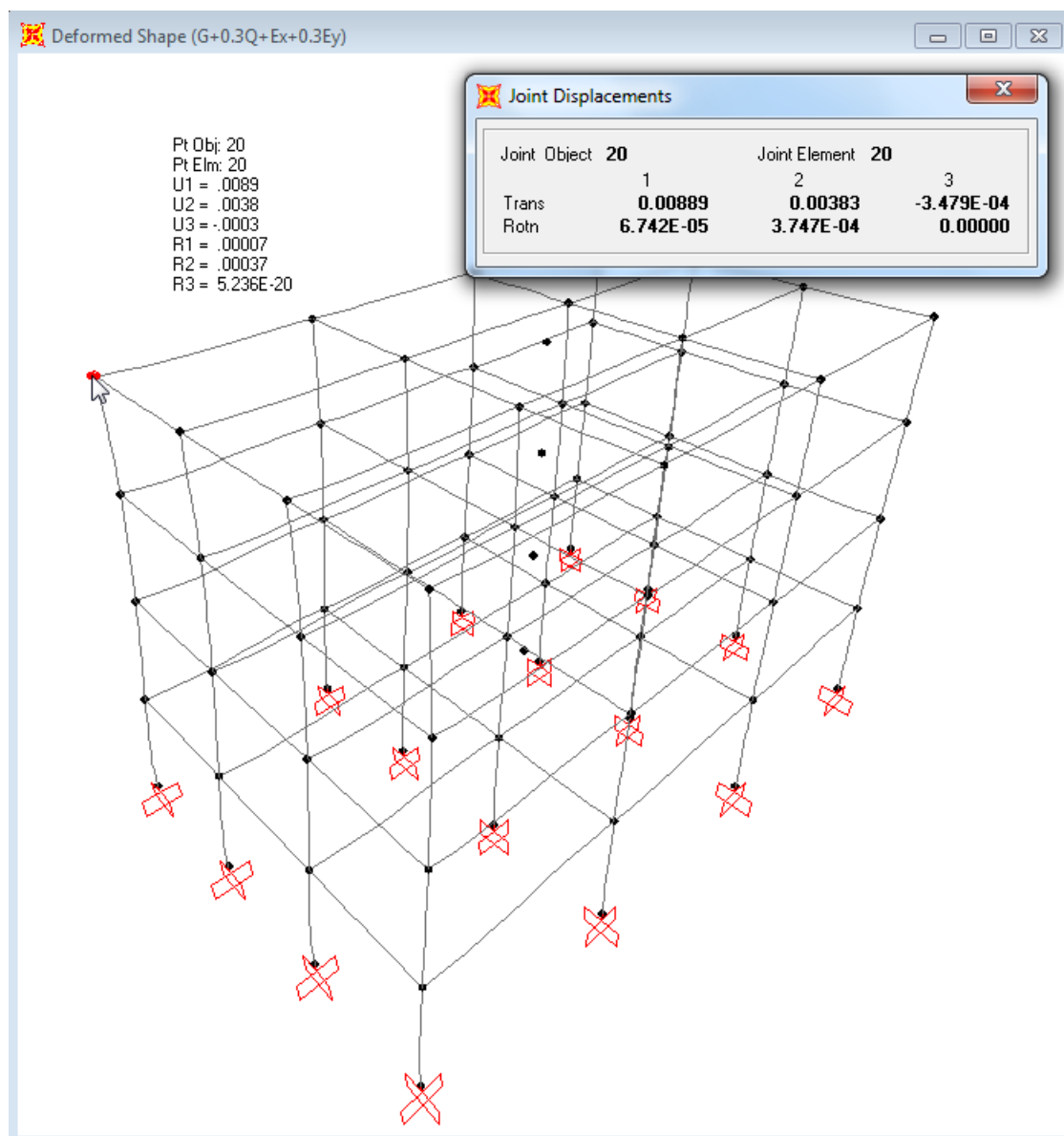
Θα πρέπει να σημειωθεί, λόγω της χρήσης του συντελεστή συμπεριφοράς κατά τον προσδιορισμό της σεισμικής φόρτισης, πως η σωστή απόδοση της οριζόντιας μετακίνησης ενός σημείου του κτιρίου απαιτεί την ξεχωριστή ανάγνωση της μετατόπισης που οφείλεται στην κατακόρυφη φόρτιση και αυτής που οφείλεται σε σεισμική φόρτιση. Αυτό οφείλεται στο ότι η ελαστική ανάλυση δεν έγινε για το σύνολο της σεισμικής δράσης, αλλά για σεισμικά φορτία απομειωμένα κατά τον συντελεστή συμπεριφοράς q . Καθώς όμως η πραγματική απόκριση για το σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να ξεπεράσει αυτό το σημείο καταπόνησης του φορέα, ενεργοποιώντας τη μετελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, ο προσδιορισμός της πραγματικής μετατόπισης απαιτεί τον πολλαπλασιασμό της τιμής που υπολογίστηκε για τα απομειωμένα, κατά q , ελαστικά φορτία. Η πρόσθεση των δυο επιμέρους μετακινήσεων, για τον υπολογισμό της τελικής μετατόπισης ελέγχου, θα γίνει αφού πρώτα η μετακίνηση των σεισμικών δράσεων πολλαπλασιαστεί με την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, βάσει της σχέσης (EC8 §4.3.4(1)P):

$$d_s = q_d \cdot d_e \quad (5.11)$$

Στην παραπάνω σχέση το d_e είναι η τιμή της μετατόπισης που έχει προκύψει κατά την ελαστική ανάλυση, ενώ η τιμή q_d είναι συνήθως ίση με την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q , εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, και καθώς οι οριζόντιες μετατοπίσεις λόγω των κατακόρυφων φορτίων είναι μηδενικές, όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από τη σχετική παραμορφωμένη γραμμή, είναι δυνατός ο απευθείας πολλαπλασιασμός των μετακινήσεων των σεισμικών συνδυασμών με την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς της μελέτης. Ενδεικτικά, η μέγιστη κατά x μετατόπιση σχεδιασμού του κόμβου οροφής για τον σεισμικό συνδυασμό που εικονίζεται στο Σχήμα 5.19 και για συντελεστή συμπεριφοράς $q=3.9$ που χρησιμοποιήθηκε, είναι σύμφωνα με την Εξίσωση 5.11 ίση με:

$$d_s = 3.9 \cdot 0.00889 = 0.03467m \quad (\text{σχεδόν } 3.5\text{cm}) \quad (5.12)$$



Σχήμα 5.19 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής φορέα και μετακινήσεων κόμβου οροφής για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$.

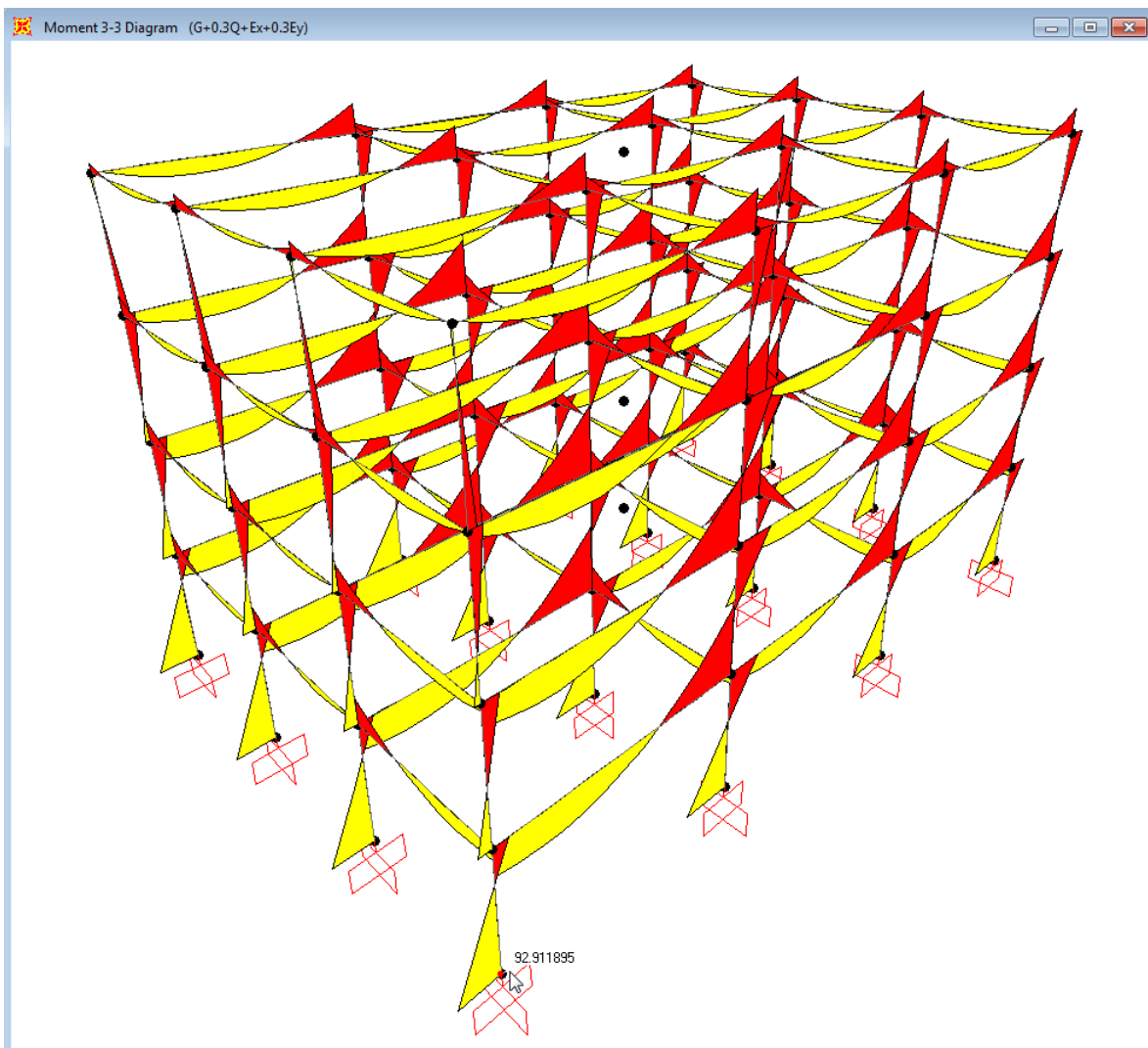
Πολυμεσικό Αντικείμενο 5.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει παραστατικά την εικόνα της παραμόρφωσης του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό δράσης $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$. Σημειώνεται πως η πλήρης κίνηση που εμφανίζεται δεν είναι ακριβής, καθώς στον συγκεκριμένο συνδυασμό δρουν στην πραγματικότητα φορτία προς τη μια μόνο κατεύθυνση, είναι όμως αρκετά χρήσιμη δίνοντας την αίσθηση της διεύθυνσης παραμόρφωσης και βοηθώντας στον οπτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.</p>	

5.8.2. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

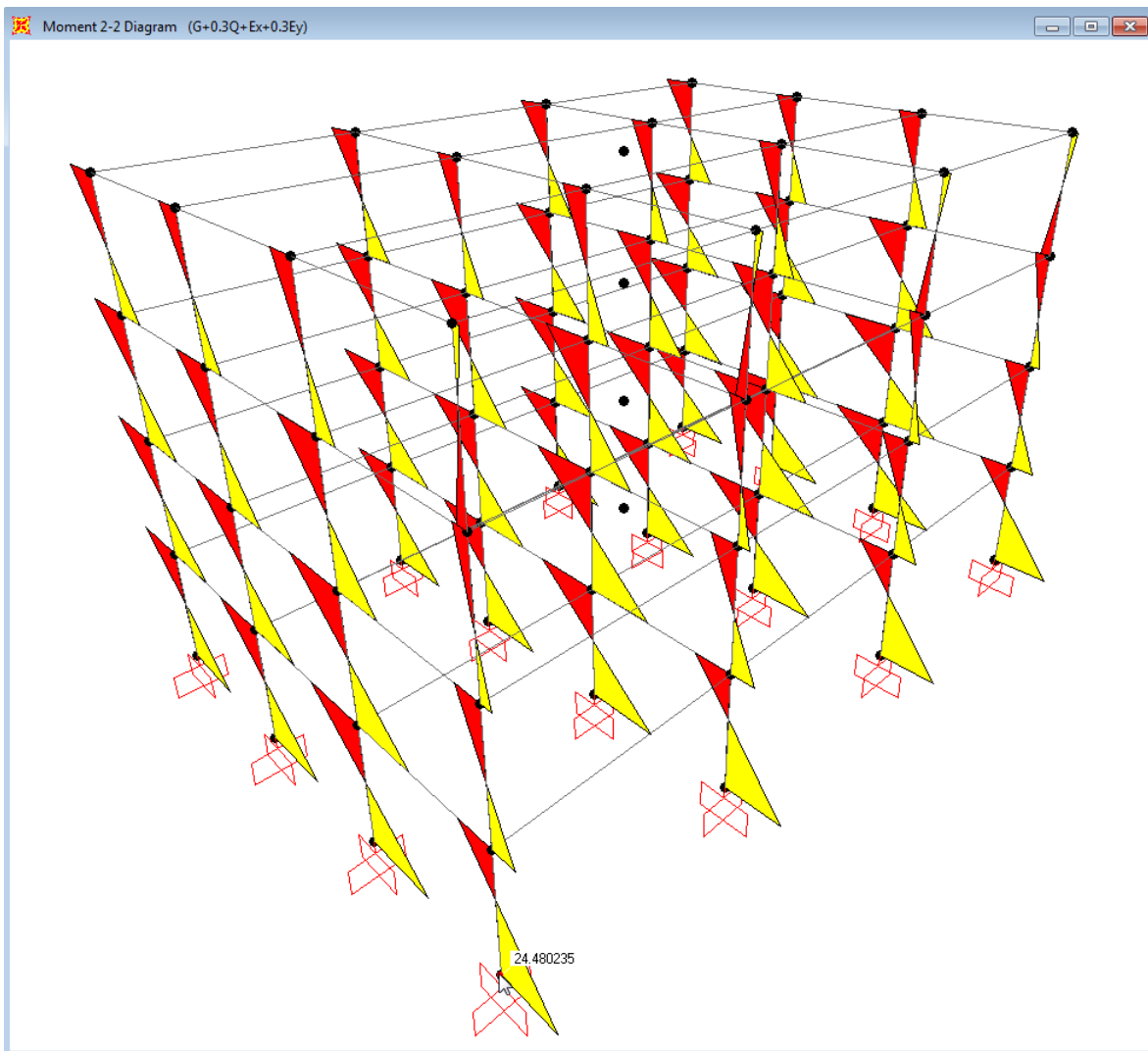
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εμφάνιση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών είναι σκόπιμο να γίνεται σε τρισδιάστατη όψη του φορέα, ειδικά στην περίπτωση μικρής εμπειρίας σε αντίστοιχα προγράμματα στατικής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται η εντολή *Display* → *Show Forces/Stresses* → *Frames/Cables*, όπου επιλέγεται η επιθυμητή φορτιστική κατάσταση ή συνδυασμός φόρτισης και ζητείται το επιθυμητό εντατικό μέγεθος. Η επιλογή *Moment 3-3* για τον σεισμικό συνδυασμό $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$, θα οδηγήσει στην εμφάνιση του διαγράμματος καμπτικών ροπών του Σχήματος 5.20. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η συγκεκριμένη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του διαγράμματος ροπών για όλες τις δοκούς, ενώ στα υποστυλώματα αφορά την καταπόνηση πλαισίου εντός επιπέδου xz .

Με δεξί *click* πάνω στον άξονα ενός γραμμικού στοιχείου μπορούν να εμφανιστούν λεπτομέρειες της εντατικής κατάστασης ανά ζεύγη σχετιζόμενων μεγεθών. Για απευθείας εμφάνιση τιμών πάνω στο συνολικό διάγραμμα ροπών του φορέα, θα πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα η επιλογή *Show Values on Diagram*.

Με αντίστοιχο τρόπο, επιλέγοντας το μέγεθος *Moment 2-2* για τον σεισμικό συνδυασμό $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$, εμφανίζεται το διάγραμμα του Σχήματος 5.21. Εδώ παρατηρείται πως εμφανίζονται διαγράμματα ροπών μόνο στα υποστυλώματα, στη διεύθυνση που αφορά καταπόνηση πλαισίου εντός επιπέδου yz .



Σχήμα 5.20 Εμφάνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M_{33} για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$ (με επιλογή *Show Values on Diagram* στο προηγούμενο βήμα είναι δυνατή η εμφάνιση των τιμών στο διάγραμμα).



Σχήμα 5.21 Εμφάνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M_{22} για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$ (με επιλογή *Show Values on Diagram* στο προηγούμενο βήμα είναι δυνατή η εμφάνιση των τιμών στο διάγραμμα).

Ανάγνωση εντατικών μεγεθών γραμμικών στοιχείων βάσει των τοπικών αξόνων

Η ανάγνωση των εντατικών μεγεθών βασίζεται στον προσανατολισμό του τοπικού συστήματος αξόνων κάθε γραμμικού στοιχείου. Αναλυτικά στοιχεία για τους τοπικούς άξονες γραμμικών στοιχείων του προγράμματος δίνονται στο Παράρτημα Α. Συνοπτικά, η ανάγνωση της ροπής και της τέμνουσας δύναμης σε γραμμικά στοιχεία ενός φορέα μπορεί να γίνει ως εξής:

- Δοκοί: η ροπή κάμψης των δοκών εμφανίζεται από την επιλογή *Moment 3-3* και η τέμνουσα δύναμη από την επιλογή *Shear 2-2*.
- Υποστυλώματα – για τη συμμετοχή τους σε πλαίσια κατά X : η ροπή κάμψης των συγκεκριμένων υποστυλωμάτων (κάμψη γύρω από άξονα Y), εμφανίζεται από την επιλογή *Moment 3-3*, ενώ η τέμνουσα δύναμη από την επιλογή *Shear 2-2*.
- Υποστυλώματα – για τη συμμετοχή τους σε πλαίσια κατά Y : η ροπή κάμψης των συγκεκριμένων υποστυλωμάτων (κάμψη γύρω από άξονα X), εμφανίζεται από την επιλογή *Moment 2-2*, ενώ η τέμνουσα δύναμη από την επιλογή *Shear 3-3*.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 5^{ου} Κεφαλαίου

- CEN (2002). *EN 1990: Eurocode: Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1998–1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Βαδαλούκας, Γ., & Παπαρησιτίδης, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτηριακών κατασκευών σκυροδέματος με τον EC8: Παραδείγματα εφαρμογής - σύγκριση με τον ΕΑΚ*. Σεμινάρια Ευρωκώδικα 8. ETAM (Ελληνικό Τμήμα Αντισεισμικής Μηχανικής).
- Σέξτος, Α. (2011). *Η μετάβαση από τον ΕΑΚ 2000 στον Ευρωκώδικα 8*. Ημερίδα: Σχεδιασμός κτιρίων σκυροδέματος με βάση τους Ευρωκώδικες 2 και 8. ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), ΤΕΕ (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος). Αγρίνιο.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 6 παρουσιάζεται η προσομοίωση επίπεδου τοιχώματος με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: χρήση υφιστάμενου προσομοιώματος για δημιουργία νέου φορέα, αναπαραγωγή γεωμετρίας και χαρακτηριστικών τμήματος φορέα, γενικό σύστημα συντεταγμένων, προσομοίωση επίπεδου τοιχώματος με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, προβλήματα κατά την ανάγνωση αποτελεσμάτων σε τοπικούς άξονες στοιχείων, εναλλακτική προσομοίωση στερεού βραχίονα τοιχώματος.

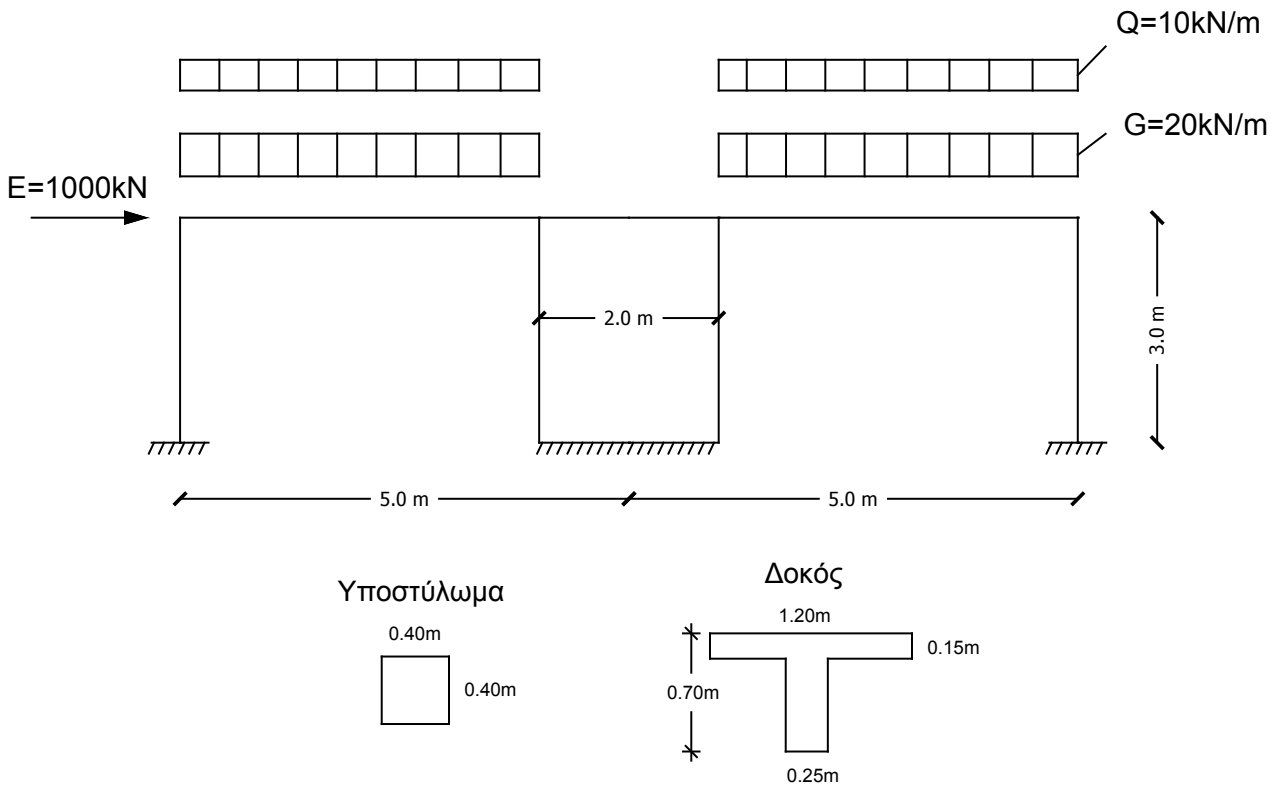
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις συμπεριφοράς τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και ικανότητα ανάγνωσης και κατανόησης σχετικών επιστημονικών κειμένων, όπως και πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

6.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του επίπεδου πλαισίου που περιγράφεται στο Σχήμα 6.1, με χρήση ισοδύναμης πλαισιακής προσομοίωσης (γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία) για το τοίχωμα διαστάσεων 25/200. Η επίλυση να γίνει για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Η οριζόντια δύναμη E θεωρείται σεισμικό φορτίο, το κατανεμημένο φορτίο G μόνιμη δράση και το Q μεταβλητή δράση.
- Να ληφθεί υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 6.1 Επίπεδος φορέας οπλισμένου σκυροδέματος με τοίχωμα.

6.2. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα

Παρατηρείται πως η γεωμετρία του πλαισίου, οι διατομές, η κατανομημένη φόρτιση και το υλικό είναι ίδια με αυτά του παραδείγματος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, με τη διαφορά πως ο νέος φορέας έχει ένα επιπλέον άνοιγμα και η οριζόντια δύναμη E έχει διαφορετική τιμή. Κατά συνέπεια, κρίνεται σκόπιμο να γίνει εκμετάλλευση του παραδείγματος του Κεφαλαίου 3 για την εισαγωγή του νέου φορέα.

Με το [File](#) → [Open](#) γίνεται άνοιγμα του αρχείου του Κεφαλαίου 3 ([Chapter 03.sdb](#)), ενώ στη συνέχεια το αρχείο αποθηκεύεται ως ([Save As..](#)) με την ονομασία [Chapter 06.sdb](#).

Για την τροποποίηση της γεωμετρίας του φορέα θα πρέπει η δοκός και το δεξιά υποστύλωμα να αντιγραφούν μια φορά, μετατοπισμένα προς τα δεξιά κατά 5m σε σχέση με το αρχικό πλαίσιο. Ο τρόπος αναπαραγωγής που θα χρησιμοποιηθεί κρίνεται σκόπιμο να διατηρήσει όλα τα δεδομένα (υλικό, διατομή, φορτία) στο νέο τμήμα φορέα που θα δημιουργηθεί. Για τον λόγο αυτόν κρίνεται περισσότερο κατάλληλη η εντολή [Replicate](#).

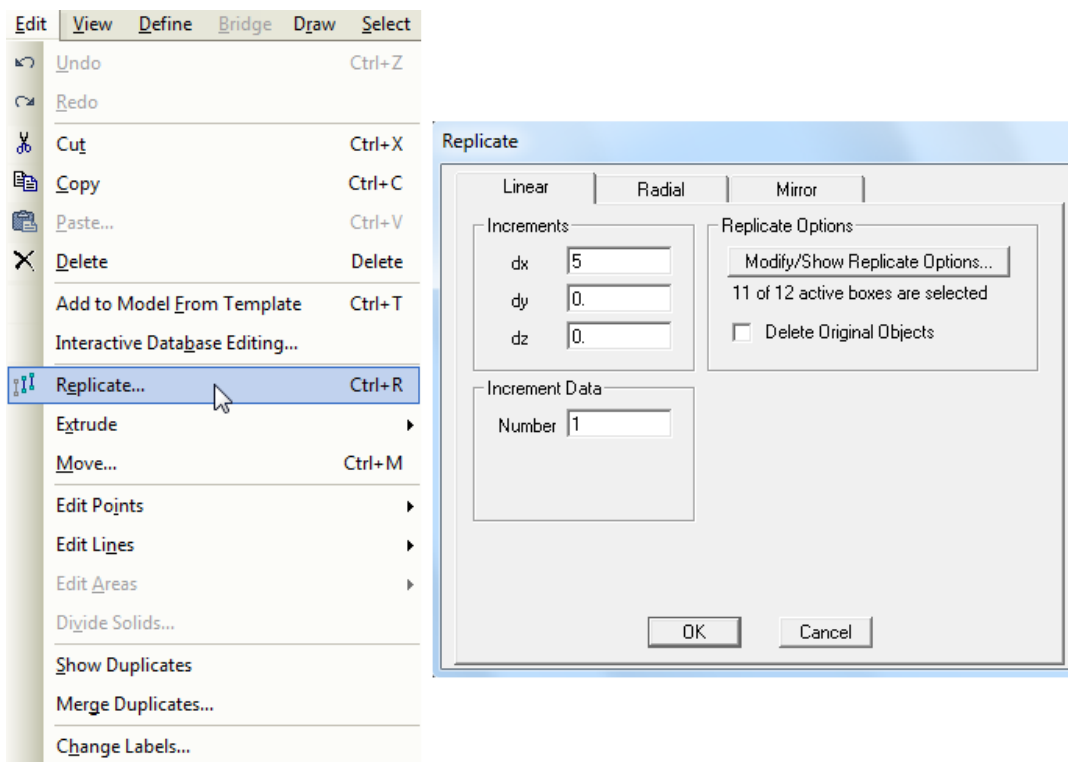
Επιλέγεται η δοκός, ο δεξιά στύλος και οι δυο κόμβοι του στύλου (Σχήμα 6.2) και στη συνέχεια ενεργοποιείται η εντολή [Edit](#) → [Replicate](#) (Σχήμα 6.3). Στο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζεται πόσες φορές θα γίνει η αντιγραφή ([Number=1](#) στο παρόν), όπως και η επιθυμητή απόσταση που αφορά (5m κατά X). Δίνεται η δυνατότητα στον μελετητή, μέσω της εντολής [Modify/Show Replicate Options](#) (Σχήμα 6.4), να επιλέξει τις συγκεκριμένες ιδιότητες που επιθυμεί να αντιγραφούν κατά τη διαδικασία στα νέα στοιχεία που θα προκύψουν. Παρατηρείται πως δεν είναι επιλεγμένο το πεδίο [Constraints](#) (καρτέλα [Assignments](#)), με αποτέλεσμα για τους κόμβους που θα αναπαραχθούν να μην υπάρχει τυχόν αντίστοιχη ιδιότητα των αρχικών κόμβων, όπως π.χ. η ιδιότητα διαφράγματος στον κόμβο οροφής. Αν συνεπώς δεν γίνει επιλογή του [Constraint](#) στο τρέχον παράθυρο, τότε το διάφραγμα θα πρέπει να ανατεθεί σε επόμενο βήμα στον νέο κόμβο ορόφου που θα δημιουργηθεί. Στην καρτέλα [Loads and Design](#) εμφανίζονται επιλογές

αναπαραγωγής για στοιχεία φόρτισης και διαστασιολόγησης του φορέα, όπου φαίνεται με τις τρέχουσες επιλογές πως το καταναμημένο φορτίο δοκού θα αναπαραχθεί αυτόματα (*Distributed* στο Σχήμα 6.5). Με το τέλος της διαδικασίας και διπλό **OK** εμφανίζεται ο φορέας στη νέα του μορφή (Σχήμα 6.6). Για τη σωστή εμφάνιση του φορέα, είναι πιθανόν να απαιτηθεί ανανέωση της εικόνας του κάθε παραθύρου με την εντολή **View → Refresh Window**, ή απλώς χρησιμοποιώντας τα εργαλεία **3-d** και **xz** για την τρισδιάστατη και την επίπεδη όψη αντίστοιχα.

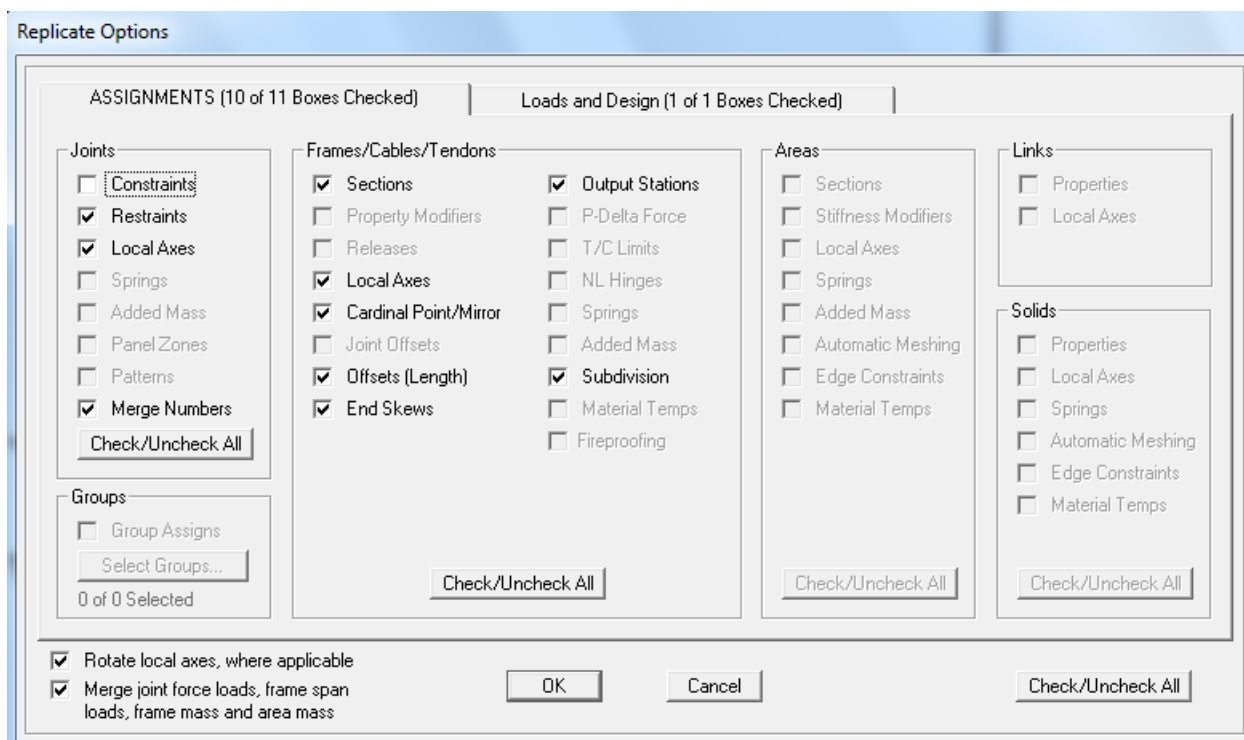
Όπως προέκυψε κατά την επισκόπηση των παραμέτρων της εντολής **Replicate**, υπάρχει δυνατότητα αναπαραγωγής των διαφόρων στοιχείων με τα φορτία τους. Θα πρέπει συνεπώς να δοθεί προσοχή, ώστε στην αρχική επιλογή των στοιχείων προς αναπαραγωγή να μην επιλεγεί ο αριστερά κόμβος της δοκού, καθώς εάν μεταφερθούν όλες του οι ιδιότητες σε νέα θέση υπάρχει κίνδυνος να μεταφερθεί και το προϋπάρχον φορτίο των 100kN κατά 5m δεξιά, κάτι το οποίο δεν συμβαδίζει με τα δεδομένα του νέου παραδείγματος.



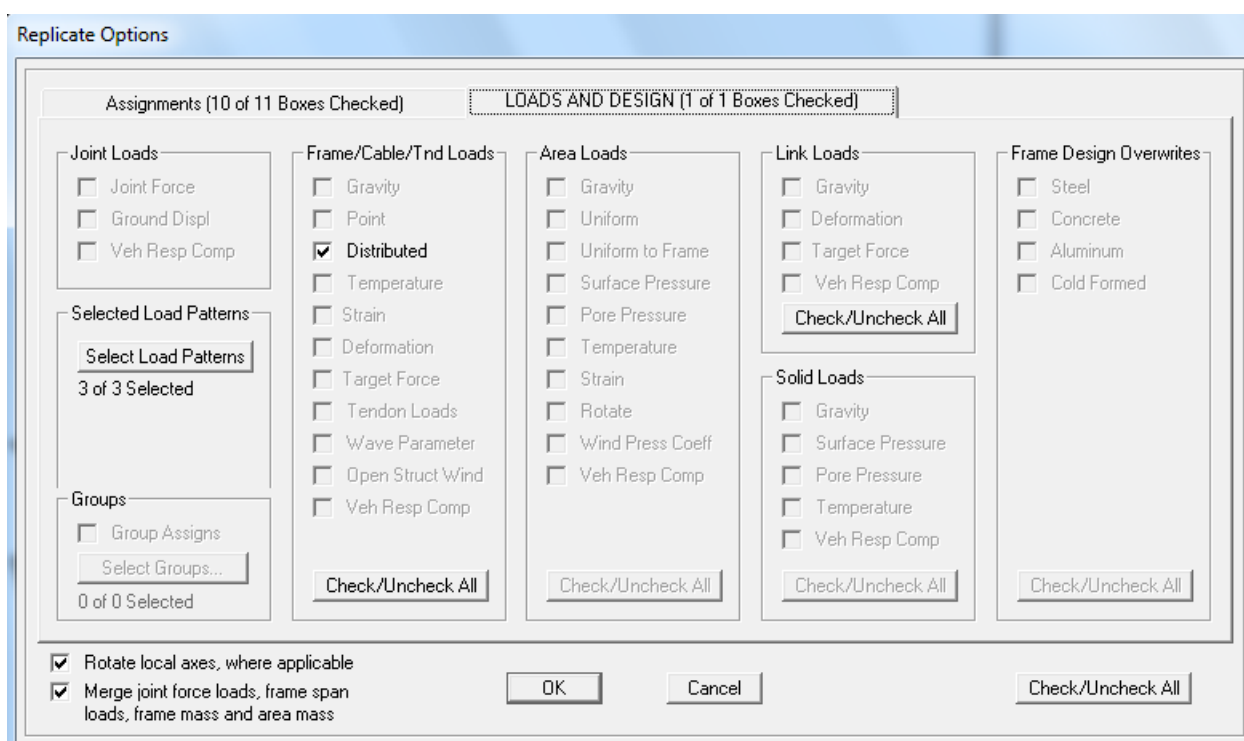
Σχήμα 6.2 Επιλογή στοιχείων για αντιγραφή.



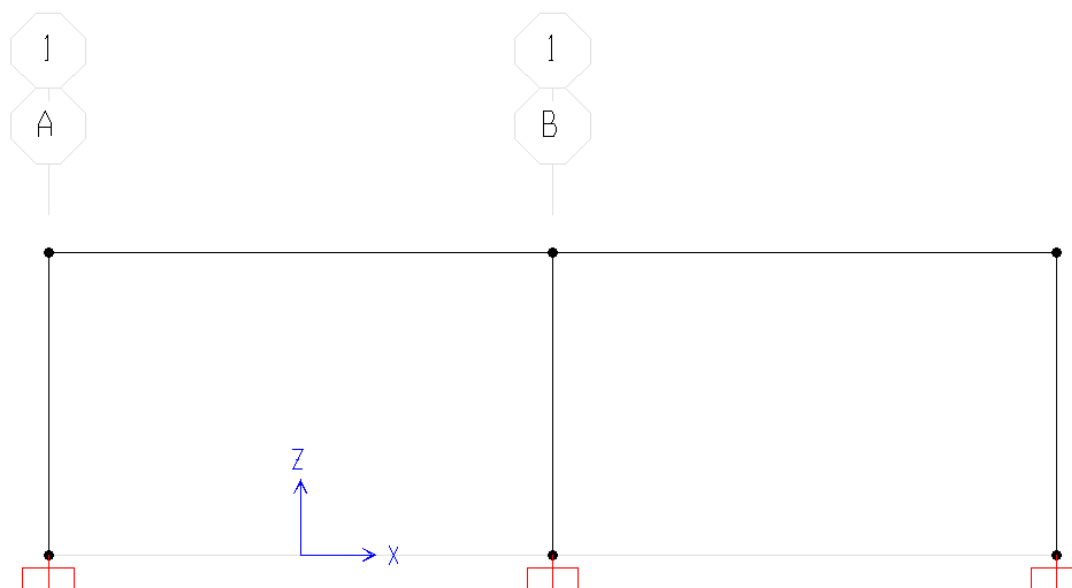
Σχήμα 6.3 Αντιγραφή (αναπαραγωγή) τμήματος του φορέα κατά X με την εντολή **Replicate**.



Σχήμα 6.4 Επισκόπηση των επιλογών της εντολής Replicate (καρτέλα Assignments).



Σχήμα 6.5 Επισκόπηση των επιλογών της εντολής Replicate (καρτέλα Loads and Design).



Σχήμα 6.6 Εμφάνιση της νέας γεωμετρίας φορέα.

Διαδικασία αναπαραγωγής γεωμετρίας και χαρακτηριστικών τμήματος φορέα

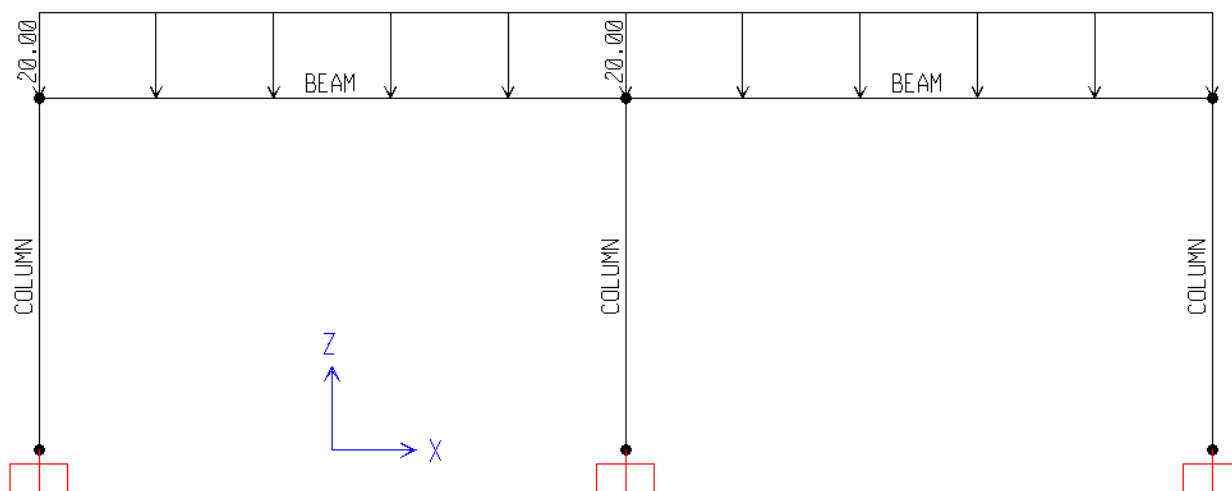
Σε όλα σχεδόν τα προγράμματα προσομοίωσης και ανάλυσης κατασκευών, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να αναπαράγει μέρος ή το σύνολο του φορέα που έχει δημιουργήσει, μαζί με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων δομικών στοιχείων και τη φόρτιση τους. Στα εμπορικά πακέτα λογισμικού η συγκεκριμένη δυνατότητα βρίσκει άμεση χρήση στην παραγωγή ορόφων, μετά τη δημιουργία της κάτοψης του τυπικού ορόφου, διευκολύνοντας σημαντικά τον χρήστη κατά την εισαγωγή των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Θα πρέπει να δίνεται η δέουσα προσοχή στην τυχόν ανεπιθύμητη αναπαραγωγή συγκεκριμένων ιδιοτήτων, με κατάλληλη τροποποίηση είτε των παραμέτρων της εντολής αναπαραγωγής (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) είτε με επέμβαση στις ιδιότητες των στοιχείων που δημιουργούνται από τη διαδικασία.

6.3. Έλεγχος ιδιοτήτων νέων στοιχείων και τροποποίηση καννάβου

Κατά την αντιγραφή στοιχείων του φορέα, ζητήθηκε η αναπαραγωγή των ιδιοτήτων και φορτίων διαφόρων στοιχείων. Η αναπαραγωγή των ιδιοτήτων της στήριξης είναι εμφανές ότι πραγματοποιήθηκε, καθώς και ο νέος κόμβος στη βάση του δεξιού υποστυλώματος έχει όμοια στήριξη (όμοιους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας) με αυτόν που είχε επιλεγεί προς αντιγραφή. Αντίθετα, ο δεξιός κόμβος οροφής που δημιουργήθηκε δεν περιλαμβάνεται στο διάφραγμα με τους υπόλοιπους κόμβους ορόφου, όπως μπορεί να φανεί με δεξιά *click* στον κόμβο από την καρτέλα *Assignments* (το πεδίο *Constraints* είναι κενό). Η συγκεκριμένη ιδιότητα θα δοθεί σε επόμενο στάδιο της προσομοίωσης (δίχως να απαγορεύεται η ανάθεσή της και στο συγκεκριμένο σημείο).

Ο έλεγχος των ιδιοτήτων και των φορτίων του φορέα μπορεί να επιταχυνθεί αν ζητηθεί στο δεξί παράθυρο η εμφάνιση συγκεκριμένων παραμέτρων. Από την εντολή *View → Set Display Options* μπορεί να επιλεγεί η εμφάνιση του τύπου της κάθε διατομής (ενεργοποίηση *Sections* στο πεδίο *Frames/Cables/Tendons*). Αντίστοιχα, από το *Display → Show Load Assigns → Frame/Cable/Tendon* επιλέγονται ενδεικτικά τα μόνιμα καταναμημένα φορτία *G*. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 6.7, επιβεβαιώνοντας ότι τόσο η φόρτιση της δοκού όσο και η διατομή του υποστυλώματος έχουν αναπαραχθεί σωστά στα νέα στοιχεία που δημιουργήθηκαν. Η επιστροφή στην προηγούμενη όψη του φορέα, δίχως να εμφανίζονται τα φορτία και το

είδος των διατομών, μπορεί να επιτευχθεί με αποεπιλογή των *Sections* από την εντολή *View → Set Display Options* και εμφάνιση της απαραμόρφωτης γραμμής φορέα από την εντολή *Display → Show Undeformed Shape*.



Σχήμα 6.7 Έλεγχος αναπαραγωγή ιδιοτήτων και φορτίων στα νέα στοιχεία του φορέα.

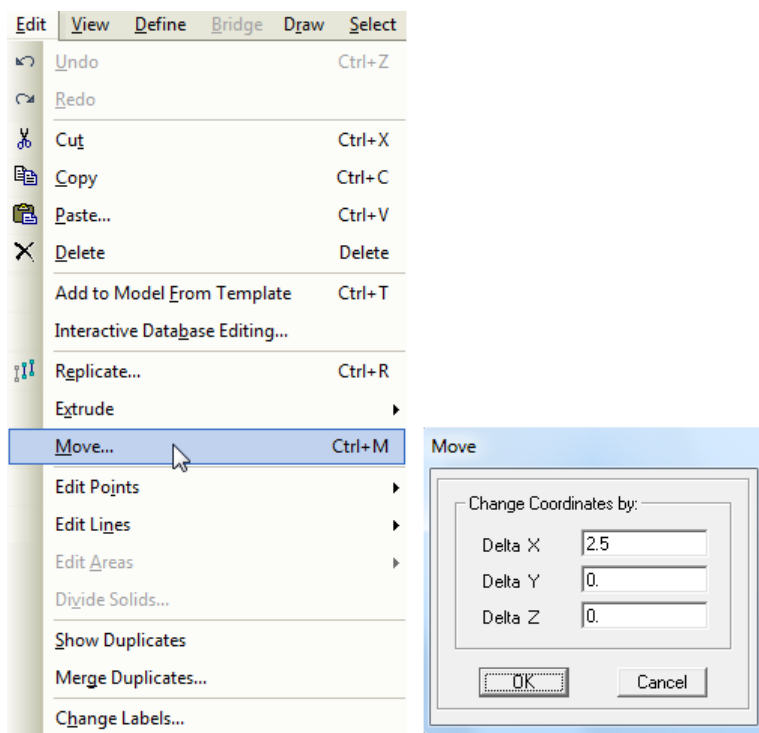
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6, στη νέα γεωμετρία του φορέα η αρχή των αξόνων έχει μείνει στην προηγούμενη θέση της, στο μέσον του αρχικού πλαισίου, ενώ δεν έχει δημιουργηθεί βοηθητική γραμμή καννάβου πίσω από το νέο υποστυλωμα.

Γενικό σύστημα συντεταγμένων

Η θέση του κάθε κόμβου, άρα και γραμμικού στοιχείου, στον φορέα, ορίζεται πάντα από τις συντεταγμένες του, βάσει ενός γενικού συστήματος συντεταγμένων που στα περισσότερα προγράμματα είναι άμεσα ορατό στον χρήστη. Σε αρκετές περιπτώσεις ενδέχεται να τεθεί ζήτημα μετακίνησης της αρχής του καθορισμένου συστήματος συντεταγμένων, για διευκόλυνση της εισαγωγής των δεδομένων αλλά και της διαχείρισης του φορέα. Από την εμπειρία των συγγραφέων, το καταλληλότερο σημείο ως αρχή ενός συστήματος συντεταγμένων θεωρείται αυτό που βρίσκεται σε κατακόρυφο επίπεδο στη στάθμη 0.0m, ενώ σε κάτοψη η θέση του είναι τέτοια ώστε όλοι οι κόμβοι της κάτοψης του προσομοιώματος να έχουν θετικές συντεταγμένες. Στην περίπτωση του *SAP 2000*, το σημείο αυτό είναι στο κάτω αριστερά σημείο του φορέα σε κάτοψη, στη στάθμη $Z=0.0m$.

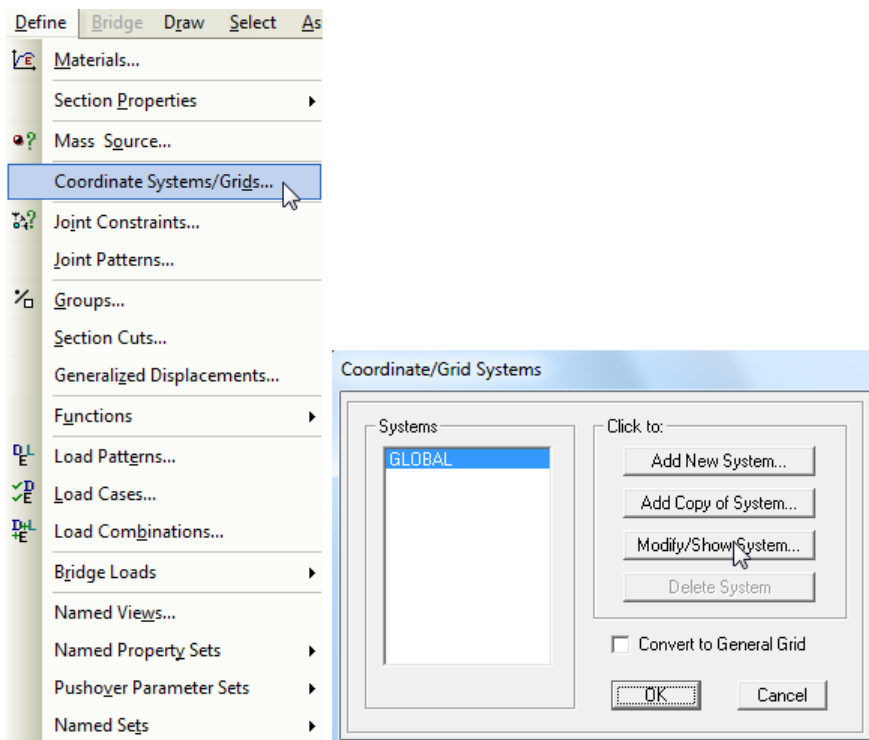
Καθώς τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατή η μετακίνηση της αρχής των αξόνων, θα πρέπει να γίνει μετακίνηση ολόκληρου του φορέα ως προς αυτήν. Θα πρέπει βεβαίως στη συνέχεια να γίνει κατάλληλη προσαρμογή των βοηθητικών γραμμών καννάβου, για να ανταποκρίνονται στις νέες θέσεις των δομικών στοιχείων. Σημειώνεται πως η εμφάνιση/απόκρυψη της αρχής των αξόνων και των γραμμών καννάβου γίνεται από την εντολή *View → Show Axis* και *Show Grid* αντίστοιχα.

Προκειμένου η αρχή των αξόνων να τοποθετηθεί στη βάση του αριστερά υποστυλώματος, θα πρέπει να μετακινηθεί ολόκληρος ο φορέας προς τα δεξιά (+X). Επιλέγεται ολόκληρος ο φορέας (*Ctrl+A* ή εντολή *Select → Select All*), και με την εντολή *Edit → Move* ζητείται μετακίνηση +2.5m κατά X (Σχήμα 6.8). Παρατηρείται πως πλέον η βάση του αριστερά υποστυλώματος συμπίπτει με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων, οι θέσεις όμως των γραμμών του καννάβου χρειάζονται διόρθωση.

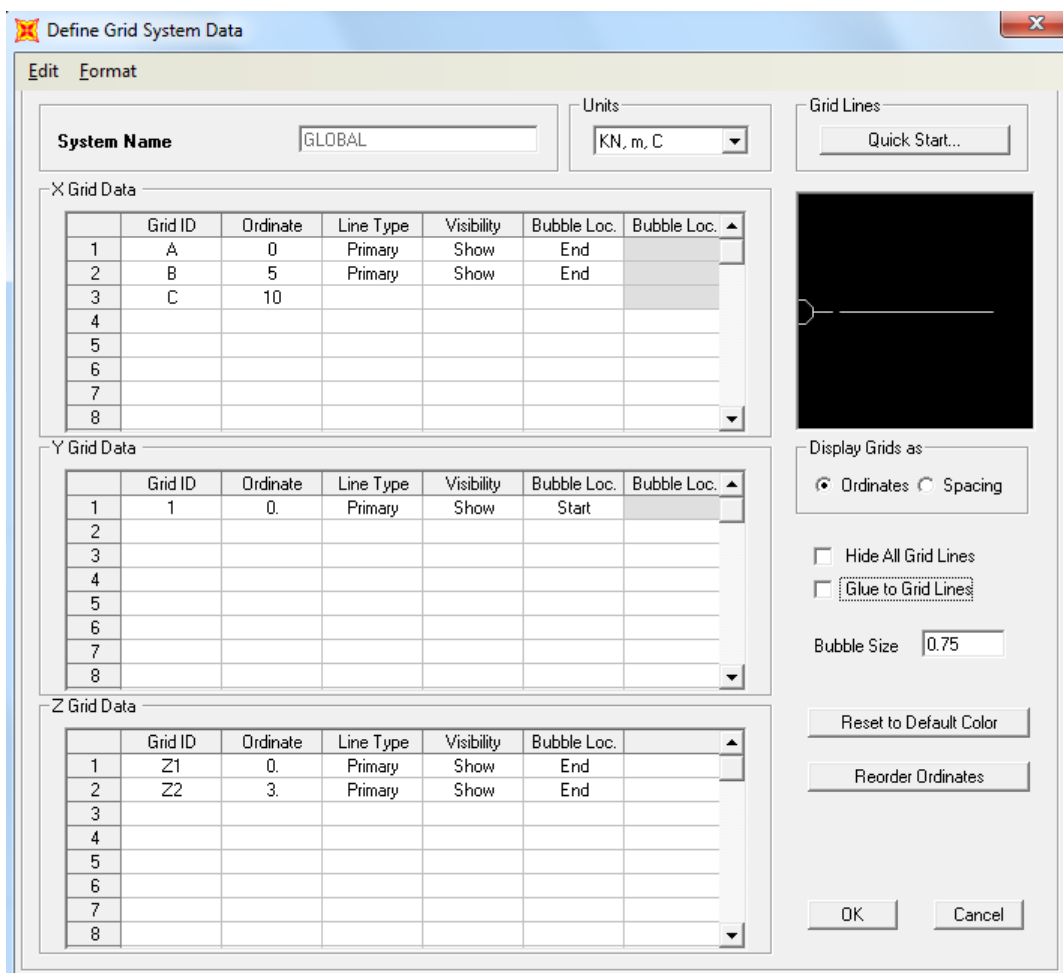


Σχήμα 6.8 Μετακίνηση του φορέα κατά X.

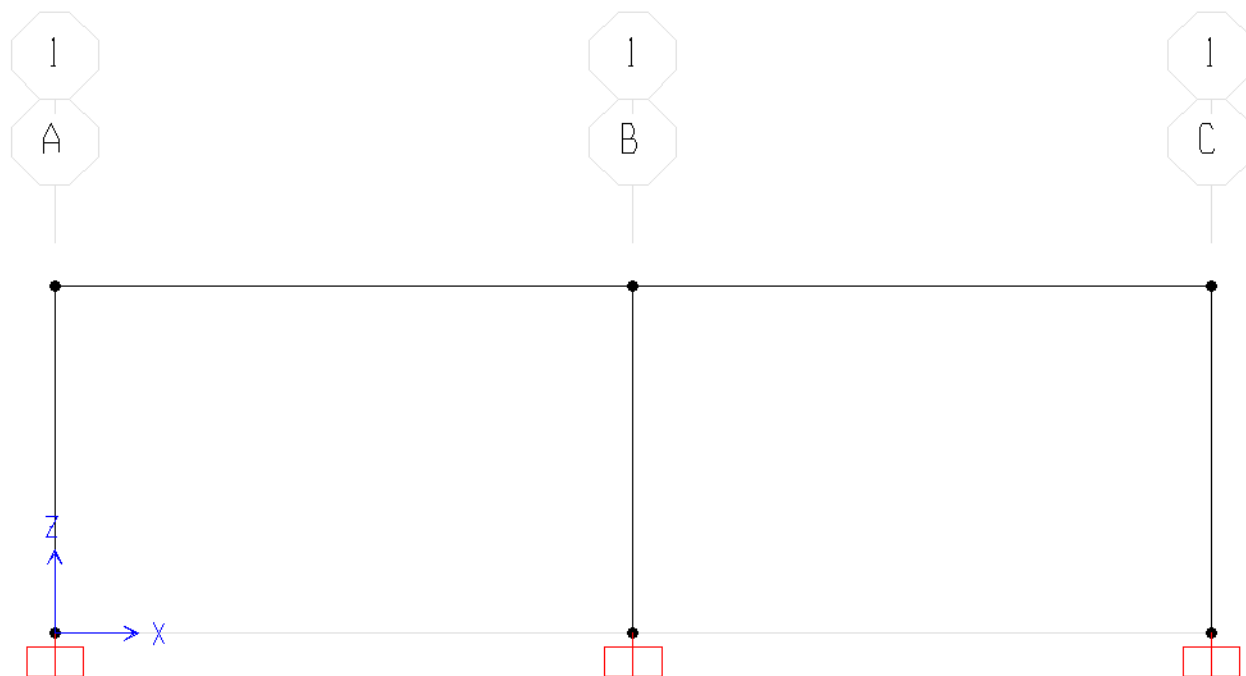
Καθώς είναι γνωστή η γεωμετρία του φορέα, οι θέσεις των γραμμών του καννάβου μπορούν να επικαιροποιηθούν από την εντολή *Define* → *Coordinate Systems/Grids* (Σχήμα 6.9), όπου ζητείται τροποποίηση του υφιστάμενου καννάβου (*Modify/Show System* για το σύστημα *Global*). Στο παράθυρο που εμφανίζεται μπορούν να τεθούν οι νέες τιμές των γραμμών καννάβου (πεδίο *Ordinate* στην περιοχή *X Grid Data*), ενώ είναι προαιρετικός ο καθορισμός ονομασίας για την κάθε γραμμή (πεδίο *Grid ID*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Από το *Bubble Loc.* μπορεί να ελεγχθεί το χρώμα εμφάνισης των γραμμών καννάβου, ενώ στο πεδίο *Bubble Size* καθορίζεται το μέγεθος των κύκλων και των γραμμάτων αρίθμησης της κάθε γραμμής. Με διαδοχικά *OK* γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας όπου έχει επιτευχθεί η τελική εικόνα του καννάβου που φαίνεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.9 Εντολή τροποποίησης της θέσης βοηθητικών γραμμών καννάβου.



Σχήμα 6.10 Τροποποίηση θέσης βοηθητικών γραμμών καννάβου κατά X και προσθήκη νέας βοηθητικής γραμμής.



Σχήμα 6.11 Τελική εικόνα φορέα με διορθωμένη θέση αξόνων και γραμμών καννάβου.

6.4. Προσομοίωση τοιχώματος με γραμμικά στοιχεία και ορισμός διατομών

Σύμφωνα με την περιγραφή του φορέα, στη θέση του μεσαίου κατακόρυφου στοιχείου υπάρχει τοίχωμα διαστάσεων 25x200cm. Η συνήθης προσομοίωση τοιχωμάτων με χρήση γραμμικών στοιχείων (ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 6.12), αφορά τη χρήση ενός κατακόρυφου γραμμικού στοιχείου στο μέσον του τοιχώματος (ισοδύναμος στύλος), το οποίο συνδέεται στις παρειές του τοιχώματος με τα υπόλοιπα στοιχεία του φορέα (δοκούς, υποστυλώματα) με τη βοήθεια οριζόντιων στοιχείων ειδικών ιδιοτήτων (στερεοί βραχίονες) στα επίπεδα των ορόφων (Αβραμίδης, 2001· Αβραμίδης, Αθανατοπούλου, Αναστασιάδης, & Μορφίδης, 2005· Αβραμίδης, Αθανατοπούλου, Μορφίδης, & Σέξτος, 2011· Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013). Οι στερεοί βραχίονες έχουν πλασματικά αυξημένες τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ώστε να εμφανίζονται πρακτικά ως ατενείς, άκαμπτοι και άτμητοι σε σχέση με τα γειτονικά τους στοιχεία.

Προσομοίωση επίπεδου τοιχώματος με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων

Η χρήση της ισοδύναμης πλαισιακής προσομοίωσης των τοιχωμάτων συναντάται στα περισσότερα στατικά πακέτα λογισμικού, λόγω της απλότητας στη σύλληψη και τις χαμηλές απαιτήσεις σε δυνατότητες προσομοίωσης, αλλά και λόγω αποτελεσματικότητας στις συνήθεις περιπτώσεις τοιχωμάτων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρείται επαρκώς ακριβής όταν χρησιμοποιείται σε τοιχώματα με προέχουσα καμπτική συμπεριφορά (τοιχώματα σημαντικού ύψους, ενδεικτικά με λόγο ύψους προς πλάτος >2), ενώ είναι λιγότερο αποτελεσματική σε τοιχώματα με διατμητική συμπεριφορά (χαμηλά τοιχώματα ή τοιχώματα σημαντικού μήκους). Η ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση περιλαμβάνει:

- ένα κατακόρυφο γραμμικό στοιχείο (ισοδύναμος στύλος) στο κέντρο της διατομής του τοιχώματος,
- οριζόντια βοηθητικά στοιχεία (στερεοί βραχίονες) στα επίπεδα των ορόφων, τα οποία εκτείνονται από το κέντρο της διατομής του τοιχώματος (κόμβος ισοδύναμου στύλου σε κάθε όροφο) έως τις παρειές του.

Το κατακόρυφο γραμμικό στοιχείο στο κέντρο του τοιχώματος συχνά καλείται ως ισοδύναμος στύλος, και έχει χαρακτηριστικά διατομής (δυστένεια, δυσκαμψία, δυστρεψία) όμοια με τη διατομή του τοιχώματος

που αναπαριστά. Στην περίπτωση απλών τοιχωμάτων σταθερού πάχους, για την προσομοίωση του συγκεκριμένου γραμμικού στοιχείου συνηθίζεται η χρήση ορθογωνικής διατομής με τις διαστάσεις του πραγματικού τοιχώματος.

Τα οριζόντια βοηθητικά στοιχεία, που καλύπτουν την απόσταση μεταξύ του ισοδύναμου στύλου στο κέντρο του τοιχώματος και των παρειών του, συχνά καλούνται ως στερεοί βραχίονες, καθώς οι περισσότερες ιδιότητες τους είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των κλασικών δομικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση απλών, επίπεδων τοιχωμάτων, τα στοιχεία αυτά μπορούν να έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή (ενδεικτικά 1000 φορές) δυστένειας, δυσκαμψίας και δυστημσίας των αντίστοιχων χαρακτηριστικών των λοιπών στοιχείων. Με τον τρόπο αυτόν προσομοιώνεται πρακτικά η συμπεριφορά του κορμού του τοιχώματος από τη μια παρεία στην απέναντι, διευκολύνοντας τη σύνδεση με τα υπόλοιπα γραμμικά στοιχεία.

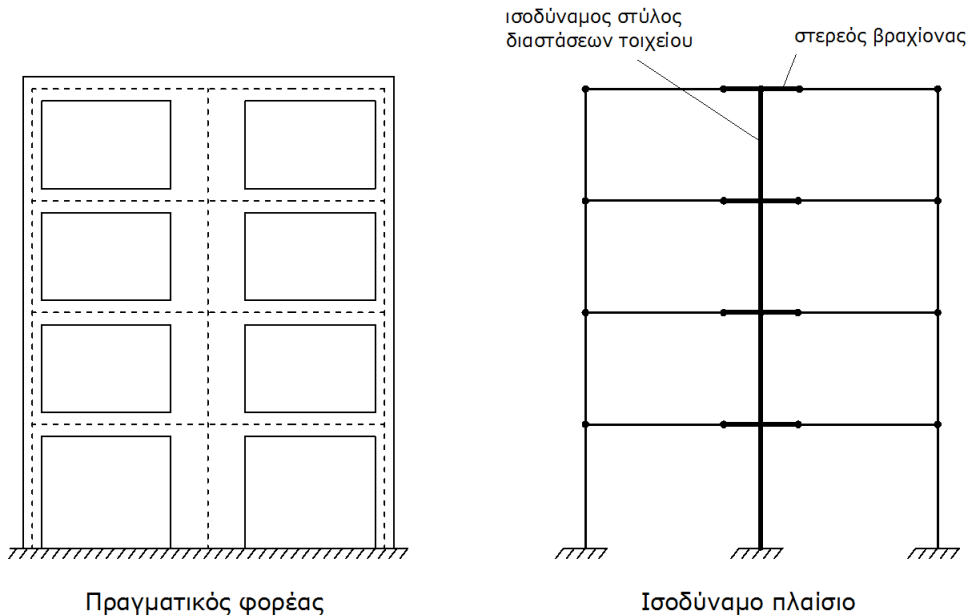
Αναφορικά με τη δυστρεψία του στερεού βραχίονα, απαιτείται διαφορετική θεώρηση στην περίπτωση τοιχωμάτων σύνθετης διατομής π.χ. τύπου πυρήνα (Αβραμίδης, 2001· Ξενίδης, Αβραμίδης, & Τριαματάκη, 1998), όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 9. Για να αποφευχθεί η δημιουργία σύγχυσης, καθώς, κατά την άποψη των συγγραφέων, αντίστοιχη απαίτηση δημιουργείται και κατά την εγκάρσια σύνδεση τοιχωμάτων με δοκούς στα άκρα τους, κρίνεται σκόπιμο η τιμή της δυστρεψίας του στερεού βραχίονα να τίθεται σε όλες τις περιπτώσεις τοιχωμάτων με πεπερασμένη τιμή που προκύπτει από τον παρακάτω υπολογισμό:

$$J = \alpha t^3 h \text{ όπου } \alpha = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{192 \cdot t}{\pi^5 \cdot h} \right) \cdot \tanh \left(\frac{\pi \cdot h}{2 \cdot t} \right) \right] \quad (6.1)$$

Στην προηγούμενη εξίσωση h είναι το ύψος από το μέσον του προηγούμενου ορόφου έως το μέσον του επόμενου, ενώ t είναι το πάχος του τοιχώματος. Επισημαίνεται πως ο όρος \tanh αφορά την υπερβολική εφαπτομένη του επόμενου κλάσματος (και όχι την εφαπτομένη του ύψους h όπως συχνά παρερμηνεύεται).

Διαδραστικό Αντικείμενο 6.1	Εφαρμογή
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της δυστρεψίας του στερεού βραχίονα που αποτελεί μέρος της προσομοίωσης τοιχώματος με χρήση γραμμικών στοιχείων.</p>	

Ένα από τα προβλήματα που διαπιστώνεται κατά την παραπάνω επιλογή προσομοίωσης, αφορά τη σύνδεση των δοκών που χαρακτηρίζονται από πεπερασμένες τιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων με τους βραχίονες στους οποίους τίθενται ιδιαίτερα υψηλές τιμές των αντίστοιχων χαρακτηριστικών. Τέτοιες συνδέσεις κρύβουν τον κίνδυνο αριθμητικών ασταθειών κατά την ανάλυση, ενώ συχνά οδηγούν σε διαφοροποίηση της τιμής των εντατικών μεγεθών στο άκρο της δοκού. Εναλλακτικά των απολύτως μεγάλων τιμών γεωμετρικών παραμέτρων, σε αρκετά εμπορικά πακέτα στατικής ανάλυσης επιλέγεται για τους βραχίονες η χρήση διατομής με γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκού ύψους ίσου με το h της προηγούμενης εξίσωσης (από μέσον σε μέσον διαδοχικών ορόφων). Με τον τρόπο αυτόν, ο στερεός βραχίονας προσομοιώνεται πάλι με υψηλές τιμές δυσκαμψίας, δυστημσίας, δυστένειας και δυστρεψίας, που όμως εμφανίζουν συσχέτιση με την πραγματική γεωμετρία του τμήματος τοιχώματος που προσομοιώνουν.



Σχήμα 6.12 Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση συνδυασμού γραμμικών στοιχείων (περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στους Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013).

Επισημαίνεται πως η επιλογή της ισοδύναμης πλαισιακής προσομοίωσης με χρήση γραμμικών στοιχείων δεν είναι η ενδεδειγμένη στο συγκεκριμένο παράδειγμα, καθώς ο λόγος ύψους προς πλάτους του τοιχώματος είναι αρκετά μικρός (τιμή <2). Επιλέχθηκε όμως αυτό το απλό παράδειγμα για την παρουσίαση της μεθόδου, καθώς κρίθηκε σκόπιμο να γίνει χρήση του απλούστερου δυνατού φορέα, ώστε να δοθεί έμφαση στην προσέγγιση προσομοίωσης που ακολουθείται και όχι στην εισαγωγή των λοιπών δεδομένων που απαιτούνται.

Η δυστροψία του στερεού βραχίονα υπολογίζεται από την Εξίσωση 6.1 για το τοίχωμα του παραδείγματος ως εξής:

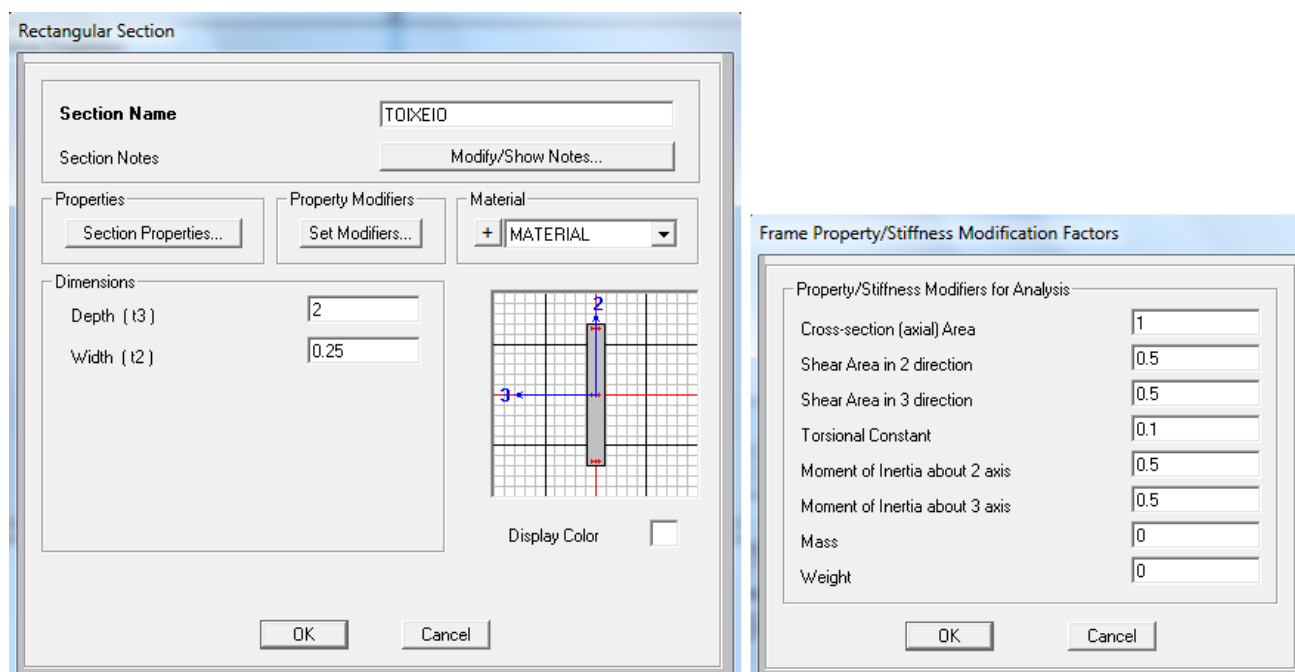
$$\alpha = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{192 \cdot 0.25m}{\pi^5 \cdot 1.5m} \right) \cdot \tanh \left(\frac{\pi \cdot 1.5m}{2 \cdot 0.25m} \right) \right] = 0.298477 \quad (6.2)$$

$$J = 0.298477 \cdot (0.25m)^3 \cdot 1.5m = 0.006996m^4 \quad (6.3)$$

Κατά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του στερεού βραχίονα, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο μηδενισμό της μάζας και του ίδιου βάρους της διατομής. Ακόμη και στην περίπτωση που είναι επιθυμητό τα δομικά στοιχεία να εμπεριέχουν το ίδιο βάρος τους, η μάζα και το βάρος του τοιχώματος θα συμπεριληφθούν στο κατακόρυφο γραμμικό στοιχείο του κορμού. Θα πρέπει συνεπώς οι ιδιότητες της διατομής του βραχίονα να αποκλείουν την εισαγωγή πρόσθετων βαρών στον φορέα.

Για την προσομοίωση του κορμού του τοιχώματος αρκεί η εισαγωγή μιας ορθογωνικής διατομής κατάλληλων διαστάσεων (*Define* → *Section Properties* → *Frame Sections* και προσθήκη ορθογωνικής διατομής της ομάδας *Concrete*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13. Το μήκος του τοιχώματος (διάσταση κατά *X*) τίθεται στο πεδίο *Depth* και το πάχος (διάσταση κατά *Y*) στο πεδίο *Width*, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Παράρτημα Α. Στους συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών δίνεται η απομείωση για καμπτικά και διατμητικά χαρακτηριστικά λόγω ρηγματωμένων διατομών που ορίζει ο *EC8 §4.3.1(7)*, ίση με το μισό της αρχικής τους τιμής, βάσει και του σχετικού Πίνακα Β.1 που περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Β. Για τον κορμό του τοιχώματος ακολουθείται η επιλογή της απομείωσης στο 10% της τιμής της αρηγμάτωσης διατομής του *EAK 2000 §3.2.3(2)*, παρά την έλλειψη σχετικής πρόβλεψης στον *EC8*, σύμφωνα με αιτιολογημένη σύσταση από τους Αβραμίδη και συνεργάτες (2011). Η πυκνότητα και το ειδικό βάρος της

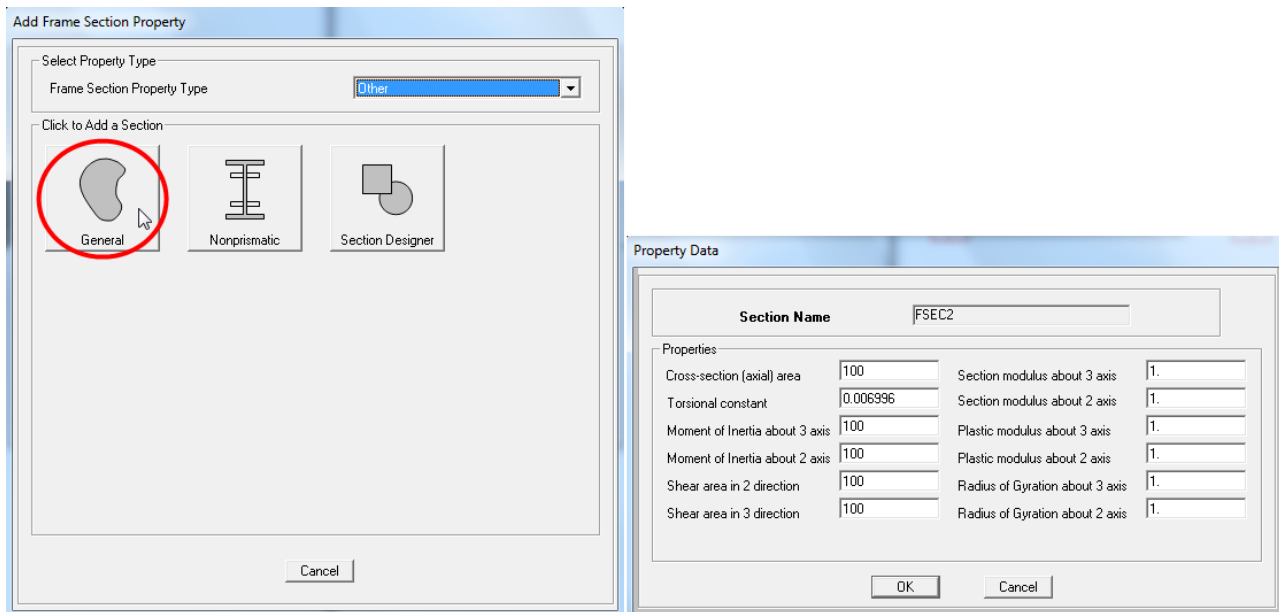
διατομής μηδενίζονται, καθώς τα ίδια βάρη του φορέα θεωρείται πως συμπεριλαμβάνονται στα κατανεμημένα φορτία δοκών.



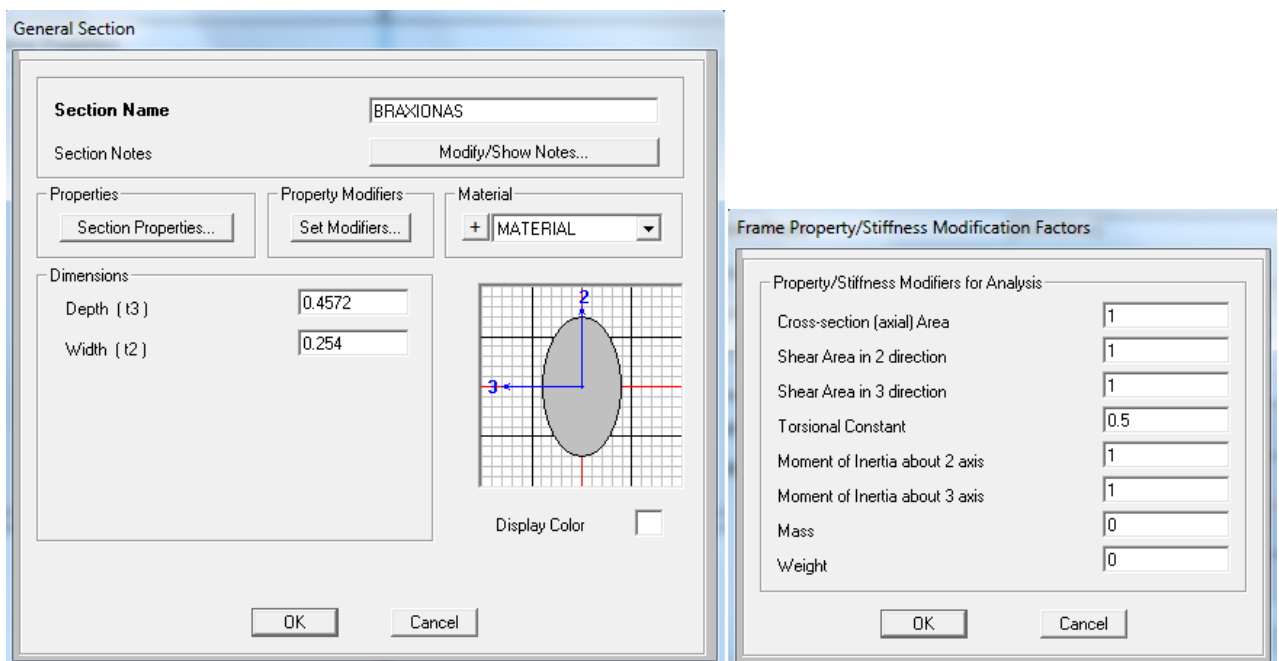
Σχήμα 6.13 Καθορισμός διατομής τοιχώματος και απομείωση ιδιοτήτων λόγω ρηγμάτωσης.

Για τον ορισμό του στερεού βραχίονα επιλέγεται η χρήση της διατομής τύπου *General*, η οποία επιτρέπει τον απευθείας καθορισμό των χαρακτηριστικών της δυσκαμψίας, δυστένειας κτλ, δίχως να απαιτείται προηγουμένως η επιλογή συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων διατομής. Η διατομή αυτή μπορεί να βρεθεί στην ομάδα διατομών *Other*, ενώ ορίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 6.14. Η τιμή **100** που τίθεται σε όλα τα πεδία ελαστικής συμπεριφοράς είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά άλλων δομικών στοιχείων. Εξάιρεση αποτελεί το πεδίο όπου καθορίζεται η τιμή της δυστρεψίας της διατομής (*Torsional constant*), ίση με 0.006996m^4 σύμφωνα με την Εξίσωση 6.3.

Οι διαστάσεις που φαίνονται στο επόμενο βήμα ορισμού της διατομής βραχίονα, μετά το πρώτο *OK*, δεν επηρεάζουν τη συμπεριφορά του και παραμένουν ως έχουν (αριστερά τμήμα του Σχήματος 6.15). Επιλέγεται το υλικό του φορέα, ενώ στον καθορισμό των συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων (*Modifiers* στο δεξί τμήμα του Σχήματος) μηδενίζονται η μάζα και το βάρος της διατομής. Δεν θεωρείται σκόπιμος ο καθορισμός συντελεστών απομείωσης καθώς έχουν τεθεί τεχνητά μεγάλες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων, εκτός από την περίπτωση της δυστρεψίας όπου έχει οριστεί πεπερασμένη τιμή. Παρόλο που η προηγούμενη σύσταση του *EAK 2000* προέβλεπε απομείωση της δυστρεψίας στο 0.1 της αρηγμάτωσης διατομής, επιλέγεται μια τιμή στο 0.5 της αρχικής τιμής όμοια με την απομείωση της δυσκαμψίας που προτείνει ο *EC8*. Αυτό συμβαίνει καθώς η δυστρεψία του βοηθητικού, «μη πραγματικού», στοιχείου του βραχίονα, δεν σχετίζεται τόσο με τη δυστρεψία του τμήματος του τοιχώματος που υποκαθιστά, αλλά περισσότερο με μια μορφή κάμψης του.

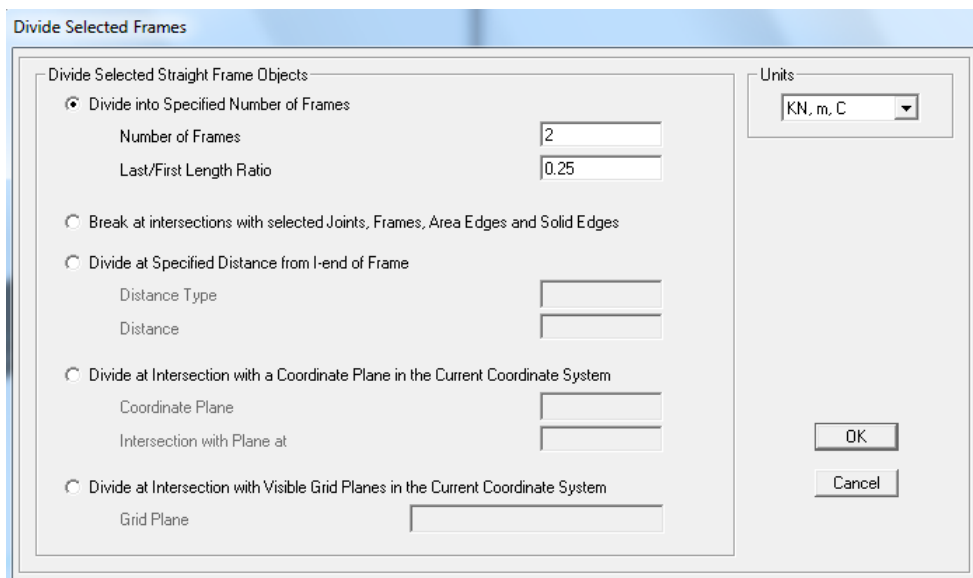


Σχήμα 6.14 Καθορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών διατομής στερεού βραχίονα.

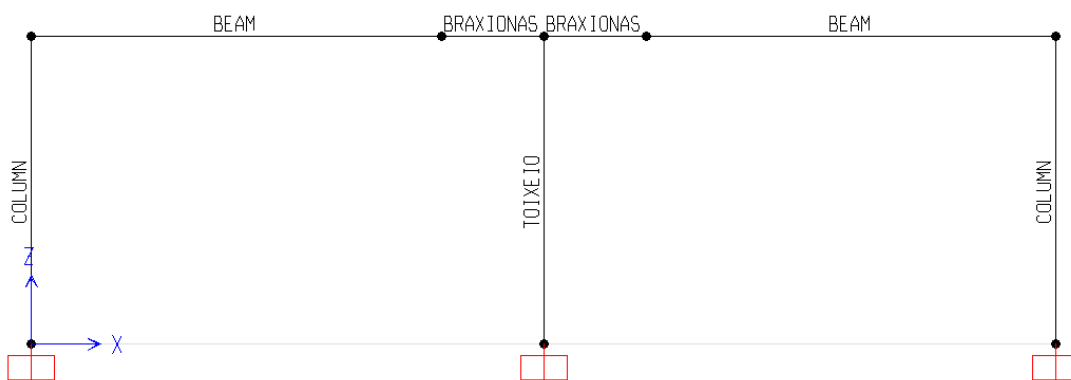


Σχήμα 6.15 Απομείωση γεωμετρικών ιδιοτήτων στερεού βραχίονα.

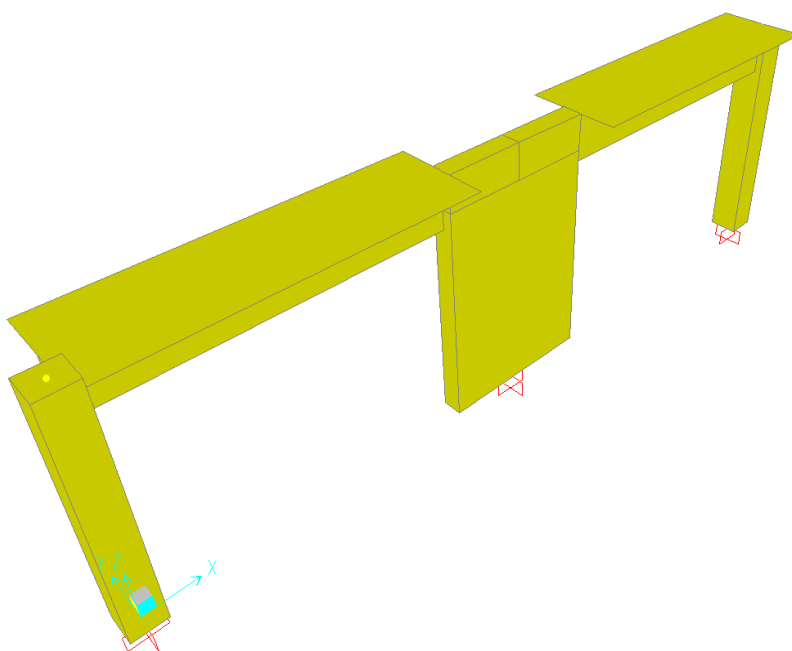
Για τη δημιουργία των τμημάτων του στερεού βραχίονα στο επίπεδο του ορόφου, θα πρέπει οι υφιστάμενες δοκοί να διαιρεθούν σε επιμέρους τμήματα. Αυτό γίνεται, χωριστά για την κάθε δοκό, από την εντολή *Edit* → *Edit Lines* → *Divide Frames*, όπου στο πεδίο *Last/First Length Ratio* (λόγος μήκους τελευταίου/πρώτο τμήμα) τίθεται τιμή *0.25* για την αριστερά δοκό (Σχήμα 6.16) και *4.0* για τη δεξιά. Πλέον, η κάθε δοκός έχει διακριτοποιηθεί σε επιμέρους τμήματα, οπότε μπορεί να ανατεθεί στα ενδιάμεσα γραμμικά στοιχεία η διατομή του βραχίονα που δημιουργήθηκε προηγουμένως (*Assign* → *Frame* → *Frame Sections* → *BRAXIONAS*). Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να ανατεθεί η διατομή του τοιχώματος στο μεσαίο κατακόρυφο γραμμικό στοιχείο (*ΤΟΙΧΕΙΟ*). Η τελική εικόνα του φορέα τόσο στο επίπεδο όσο και σε τρισδιάστατη απεικόνιση, φαίνεται στα Σχήματα 6.17 και 6.18 αντίστοιχα. Παρατηρείται πως η διατομή του στερεού βραχίονα (τύπου *General*), αποδίδεται τρισδιάστατα με τη χρήση ενός συμβατικού ορθογωνικού σχήματος.



Σχήμα 6.16 Διαίρεση αριστερά δοκού σε δυο τμήματα (για τη δεξιά δοκό τίθεται Last/First=4).



Σχήμα 6.17 Τελική εικόνα του φορέα στο επίπεδο, μετά την ανάθεση των διατομών τοιχώματος και στερεού βραχίονα.

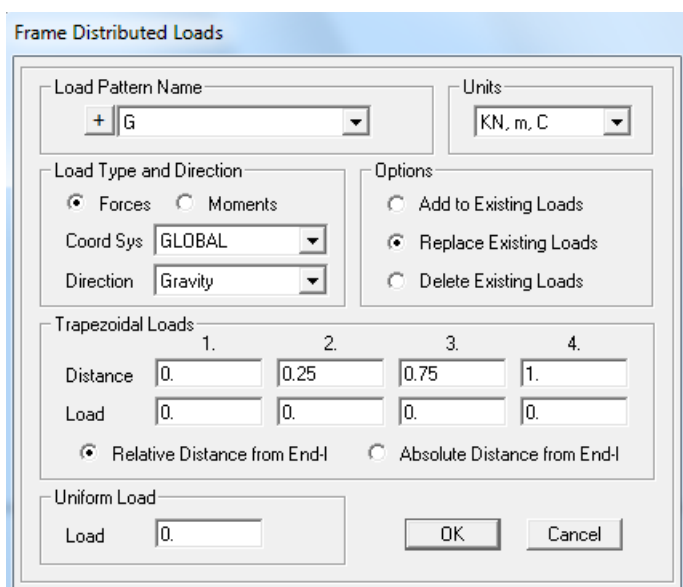


Σχήμα 6.18 Τρισδιάστατη απεικόνιση του φορέα.

6.5. Ορισμός φορτίων

Καθώς για την εισαγωγή του φορέα χρησιμοποιήθηκε ο φορέας προηγούμενου Κεφαλαίου, τα κατανεμημένα φορτία στο επίπεδο του ορόφου έχουν ήδη ανατεθεί στις δοκούς. Η εμφάνιση όμως της κατανεμημένης φόρτισης του φορέα (*Display* → *Show Load Assigns* → *Frame/Cable/Tendon* για κάποιο από τα φορτία *G* ή *Q*), δείχνει πως το κατανεμημένο φορτίο συνεχίζεται και πάνω στο στερεό βραχίονα που αποτελεί μέρος του δομικού στοιχείου του τοιχώματος. Απαιτείται συνεπώς η αφαίρεση της κατανεμημένης φόρτισης από το συγκεκριμένο τμήμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή των τμημάτων του βραχίονα και την ανάθεση (*Assign* → *Frame Loads* → *Distributed*) μηδενικού κατανεμημένου φορτίου (*Uniform Load=0*) διαδοχικά στις μορφές φόρτισης *G* και *Q* (Σχήμα 6.19). Επισημαίνεται πως κάθε φορά θα πρέπει να ολοκληρώνεται, με *OK*, η τροποποίηση του φορτίου στην κάθε μορφή φόρτισης, πριν γίνει η ίδια διαδικασία και για την άλλη μορφή. Για την επιτυχή αντικατάσταση του υφιστάμενου φορτίου με μηδενικό, είναι απαραίτητο να είναι ενεργοποιημένη η επιλογή *Replace Existing Loads* (αντικατάσταση υφισταμένων φορτίων).

Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και για την τροποποίηση της οριζόντιας φόρτισης, οπότε επιλέγεται ο αριστερά κόμβος ορόφου στον οποίον ανατίθεται τιμή οριζόντιου φορτίου *1000kN* για τη μορφή φόρτισης *E* (*Assign* → *Joint Loads* → *Forces*).



Σχήμα 6.19 Μηδενισμός κατανεμημένου φορτίου *G* για το τμήμα του στερεού βραχίονα.

6.6. Ορισμός διαφράγματος

Στο επίπεδο της δοκού αναφέρεται η ύπαρξη πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος, οπότε θεωρείται διαφραγματική λειτουργία όμοια με το Κεφάλαιο 3. Καθώς όμως έχουν δημιουργηθεί νέοι κόμβοι στο προσομοίωμα, είναι σκόπιμο να ενσωματωθούν στο ήδη υφιστάμενο διάφραγμα. Αυτό γίνεται με επιλογή των κόμβων (μπορούν να επιλεγούν όλοι οι κόμβοι του ορόφου, ασχέτως αν ήδη ανήκουν στο συγκεκριμένο διάφραγμα), οπότε με την εντολή *Assign* → *Joint* → *Constraints* τους ανατίθεται το ήδη υπάρχον *DIAPH1_3*.

6.7. Προσδιορισμός θέσης υπολογισμού αποτελεσμάτων

Για να την πύκνωση των θέσεων ελέγχου των αποτελεσμάτων, αφού επιλεγεί όλος ο φορέας (με **Ctrl+A** ή το εργαλείο **All** της κατακόρυφης σειράς εργαλείων στο αριστερά μέρος της οθόνης), με την εντολή **Assign → Frame → Output Stations** επιλέγεται η τιμή **9** και ανατίθεται με **OK** στα γραμμικά στοιχεία του φορέα.

6.8. Ανάλυση φορέα

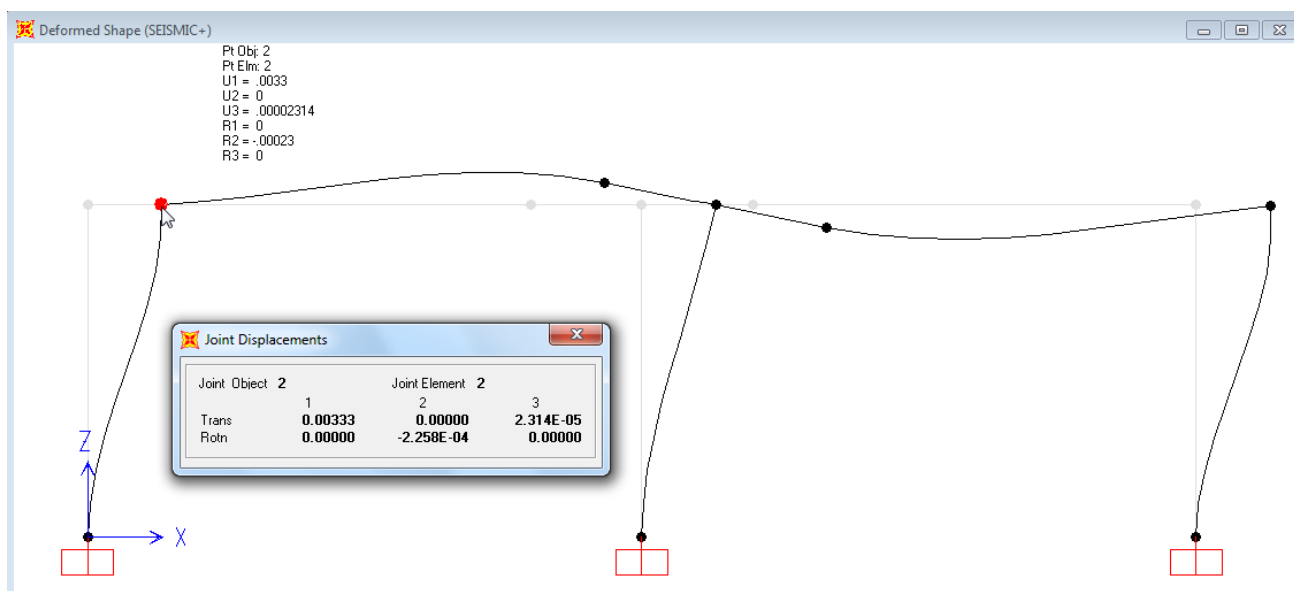
Καθώς ο φορέας είναι επίπεδος, με φόρτιση που προκαλεί καταπόνηση εντός του **xz** επιπέδου, αρκεί η ανάλυση στο επίπεδο που έχει ήδη τεθεί από τον προηγούμενο φορέα, μέσω της επιλογής **Analyze → Set Analysis Options (XZ Plane)**.

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή **Analyze → Run Analysis** και **Run Now**.

6.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοιχώματος με γραμμικά στοιχεία

6.9.1. Παραμορφωμένη γραμμή φορέα και μετακινήσεις κόμβων

Από την εντολή **Display → Show Deformed Shape**, επιλέγεται η εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής του φορέα για το συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+ (G+0.3Q+E)**, όπου και καταγράφονται οι μετατοπίσεις του αριστερά κόμβου (Σχήμα 6.20). Είναι εμφανής στη μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα, αλλά και με τη λειτουργία **Start Animation**, η σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία στο τμήμα του στερεού βραχίονα.



Σχήμα 6.20 Παραμορφωμένη γραμμή φορέα για συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+ (G+0.3Q+E)**.

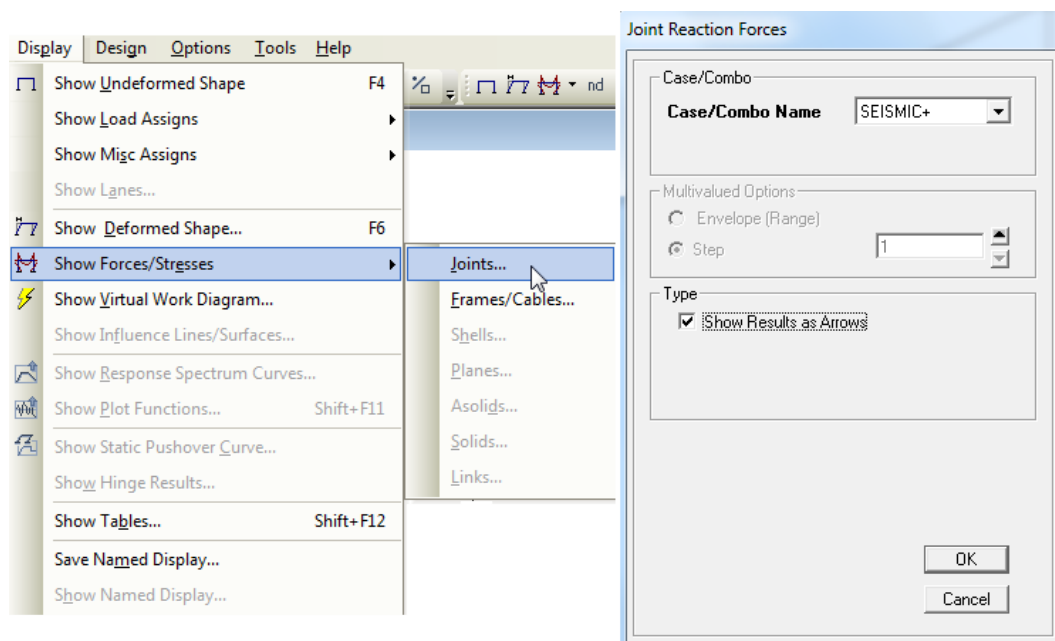
Πολυμεσικό Αντικείμενο 6.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει παραστατικά την εικόνα της παραμόρφωσης του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό δράσης <i>SEISMIC+</i>. Σημειώνεται πως η πλήρης κίνηση που εμφανίζεται δεν είναι ακριβής, καθώς στον συγκεκριμένο συνδυασμό δρουν στην πραγματικότητα φορτία προς τη μια μόνο κατεύθυνση, γίνεται όμως εύκολα αντιληπτή η αυξημένη δυσκαμψία των τμημάτων βραχίονα στο τοίχωμα.</p>	

6.9.2. Αντιδράσεις στις στηρίξεις

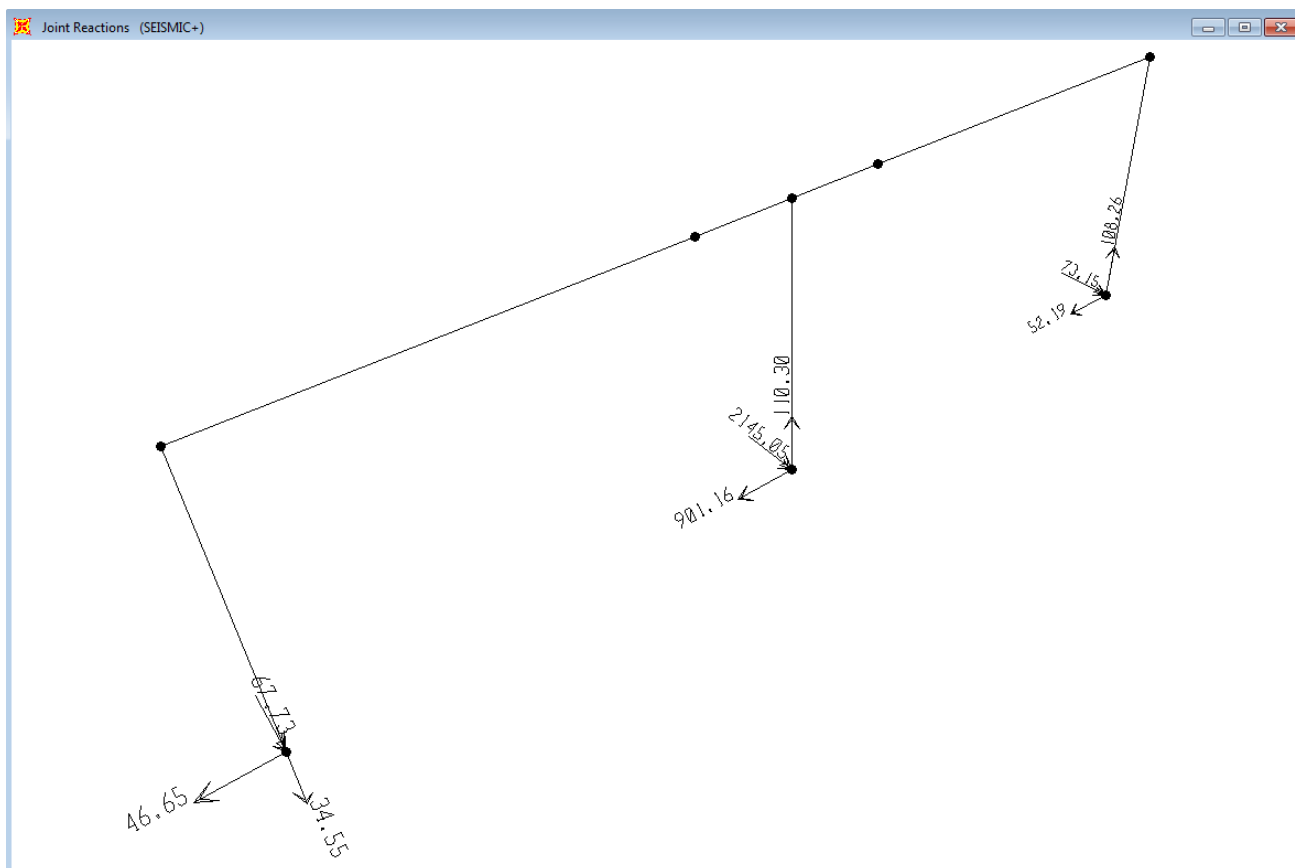
Για την εμφάνιση των αντιδράσεων στήριξης του φορέα, επιλέγεται η τρισδιάστατη όψη του προκειμένου να είναι δυνατή η εμφάνιση του διανύσματος της ροπής στη βάση του (ροπή κάμψης γύρω από τον άξονα Y). Οι αντιδράσεις στήριξης εμφανίζονται με την εντολή *Display* → *Show Forces/Stresses* → *Joints* (Σχήμα 6.21) οπότε και επιλέγεται ενδεικτικά ο συνδυασμός φόρτισης *SEISMIC+ (G+0.3Q+E)*. Με την επιλογή *Show Results as Arrows* οι αντιδράσεις εμφανίζονται με διανυσματική μορφή (3-d όψη, Σχήμα 6.22), ενώ αν δεν γίνει η συγκεκριμένη επιλογή εμφανίζονται με απλή παράθεση τιμών (απαραίτητο όταν επιλέγεται 2d όψη για την εμφάνιση της ροπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.23). Επισημαίνεται η διανυσματική απόδοση της ροπής με βέλος με διπλή απόληξη στο Σχήμα της 3-d όψης. Επίσης, σημειώνεται η μεγάλη τιμή της ροπής που παραλαμβάνει το τοίχωμα (*2145.05kNm*) έναντι των άλλων κατακόρυφων στοιχείων.

Προβλήματα κατά την ανάγνωση αποτελεσμάτων σε τοπικούς άξονες στοιχείων

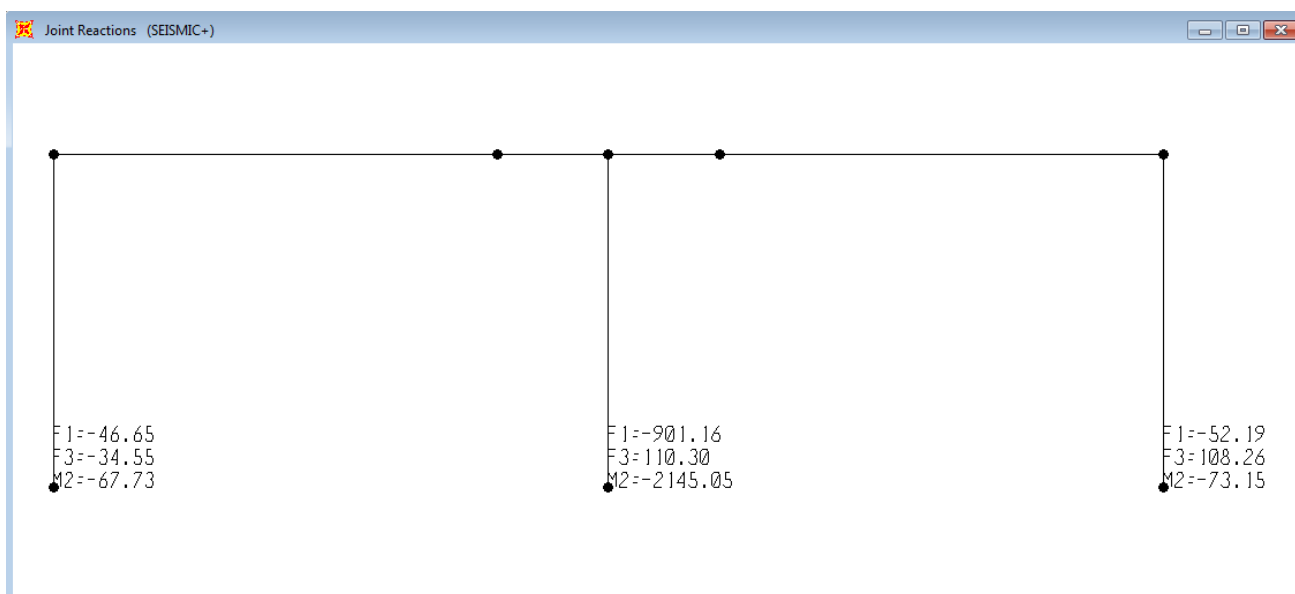
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6.23, η ροπή στις στηρίξεις συμβολίζεται ως *M2* (γύρω από τον τοπικό άξονα 2), σε αντίθεση με την ανάγνωση ροπής των κατακόρυφων στοιχείων εντός πλαισίου xz που ζητείται συνήθως ως *M3-3* (βλ. προηγούμενα Κεφάλαια). Ο λόγος του διαφορετικού συμβολισμού αφορά τον διαφορετικό ορισμό των τοπικών αξόνων σε κόμβους και γραμμικά στοιχεία. Πράγματι, στα κατακόρυφα γραμμικά στοιχεία η ροπή *M3-3* αφορά κάμψη γύρω από τον γενικό άξονα Y (Παράρτημα Α). Στους κόμβους όμως, ο γενικός άξονας Y ταυτίζεται με τον τοπικό άξονα 2 , αιτιολογώντας τον συμβολισμό *M2*. Θα πρέπει συνεπώς να δίνεται μεγάλη προσοχή στην ανάγνωση των αποτελεσμάτων, ιδίως όταν αφορούν το τοπικό σύστημα αξόνων του κάθε στοιχείου, για να μην δημιουργείται σύγχυση.



Σχήμα 6.21 Εμφάνιση αντιδράσεων στις στηρίξεις για τον συνδυασμό *SEISMIC+ (G+0.3Q+E)*.



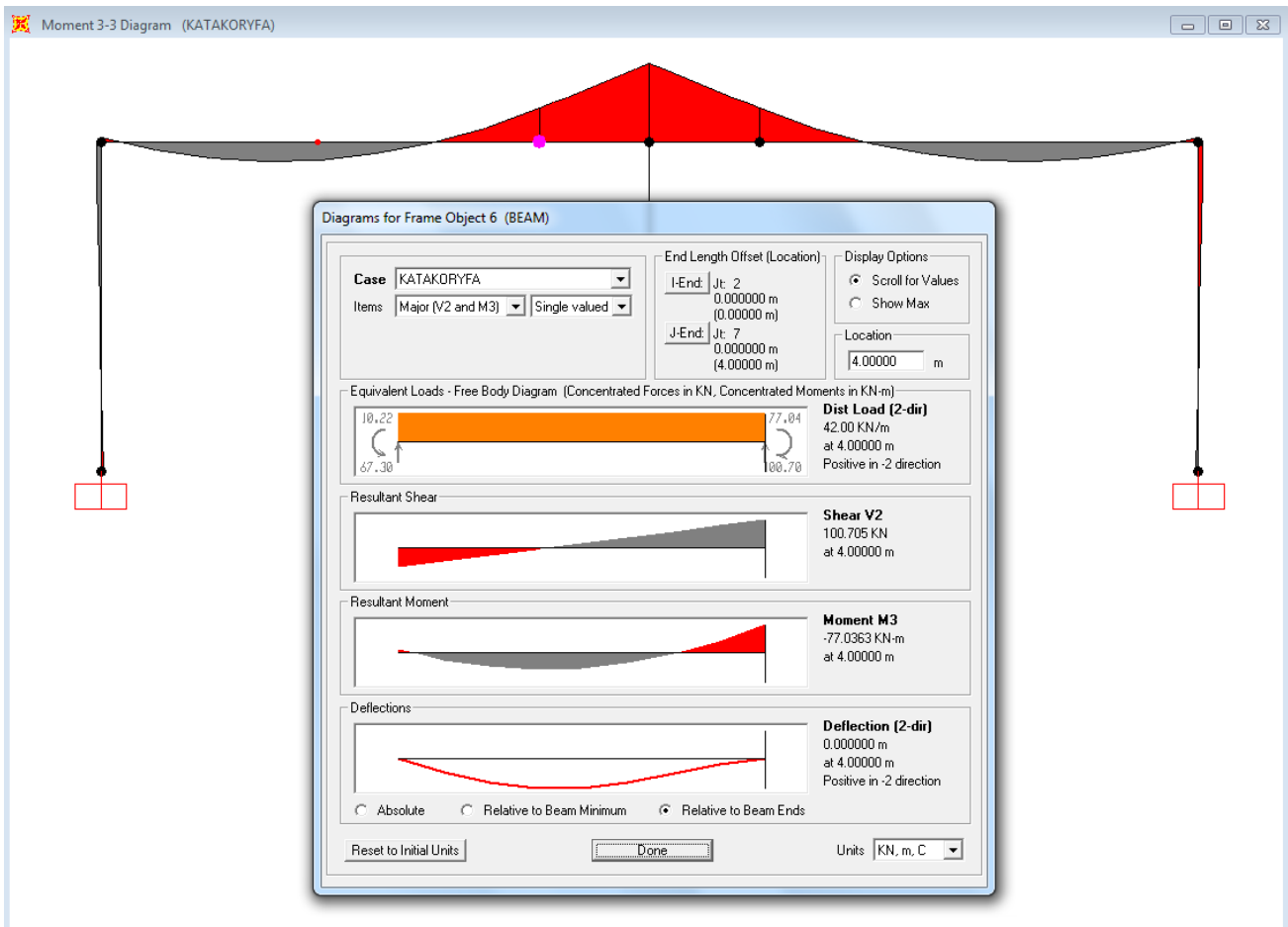
Σχήμα 6.22 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με διανυσματική μορφή σε 3-d απεικόνιση (ενεργό Show Results as Arrows) για συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (G+0.3Q+E).



Σχήμα 6.23 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με παράθεση τιμών σε 2d απεικόνιση (ανενεργό Show Results as Arrows) για συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (G+0.3Q+E).

6.9.3. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Κατά τα γνωστά, τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εμφανίζονται από την εντολή *Display* → *Show Forces/stresses* → *Frames/Cables*. Επιλέγεται ενδεικτικά η εμφάνιση των καμπτικών ροπών *Moment 3-3* για τον συνδυασμό φόρτισης *KATAKORYFA (1.35G+1.50Q)*, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.24. Το διάγραμμα ροπών στο μήκος του στερεού βραχίονα δεν έχει κάποια φυσική σημασία και αγνοείται. Στη λεπτομέρεια εμφανίζεται η ροπή στο άκρο της αριστερά δοκού, στο σημείο σύνδεσης με το στερεό βραχίονα.



Σχήμα 6.24 Διάγραμμα ροπών για συνδυασμό φόρτισης *KATAKORYFA (1.35G+1.50Q)*.

6.9.4. Πινακοποιημένα αποτελέσματα και αξιολόγηση

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται επιλεγμένα αποτελέσματα από την προσομοίωση που προηγήθηκε, όπου ο στερεός βραχίονας προσομοιώθηκε με πολύ μεγάλες τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών εκτός της δυστρεψιάς (Στερεός βραχίονας A). Παράλληλα, εμφανίζονται συγκριτικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα εναλλακτικής προσομοίωσης του στερεού βραχίονα του τοιχώματος (Στερεός βραχίονας B), με τη χρήση ορθογωνικής διατομής ύψους από μέσον σε μέσον ορόφου, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Παρατηρείται πως τα δυο προσομοιώματα είναι πρακτικά ισοδύναμα, εκτός της ροπής στο άκρο της δοκού όπου εμφανίζεται μια σχετική διαφορά της τάξης του 10-20%, η οποία σχετίζεται με τα σχόλια που έγιναν στην αντίστοιχη παράγραφο του Κεφαλαίου.

Μέγεθος	Μετακίνηση κόμβου (G+0.3Q+E)	Ροπή βάσης τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Τέμνουσα βάση τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (1.35G+1.5Q)
Στερεός βραχίονας Α	0.00333m	-2145.05kNm	-901.16kN	-249.99kNm	-77.04kNm
Στερεός βραχίονας Β	0.00344m	-2203.69kNm	-901.54kN	-216.70kNm	-57.83kNm
Απόκλιση	3.30%	2.73%	0.04%	13.32%	24.94%

Πίνακας 6.1 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης για διαφορετική επιλογή προσομοίωσης του στερεού βραχίονα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 6^{ου} Κεφαλαίου

- Αβραμίδης, Ι. Ε. (2001). *Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις μεθόδους προσομοίωσης κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Αναστασιάδης, Κ., & Μορφίδης, Κ. (2005). *Πρότυπα αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Ξενίδης, Χ., Αβραμίδης, Ι., & Τριαματάκη, Μ. (1998). Συγκριτική αξιολόγηση απλοποιημένων προσομοιωμάτων για πυρήνες κτιρίων Ο/Σ υπό στατική και δυναμική φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του ΤΕΕ, 1,18(3)*, 9-25.

Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 7 παρουσιάζεται η προσομοίωση επίπεδου τοιχώματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: μόρφωση και ιδιότητες επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, διακριτοποίηση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, προσομοίωση τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, υπολογισμός εντατικών μεγεθών σε επιφανειακά στοιχεία.

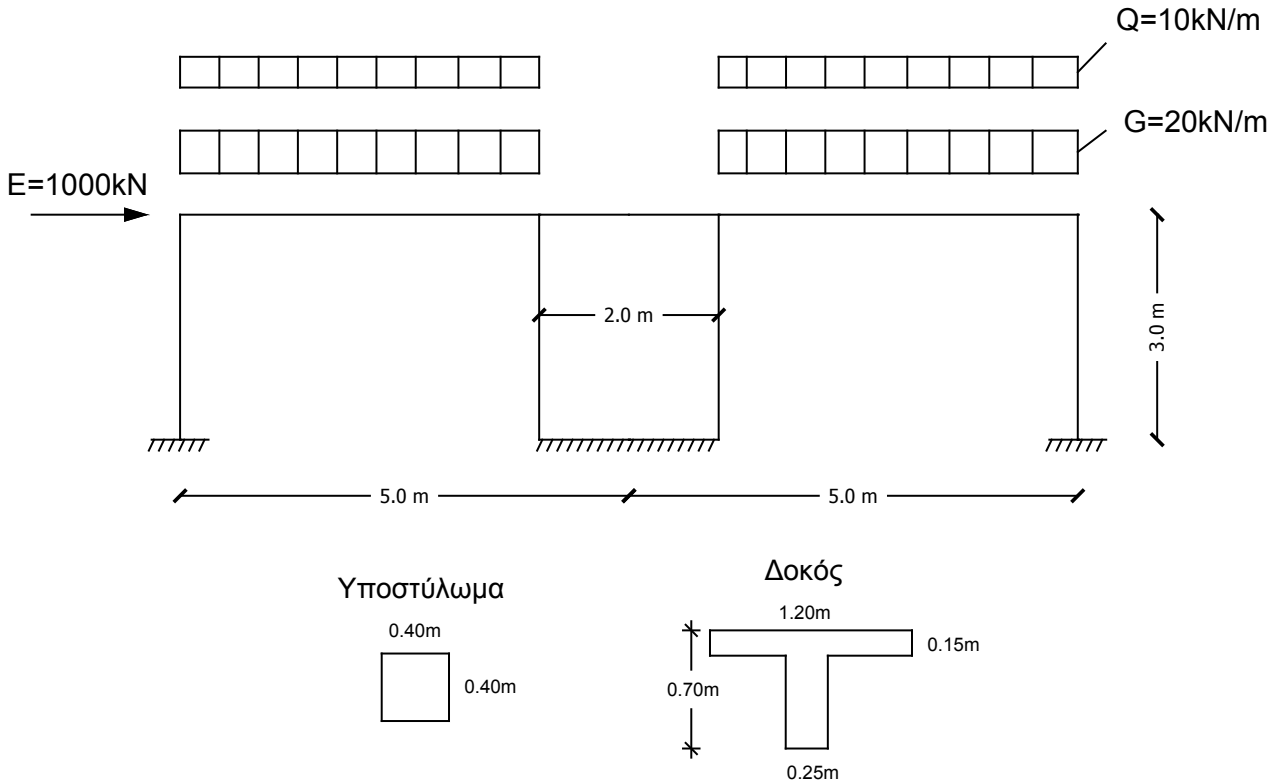
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις συμπεριφοράς τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και ικανότητα ανάγνωσης και κατανόησης σχετικών επιστημονικών κειμένων, πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος, όπως και εφαρμογή του παραδείγματος του Κεφαλαίου 6.

7.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η επίλυση του επίπεδου πλαισίου που περιγράφεται στο Σχήμα 7.1, με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για το τοίχωμα διαστάσεων 25/200. Η επίλυση να γίνει για τον συνδυασμό αστοχίας κατακόρυφων φορτίων και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Η οριζόντια δύναμη E θεωρείται σεισμικό φορτίο, το κατανεμημένο φορτίο G μόνιμη δράση και το Q μεταβλητή δράση.
- Να ληφθεί υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=2.8 \cdot 10^7$ kPa, λόγο Poisson=0.0, αβαρές και με μηδενική πυκνότητα.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα να ληφθούν σε στάδιο II (ρηγματωμένες διατομές).
- Στο επίπεδο της δοκού νοείται όροφος με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 7.1 Επίπεδος φορέας οπλισμένου σκυροδέματος με τοίχωμα.

7.2. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα

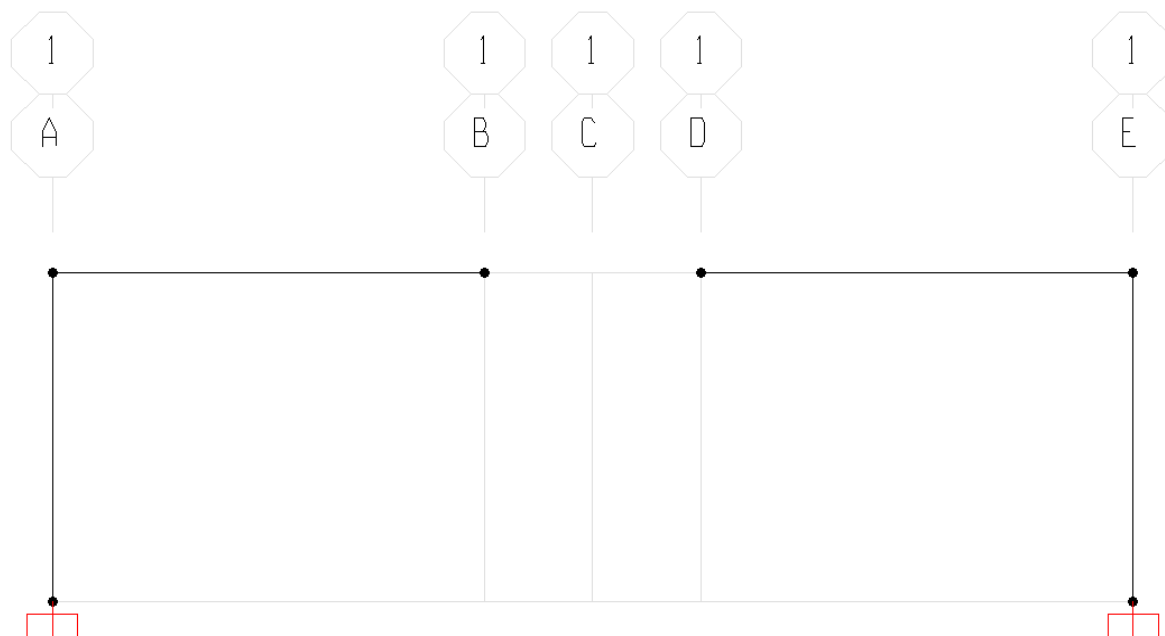
Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι πανομοιότυπο με αυτό του Κεφαλαίου 6, με τη διαφορά της προσομοίωσης του τοιχώματος που ζητείται να γίνει με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται συνεπώς άνοιγμα του αρχείου [Chapter 06.sdb](#) και αποθήκευση με την ονομασία [Chapter 07.sdb](#).

7.2.1. Εισαγωγή επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων τοιχώματος

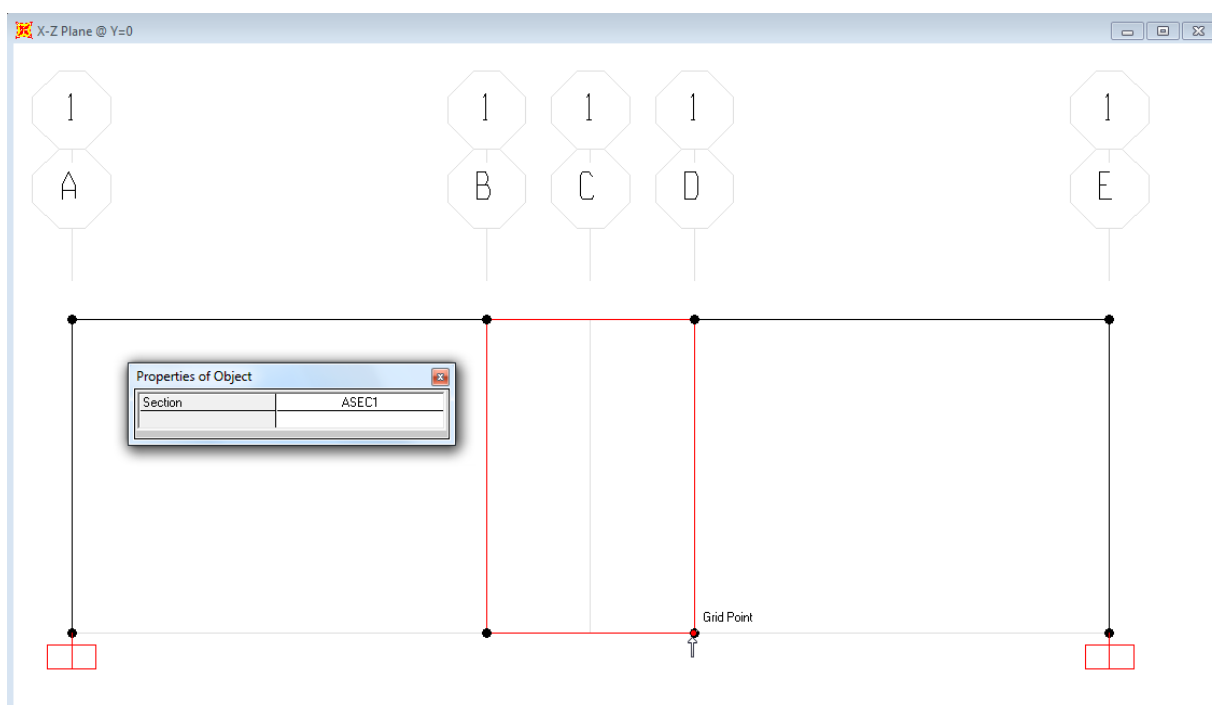
Καθώς το τοίχωμα θα προσομοιωθεί με επιφανειακά στοιχεία, διαγράφεται τόσο το μεσαίο γραμμικό στοιχείο, που χρησίμευσε για την προσομοίωση του τοιχώματος στο προηγούμενο παράδειγμα (ισοδύναμος στύλος), όσο και τα δυο τμήματα στερεού βραχίονα. Η διαγραφή μπορεί να γίνει με επιλογή των στοιχείων και *delete* από το πληκτρολόγιο.

Για τη διευκόλυνση της σχεδίασης του επιφανειακού στοιχείου, απαιτείται ο ορισμός δυο νέων βοηθητικών γραμμών καννάβου (*Define* → *Coordinate Systems/Grids*), στις θέσεις $X=4m$ και $X=6m$ που ορίζουν τα σημεία στα άκρα του τοιχώματος. Ο επανακαθορισμός της ονομασίας της κάθε βοηθητικής γραμμής (A, B, C κτλ) είναι προαιρετικός. Η εικόνα του φορέα με τον τροποποιημένο κάνναβο φαίνεται στο Σχήμα 7.2.

Η σχεδίαση του επιφανειακού στοιχείου γίνεται στο παράθυρο της όψης xz , από την εντολή *Draw* → *Draw Rectangular Area*, κάνοντας *click* διαδοχικά στην πάνω αριστερά και την κάτω δεξιά γωνία που ορίζεται από τις βοηθητικές γραμμές καννάβου (Σχήμα 7.3). Μετά τη σχεδίαση, με χρήση του πλήκτρου *Escape*, γίνεται απενεργοποίηση του εργαλείου σχεδίασης.

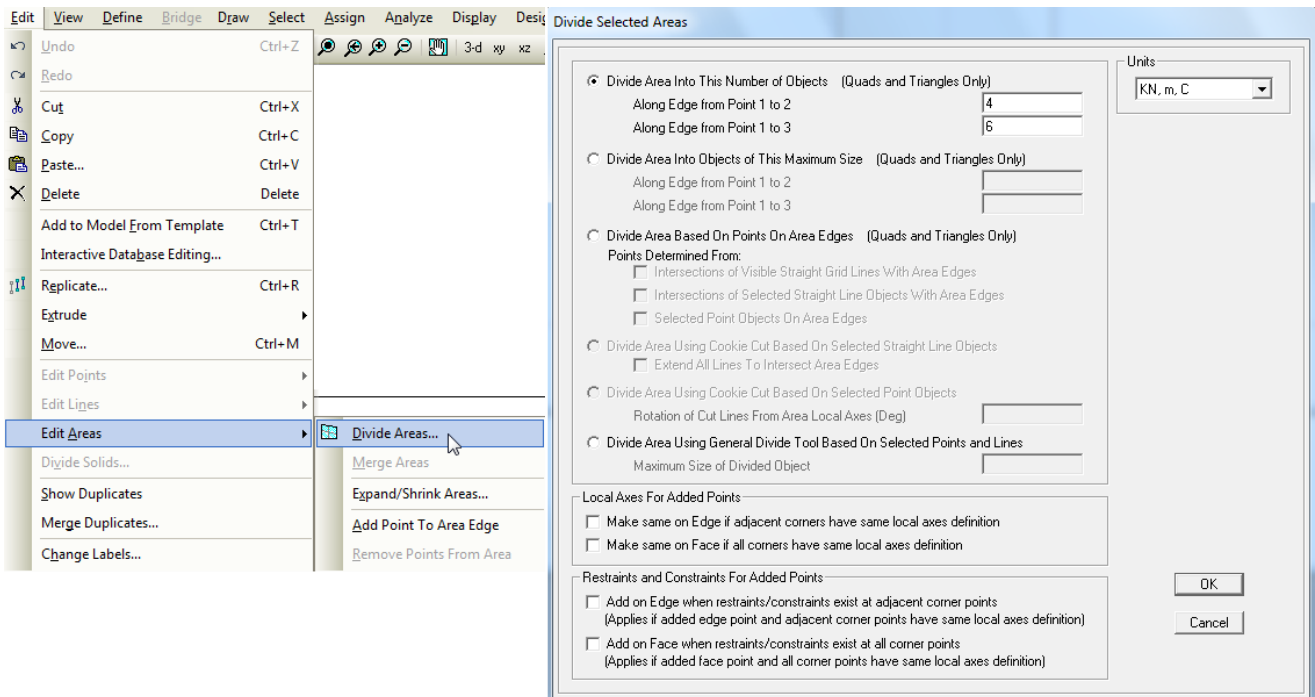


Σχήμα 7.2 Εικόνα φορέα μετά τη διαγραφή των γραμμικών στοιχείων τοιχώματος και τον επανακαθορισμό των βοηθητικών γραμμών καννάβου.

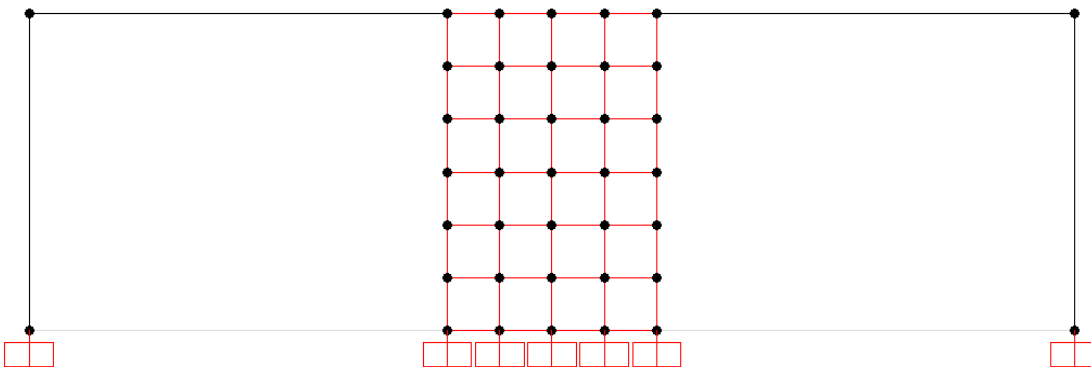


Σχήμα 7.3 Σχεδίαση επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου με τη βοήθεια των γραμμών καννάβου.

Για την ορθότερη απόδοση της συμπεριφοράς του τοιχώματος (Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013· Ξενίδης, Αβραμίδης, & Τριαματάκη, 1998), γίνεται επιλογή του επιφανειακού στοιχείου και διακριτοποίηση του σε μικρότερα με την εντολή *Edit* → *Edit Areas* → *Divide Areas*, όπου και ορίζεται η διάσπαση σε 4 στοιχεία στην οριζόντια διεύθυνση και 6 στην κατακόρυφη (Σχήμα 7.4). Η υλοποίηση της πάκτωσης γίνεται με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων των επιφανειακών στοιχείων στη βάση του τοιχώματος. Η εικόνα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Καθώς πλέον στο επίπεδο του ορόφου έχουν δημιουργηθεί νέοι κόμβοι, λαμβάνεται μέριμνα να ενσωματωθούν στο υφιστάμενο διάφραγμα [DIAPH1_3](#).



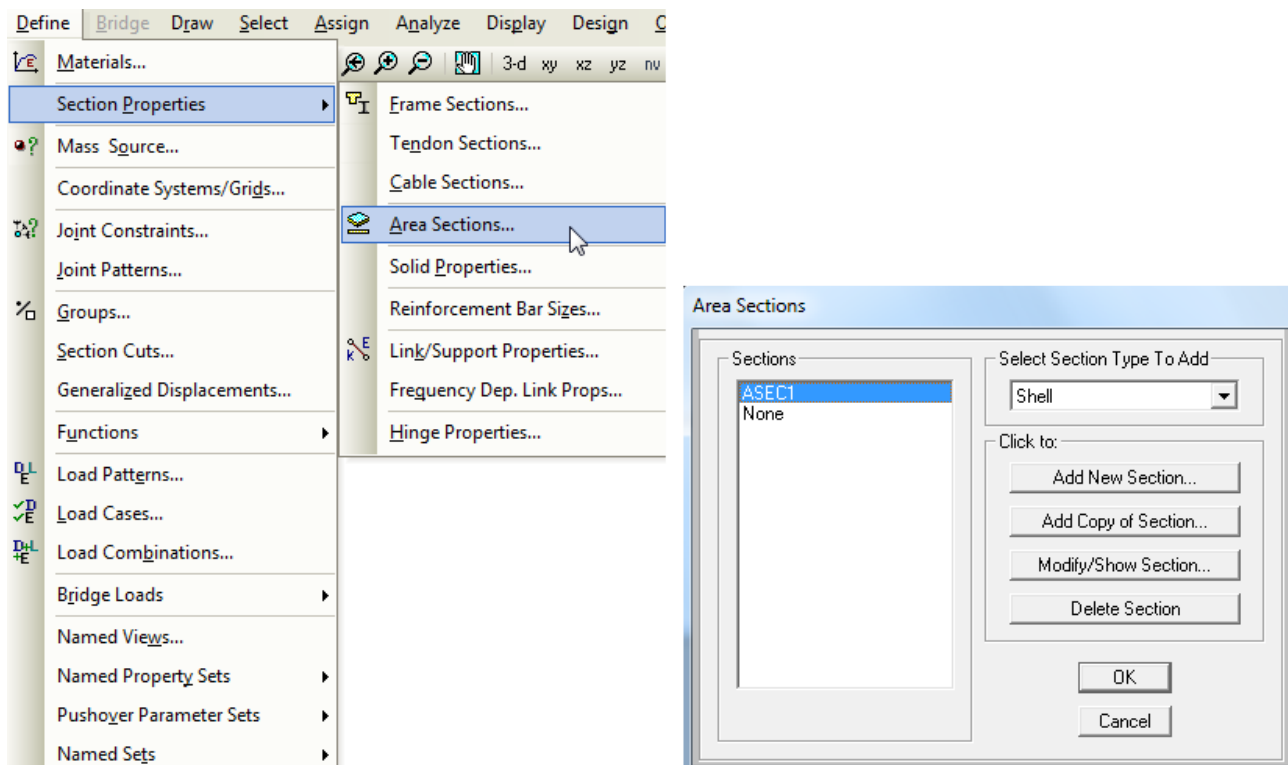
Σχήμα 7.4 Διακριτοποίηση επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου σε 4 στοιχεία στην οριζόντια και 6 στην κατακόρυφη διεύθυνση.



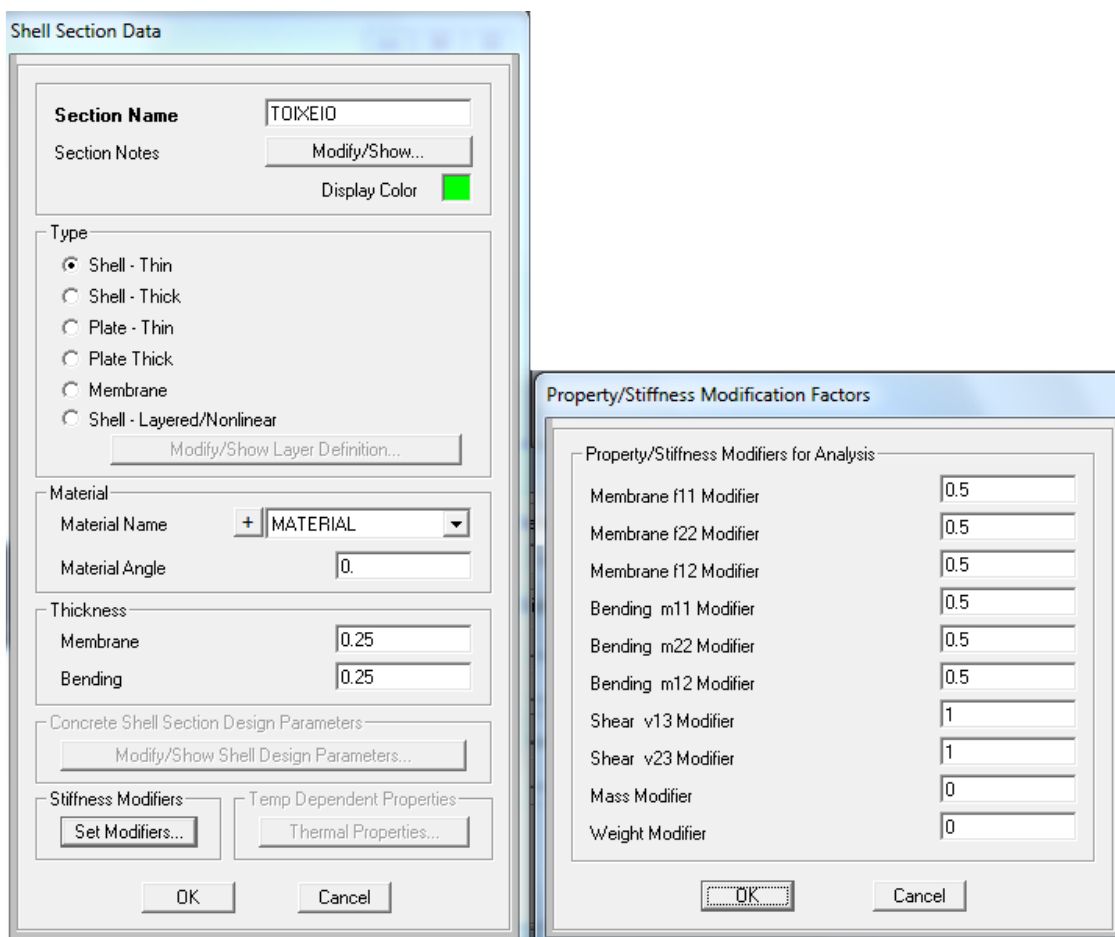
Σχήμα 7.5 Εικόνα φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και πάκτωση στη βάση του τοιχώματος.

7.2.2. Ορισμός ιδιοτήτων διατομής επιφανειακών στοιχείων τοιχώματος

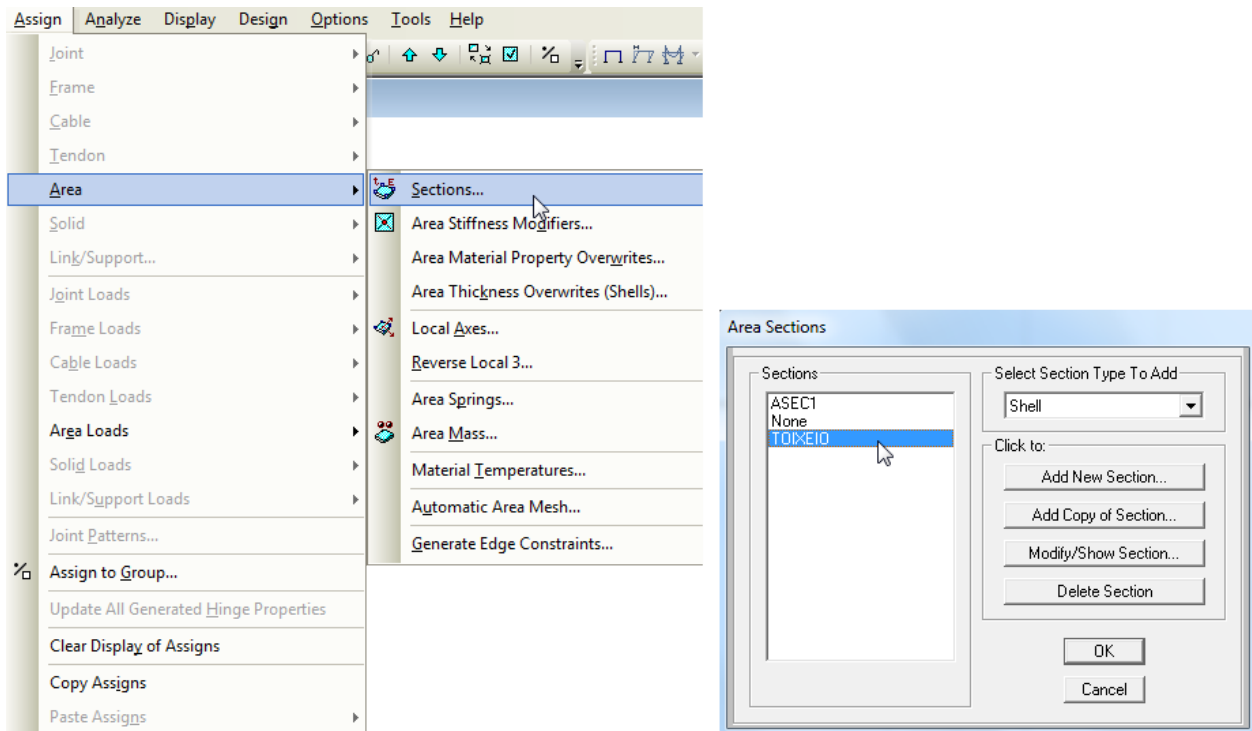
Η διατομή των επιφανειακών στοιχείων του τοιχώματος γίνεται από την εντολή *Define* → *Section Properties* → *Area Sections*. Εκεί μπορεί να προστεθεί μια νέα διατομή τύπου *Shell* (κελύφους) με το *Add New Section*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6 (Computers and Structures Inc., 2010). Το πάχος του τοιχώματος τίθεται στο *Thickness* (και στα δυο πεδία *Membrane* και *Bending*) του Σχήματος 7.7, ενώ το υλικό στο πεδίο *Material*. Η απομείωση της δυσκαμψίας του τοιχώματος ορίζεται στους σχετικούς συντελεστές τροποποίησης (*Modifiers*) στα πεδία *f11* και *f22* (συνήθως αρκεί το δεύτερο για τα κατακόρυφα τοιχώματα, με ελάχιστη διαφορά στα αποτελέσματα αν μεταβληθούν και οι δύο συντελεστές), ενώ η απομείωση της δυσστημίας στο πεδίο *f12* (CSI, n.d.). Παράλληλα, αντίστοιχοι συντελεστές πρέπει να τεθούν και στα πεδία *m11*, *m22* και *m12*, για την απομείωση της εκτός επιπέδου δυσκαμψίας του τοιχώματος. Αναλυτικές πληροφορίες για τις υπόλοιπες επιλογές του τύπου των επιφανειακών στοιχείων (*shell thin*, *shell thick*, *plate* κτλ) μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, ώστε ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται να γίνεται κάθε φορά η κατάλληλη επιλογή στοιχείου. Μετά την ολοκλήρωση του ορισμού της διατομής των επιφανειακών στοιχείων, επιλέγονται τα πεπερασμένα στοιχεία από την επιφάνεια σχεδίασης του προγράμματος και γίνεται ανάθεση στη νέα διατομή με την εντολή *Assign* → *Area* → *Sections* (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.6 Εισαγωγή νέας διατομής επιφανειακών στοιχείων.



Σχήμα 7.7 Ιδιότητες διατομής επιφανειακών στοιχείων τοιχώματος.

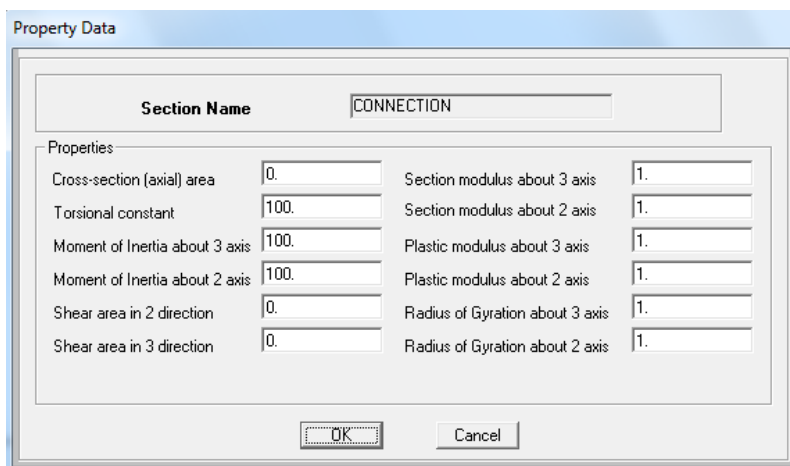


Σχήμα 7.8 Ανάθεση διατομής στα επιφανειακά στοιχεία του τοιχώματος.

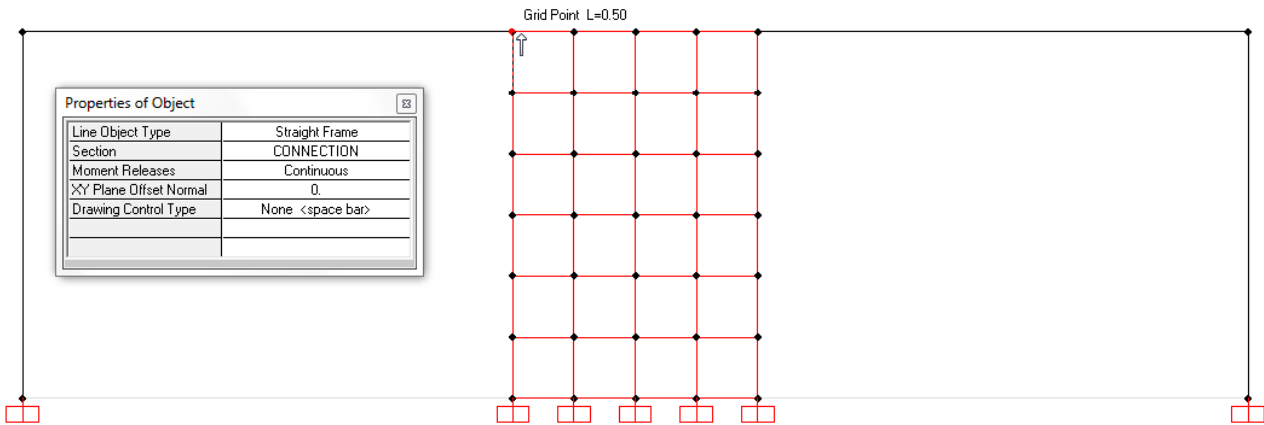
7.2.3. Εισαγωγή βοηθητικών στοιχείων σύνδεσης δοκού-τοιχώματος

Για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση της μονολιθικής σύνδεσης του τοιχώματος με τη δοκό, κρίνεται σκόπιμο να δημιουργηθεί μια νέα διατομή γραμμικού στοιχείου (*CONNECTION*) τύπου *General*, με μεγάλη τιμή δυσκαμψίας και δυστρεψίας και μηδενικές τιμές δυστένειας και δυσμησίας (Σχήμα 7.9). Ακριβέστερο προσομοίωμα, με χρήση δυο τύπων βοηθητικών δοκών με κατάλληλες ιδιότητες και διαφορετική τοποθέτηση στα σημεία σύνδεσης τοιχωμάτων με δοκούς, μπορεί να βρεθεί στους Ξενίδη και συνεργάτες (1998).

Τα γραμμικά στοιχεία σύνδεσης που αφορά η παραπάνω διατομή σχεδιάζονται κατακόρυφα (από κάτω προς τα πάνω), καλύπτοντας το ύψος ενός μόνο επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου (από κόμβο σε κόμβο). Η σχεδίαση γίνεται με την εντολή *Draw* → *Draw Frame/Cable/Tendon* (Σχήμα 7.10). Στα βοηθητικά γραμμικά στοιχεία που σχεδιάστηκαν, ανατίθεται η διατομή *CONNECTION* που δημιουργήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 7.9 Ιδιότητες βοηθητικού στοιχείου σύνδεσης της δοκού με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώματος.



Σχήμα 7.10 Σχεδίαση βοηθητικού στοιχείου σύνδεσης της δοκού με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τοιχώματος.

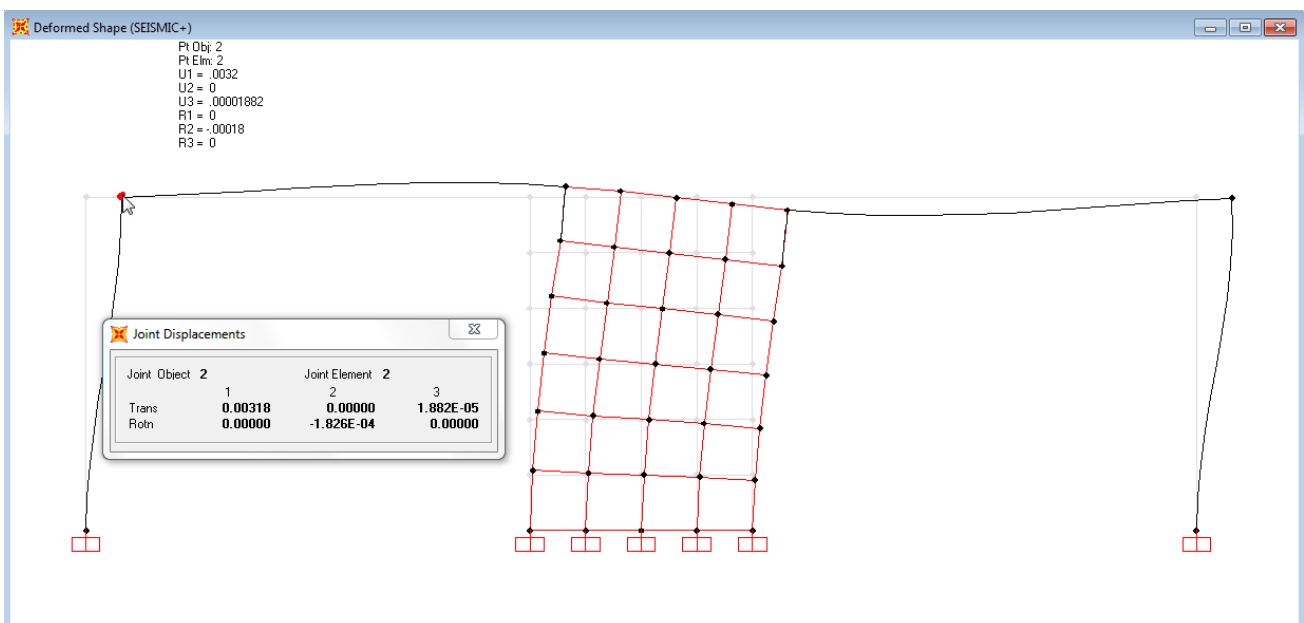
7.3. Ανάλυση φορέα

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*.

7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοιχώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

7.4.1. Παραμορφωμένη γραμμή φορέα και μετακινήσεις κόμβων

Από την εντολή *Display* → *Show Deformed Shape*, επιλέγεται η εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής του φορέα για το συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+* (φορτία *G+0.3Q+E*), όπου και καταγράφονται οι μετατοπίσεις του αριστερά κόμβου (Σχήμα 7.11). Είναι εμφανής στη μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα, αλλά και με τη λειτουργία *Start Animation*, η σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία στο τμήμα του στερεού βραχίονα.

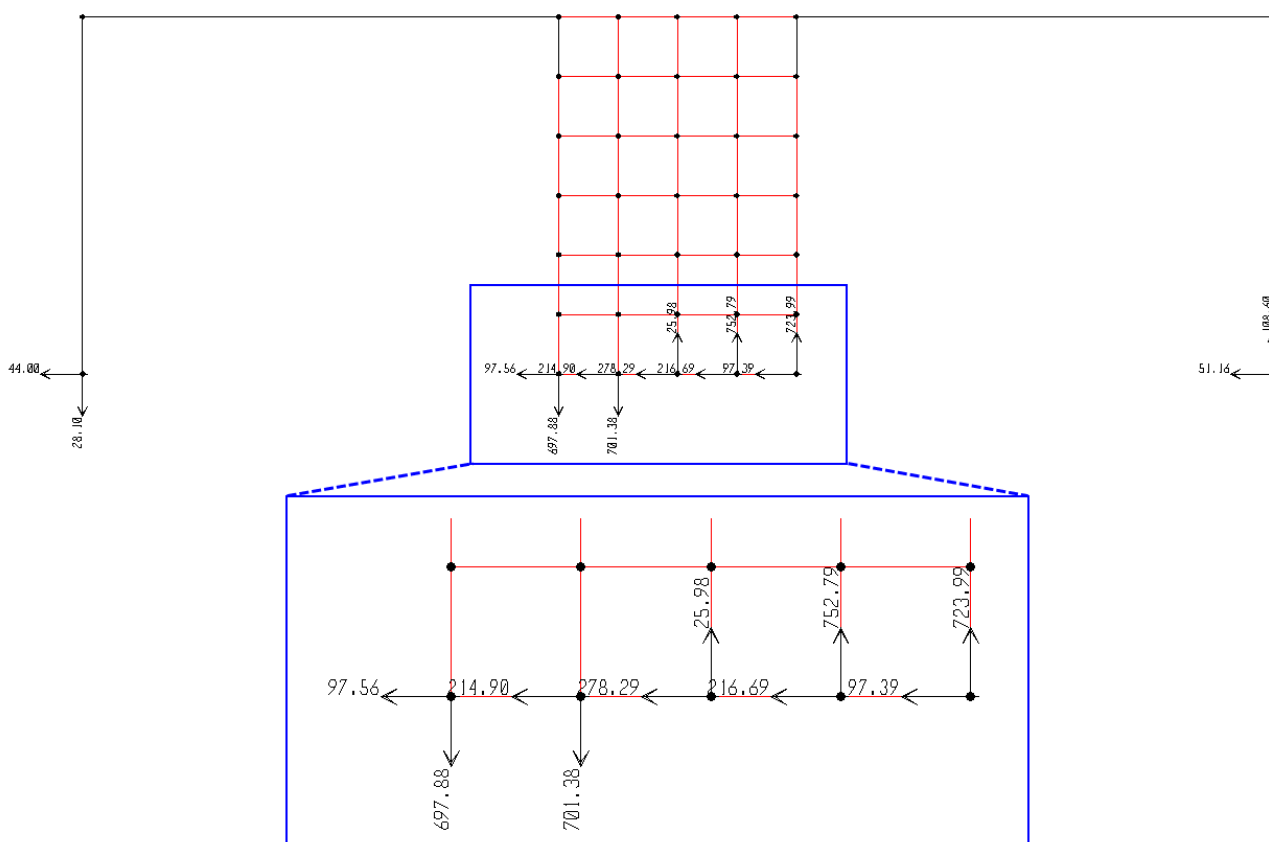


Σχήμα 7.11 Παραμορφωμένη γραμμή φορέα για συνδυασμό φόρτισης *SEISMIC+* (*G+0.3Q+E*).

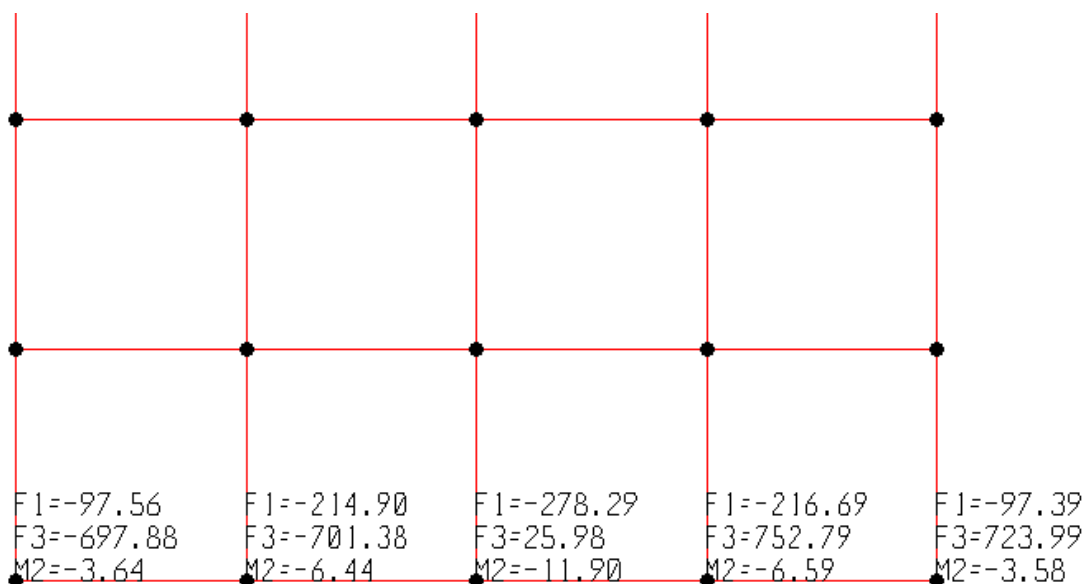
Πολυμεσικό Αντικείμενο 7.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει παραστατικά την εικόνα της παραμόρφωσης του φορέα για τον σεισμικό συνδυασμό δράσης SEISMIC +. Σημειώνεται πως η πλήρης κίνηση που εμφανίζεται δεν είναι ακριβής, καθώς στον συγκεκριμένο συνδυασμό δρουν στην πραγματικότητα φορτία προς τη μια μόνο κατεύθυνση, γίνεται όμως εύκολα αντιληπτή η αποτελεσματική σύνδεση των δοκών στο τοίχωμα μέσω βοηθητικών γραμμικών στοιχείων.</p>	

7.4.2. Αντιδράσεις στις στηρίξεις

Για την εμφάνιση των αντιδράσεων στήριξης του φορέα (*Display* → *Show Forces/Stresses* → *Joints*), επιλέγεται η **2d** όψη του και ζητείται διαδοχικά η εμφάνιση με και χωρίς την επιλογή *Show Results as Arrows* για το συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+** (φορτία **G+0.3Q+E**). Τα αποτελέσματα για τις δυο εναλλακτικές μορφές απεικόνισης, εστιάζοντας στη βάση του τοιχώματος, φαίνονται στα Σχήματα 7.12 και 7.13. Σημειώνεται πως αρνητική τιμή της **M2** στη στήριξη σημαίνει αριστερόστροφη φορά της ροπής κάμψης.



Σχήμα 7.12 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με παράθεση τιμών σε 2d απεικόνιση (ενεργό *Show Results as Arrows*) για συνδυασμό φόρτισης **SEISMIC+** (φορτία **G+0.3Q+E**).



Σχήμα 7.13 Αντιδράσεις στις στηρίξεις με παράθεση τιμών σε 2d απεικόνιση (ανενεργό Show Results as Arrows) για συνδυασμό φόρτισης SEISMIC+ (φορτία G+0.3Q+E).

Για την εξαγωγή της ροπής που παραλαμβάνεται στη βάση του τοιχώματος, θα πρέπει να γίνει ολοκλήρωση των τάσεων που αναπτύσσονται στα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Μια εναλλακτική προσέγγιση υπολογισμού μπορεί να γίνει με τις αντιδράσεις στις στηρίξεις του τοιχώματος, ολοκληρώνοντας ως προς το κέντρο του, σύμφωνα με τη σχέση (λαμβάνεται δεξιόστροφη φορά θετική, βάση του προσανατολισμού του άξονα Y):

$$M_{\text{τοιχ}} = (-697.88) \cdot 1.0 + (-701.38) \cdot 0.5 - 752.79 \cdot 0.5 - 723.99 \cdot 1.0 - 3.64 - 6.44 - 11.90 - 6.59 - 3.58 = -2181.11 \text{ kNm} \quad (7.1)$$

Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή της τέμνουσας που παραλαμβάνει το τοίχωμα:

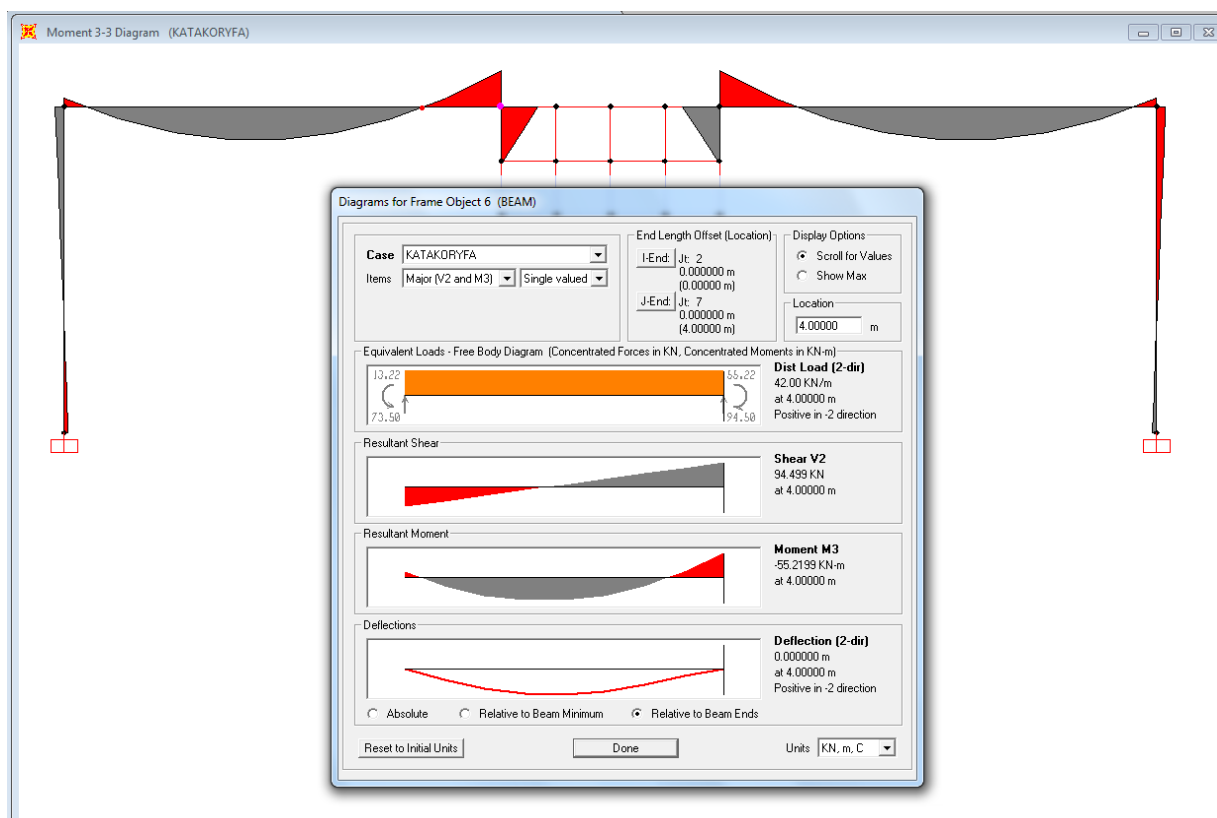
$$V_{\text{τοιχ}} = -97.56 - 214.90 - 278.29 - 216.69 - 97.39 = -904.83 \text{ kN} \quad (7.2)$$

7.4.3. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εμφανίζονται από την εντολή *Display* → *Show Forces/stresses* → *Frames/Cables*. Επιλέγεται η εμφάνιση του διαγράμματος καμπτικών ροπών *Moment 3-3* για τον συνδυασμό φόρτισης *KATAKORYFA (1.35G+1.50Q)*, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.14. Το τμήμα του διαγράμματος ροπών που εμφανίζεται πάνω στο βοηθητικό κατακόρυφο στοιχείο σύνδεσης δεν έχει κάποια φυσική σημασία και αγνοείται. Στη λεπτομέρεια εμφανίζεται η ροπή στο άκρο της αριστερά δοκού, στο σημείο σύνδεσης με το στερεό βραχίονα.

7.4.4. Πινακοποιημένα αποτελέσματα και αξιολόγηση

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του τοιχώματος με επιφανειακά στοιχεία, συγκρινόμενα με αυτά του προηγούμενου Κεφαλαίου όπου το ίδιο τοίχωμα είχε προσομοιωθεί με γραμμικά στοιχεία. Παρατηρείται πως τα δυο προσομοιώματα είναι πρακτικά ισοδύναμα, εμφανίζοντας πολύ μικρές διαφορές στα επιλεγμένα εντατικά μεγέθη. Η μοναδική περίπτωση όπου εμφανίζεται μια μεγαλύτερη διαφορά, της τάξης του 28%, αφορά τη ροπή για κατακόρυφο συνδυασμό φορτίων στο άκρο της δοκού στη σύνδεση με το τοίχωμα, η οποία σχολιάστηκε σχετικά στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Η εναλλακτική προσομοίωση της διατομής του βραχίονα που επιχειρήθηκε στο Κεφάλαιο 6, με την ονομασία Στερεός βραχίονας Β (Πίνακας 6.1), διαπιστώνεται πως δίνει αποτελέσματα στο άκρο της δοκού που βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με την προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία.



Σχήμα 7.14 Διάγραμμα ροπών για συνδυασμό φόρτισης KATAKORYFA (1.35G+1.50Q).

Μέγεθος	Μετακίνηση κόμβου (G+0.3Q+E)	Ροπή βάσης τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Τέμνουσα βάσης τοιχώματος (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (G+0.3Q+E)	Ροπή άκρου δοκού (1.35G+1.5Q)
Γραμμικά στοιχεία	0.00333m	-2145.05kNm	-901.16kN	-249.99kNm	-77.04kNm
Επιφανειακά στοιχεία	0.00318m	-2181.11kNm	-904.83kN	-228.60kNm	-55.22kNm
Απόκλιση	4.50%	1.68%	0.41%	8.56%	28.32%

Πίνακας 7.1 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης για προσομοίωση του τοιχώματος με γραμμικά και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 7^{ου} Κεφαλαίου

Computers and Structures, Inc. (2010). *CSI analysis reference manual for SAP2000, ETABS and SAFE*. Berkeley, California, USA.

Computers and Structures, Inc. (n.d.). *Modeling cracked section properties for shear wall and slab*. CSI Knowledge Base. Retrieved from <https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Modeling+cracked+section+properties+for+shear+wall+and+slab>

Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.

Ξενίδης, Χ., Αβραμίδης, Ι., & Τριαματάκη, Μ. (1998). Συγκριτική αξιολόγηση απλοποιημένων προσομοιωμάτων για πυρήνες κτιρίων Ο/Σ υπό στατική και δυναμική φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του ΤΕΕ*, 1,18(3), 9-25.

Προσομοίωση πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 8, παρουσιάζεται η προσομοίωση πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων σε δυο διακριτές περιπτώσεις: α) στην περίπτωση υπολογισμού εντατικών μεγεθών της πλάκας και β) στην περίπτωση προσομοίωσης της διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: λειτουργία, καταπόνηση και εντατικά μεγέθη πλάκας ορόφου, μόρφωση και ιδιότητες επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για προσομοίωση πλάκας ορόφου, προσομοίωση διαφραγματικής λειτουργίας πλακών μη κανονικού σχήματος, προσομοίωση δοκών κατά τη χρήση επιφανειακών στοιχείων πλάκας, σύνδεση επιφανειακών με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία.

Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις συμπεριφοράς επιφανειακών φορέων οπλισμένου σκυροδέματος και ικανότητα ανάγνωσης και κατανόησης σχετικών επιστημονικών κειμένων, όπως και πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

8.1. Δεδομένα παραδείγματος Α: Υπολογισμός καμπτικών ροπών πλάκας με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Ζητείται ο υπολογισμός των καμπτικών ροπών πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος για το ίδιο βάρος της, μέσω προσομοίωσης με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση με την κλασική μέθοδο προσδιορισμού από πίνακες Czerny:

- Για πλάκα με συνθήκες στήριξης ελεύθερης έδρασης στην περίμετρο.
- Για πλάκα με συνθήκες στήριξης πάκτωσης στην περίμετρο.

Να ληφθεί υπόψη πλάκα πάχους 0.2m και διαστάσεων 5.1x3.0m, ειδικό βάρος για το σκυρόδεμα $\gamma=25\text{kN/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E=2.8\cdot 10^7\text{ kPa}$ και λόγος Poisson=0.0.

8.1.1. Υπολογισμός ροπών πλάκας με τυποποιημένη διαδικασία

Το κατανεμημένο φορτίο της πλάκας πάχους 0.2m υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το ειδικό βάρος του σκυροδέματος, οπότε προκύπτει τιμή ίση με 5.0kN/m^2 . Για τον απλοποιημένο προσδιορισμό των ροπών της

πλάκας θα χρησιμοποιηθούν οι πίνακες Czerny (1970) που βασίζονται στη θεωρία της ελαστικότητας και θεωρώντας μηδενική τιμή λόγου Poisson. Ο λόγος των πλευρών της πλάκας ισούται με $5.1/3.0=1.7$ (μεγάλη προς μικρή πλευρά), άρα από τους πίνακες Czerny λαμβάνονται τα εξής:

Πλάκα με συνθήκες στήριξης ελεύθερης έδρασης στην περίμετρο (ροπές ανοίγματος):

$$m_{x,m} = \frac{\rho \cdot l_x^2}{11.9} = \frac{5 \cdot 3^2}{11.9} = 3.78 \text{ KNm} \quad (8.1)$$

$$m_{y,max} = \frac{\rho \cdot l_x^2}{37.3} = \frac{5 \cdot 3^2}{37.3} = 1.21 \text{ KNm} \quad (8.2)$$

Πλάκα με συνθήκες στήριξης πάκτωσης στην περίμετρο (ροπές ανοίγματος και στήριξης):

$$m_{x,m} = \frac{\rho \cdot l_x^2}{26.9} = \frac{5 \cdot 3^2}{26.9} = 1.67 \text{ KNm} \quad (8.3)$$

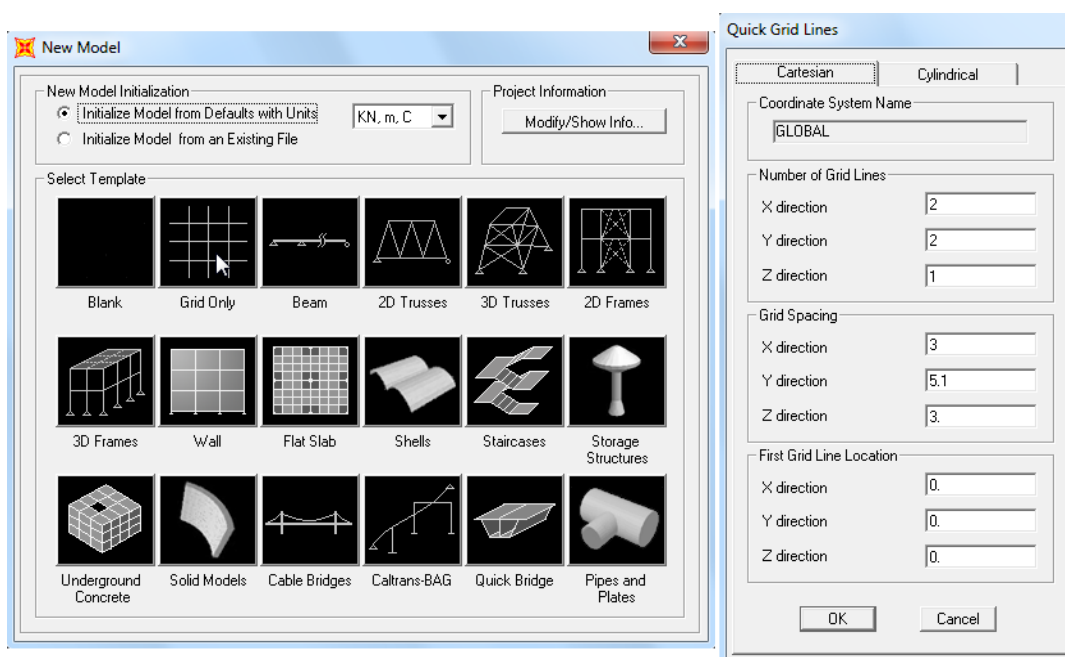
$$m_{y,max} = \frac{\rho \cdot l_x^2}{101.3} = \frac{5 \cdot 3^2}{101.3} = 0.44 \text{ KNm} \quad (8.4)$$

$$m_{x,erm} = -\frac{\rho \cdot l_x^2}{12.5} = -\frac{5 \cdot 3^2}{12.5} = -3.60 \text{ KNm} \quad (8.5)$$

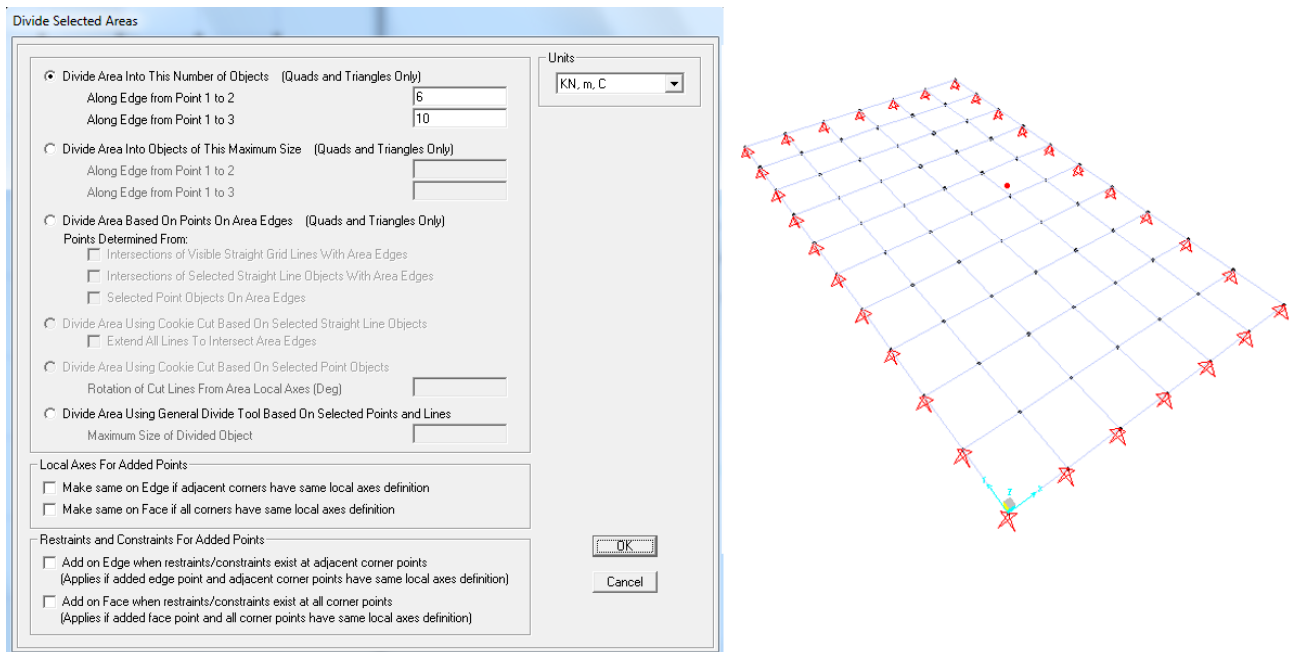
$$m_{y,erm} = -\frac{\rho \cdot l_x^2}{17.5} = -\frac{5 \cdot 3^2}{17.5} = -2.57 \text{ KNm} \quad (8.6)$$

8.1.2. Προσομοίωση και ανάλυση πλάκας με συνθήκες στήριξης ελεύθερης έδρασης

Για την εισαγωγή της γεωμετρίας της πλάκας, καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχος έτοιμος βοηθητικός φορέας, χρησιμοποιείται πλέγμα βοηθητικών γραμμών που δημιουργείται από την επιλογή *Grid Only* του αρχικού παραθύρου του προγράμματος, σύμφωνα με το Σχήμα 8.1. Σημειώνεται πως είναι απαραίτητη η ύπαρξη έστω μιας βοηθητικής γραμμής *Z*, προκειμένου να οριστεί η κατακόρυφη θέση του επιπέδου *XY* στο οποίο θα σχεδιαστεί ο φορέας. Προφανώς, εφόσον υπάρχει μόνο μια γραμμή *Z*, δεν ορίζεται κάποια απόσταση στην κατακόρυφη έννοια, άρα το πεδίο *Grid Spacing – Z direction* δεν έχει φυσική σημασία.

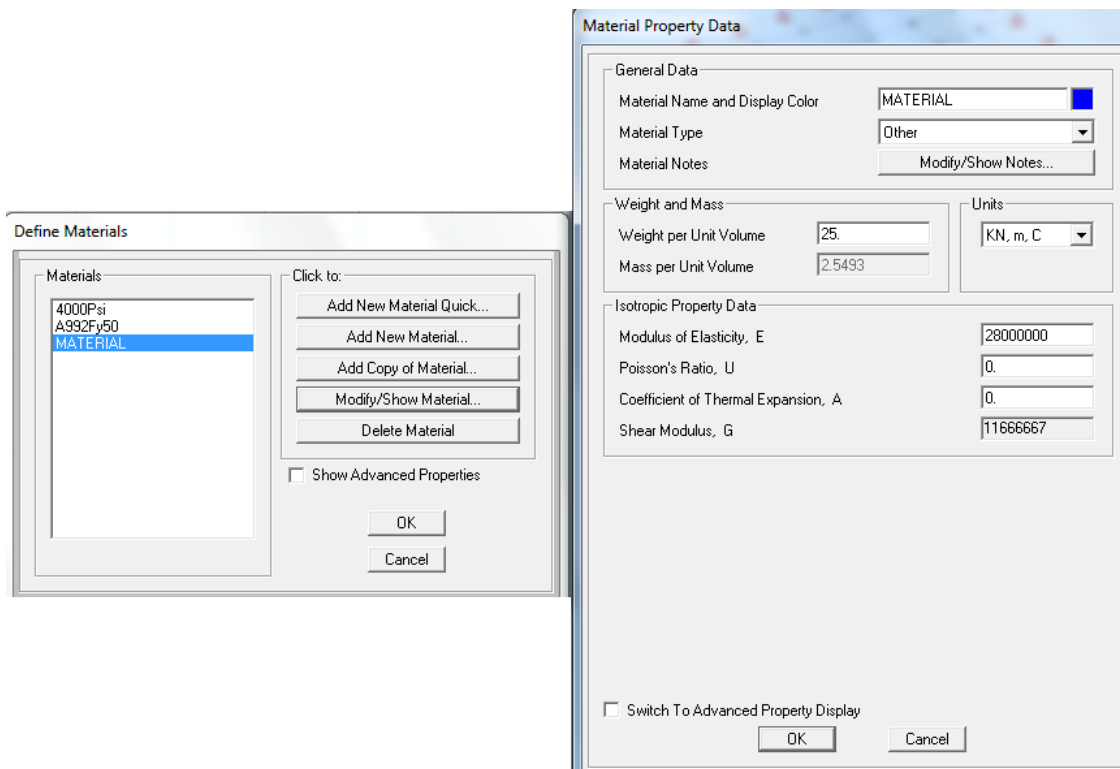


Σχήμα 8.1 Δημιουργία πλέγματος βοηθητικών γραμμών καννάβου για τη σχεδίαση της πλάκας.



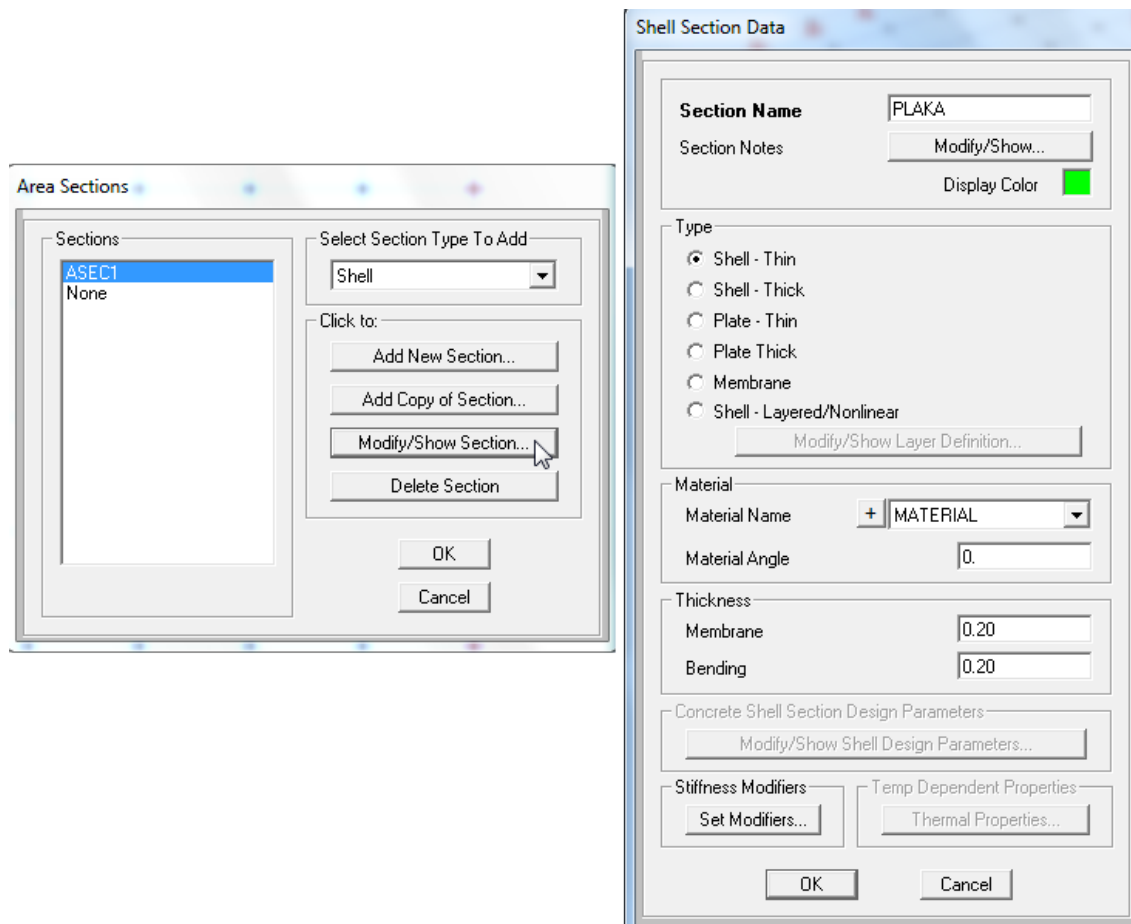
Σχήμα 8.2 Διακριτοποίηση πλάκας σε περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία και ορισμός αρθρώσεων στους περιμετρικούς κόμβους.

Για το υλικό της πλάκας θα δημιουργηθεί ένα νέο υλικό με την ονομασία **MATERIAL**, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες σκυροδέματος που δίνονται στην εκφώνηση σύμφωνα με το Σχήμα 8.3. Σημειώνεται πως το καταναμημένο φορτίο λόγω του ίδιου βάρους της πλάκας μπορεί να δοθεί με δυο τρόπους: (α) κατά τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού, στο πεδίο που δίνεται το ειδικό βάρος (25kN/m^3) και (β) ως εξωτερικά επιβαλλόμενη καταναμημένη φόρτιση 5kN/m^2 , όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια του κεφαλαίου.



Σχήμα 8.3 Δημιουργία νέου υλικού για το οπλισμένο σκυρόδεμα της πλάκας.

Η διατομή των επιφανειακών στοιχείων της πλάκας καθορίζεται από την επιλογή *Define* → *Section Properties* → *Area Sections*, όπου είναι δυνατή είτε η δημιουργία νέας διατομής είτε η τροποποίηση της υφιστάμενης διατομής *ASEC1* σε *PLAKA* (Σχήμα 8.4). Εκεί ορίζεται το πάχος της πλάκας σε κάμψη (καταπόνηση εκτός επιπέδου - *Bending*) και σε δυνάμεις δυστένειας-μεμβράνης (καταπόνηση εντός επιπέδου - *Membrane*), ενώ παράλληλα επιλέγεται και το υλικό που δημιουργήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 8.4 Τροποποίηση υφιστάμενης διατομής επιφανειακού στοιχείου και ορισμός ιδιοτήτων πλάκας.

Συντελεστές απομείωσης ιδιοτήτων για πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος

Η λειτουργία του επιφανειακού πεπερασμένου στοιχείου της πλάκας σε φορέα οπλισμένου σκυροδέματος αφορά τη δυστένεια και τη δυσκαμψία της. Η δυστένεια της πλάκας αφορά την εντός επιπέδου αντίσταση σε παραμόρφωση, και σχετίζεται άμεσα με τη διαφραγματική της λειτουργία. Η δυσκαμψία της πλάκας συμμετέχει εμμέσως στο υπολογιστικό προσομοίωμα, λαμβάνοντας υπόψη το συνεργαζόμενο μήκος πλάκας κατά την κάμψη των δοκών.

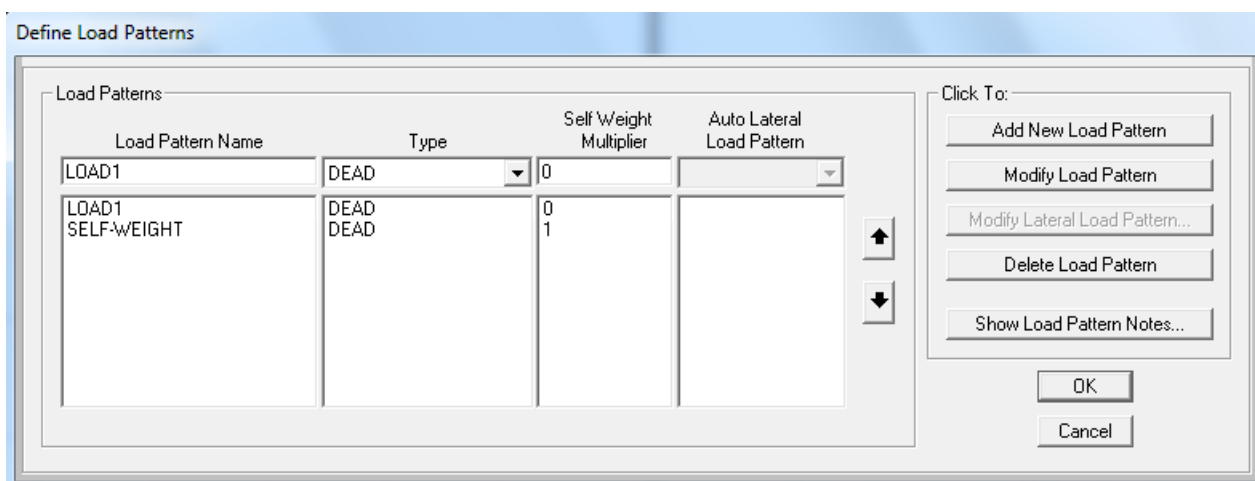
Θεωρητικά η πλάκα δεν αναμένεται να παρουσιάσει ανελαστική παραμόρφωση κατά τη σεισμική απόκριση, αφορά όμως στοιχείο με αμιγώς καμπτική συμπεριφορά υπό κατακόρυφα φορτία. Συνεπώς, η επιλογή συντελεστή απομείωσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δεν είναι σαφής. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις η πλάκα δε συμμετέχει στο υπολογιστικό προσομοίωμα με τη μορφή πεπερασμένων στοιχείων, συνεπώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προβλέψεις για την προσομοίωση της, θα μπορούσε να ακολουθηθεί πιστά η πρόβλεψη του *EC8 §4.3.1(7)*, που αναφέρει την απομείωση στο 50% των ελαστικών καμπτικών και διατμητικών χαρακτηριστικών όλων των φερόντων στοιχείων από σκυροδέμα. Αντίστοιχη πρόβλεψη υπάρχει και στον αμερικάνικο Κανονισμό *ACI 318-11 (§10.10.4.1)*, με απομείωση δυσκαμψίας στο 25% της αρηγμάτωσης διατομής. Αντίθετα, δεν υπάρχει αναφορά για απομείωση της δυστένειας που σχετίζεται με τη διαφραγματική λειτουργία της πλάκας.

Στην παρούσα άσκηση δεν χρησιμοποιούνται συντελεστές απομείωσης γεωμετρικών χαρακτηριστικών της πλάκας, πέραν του συντελεστή Poisson που τίθεται ίσος με μηδέν υπονοώντας ρηγματωμένη διατομή. Καθώς στον φορέα δεν υπάρχει συσχέτιση δυσκαμψίας με άλλα στοιχεία, τυχόν απομείωση της δυσκαμψίας δεν θα επηρέαζε τις τιμές ροπής που προκύπτουν, παρά μόνο τα μεγέθη παραμόρφωσης. Σε κάθε περίπτωση, το συγκεκριμένο θέμα χρίζει περισσότερης εμβάθυνσης και πρέπει να αντιμετωπιστεί αναλόγως με τη λειτουργία της πλάκας που πρόκειται να προσομοιωθεί.

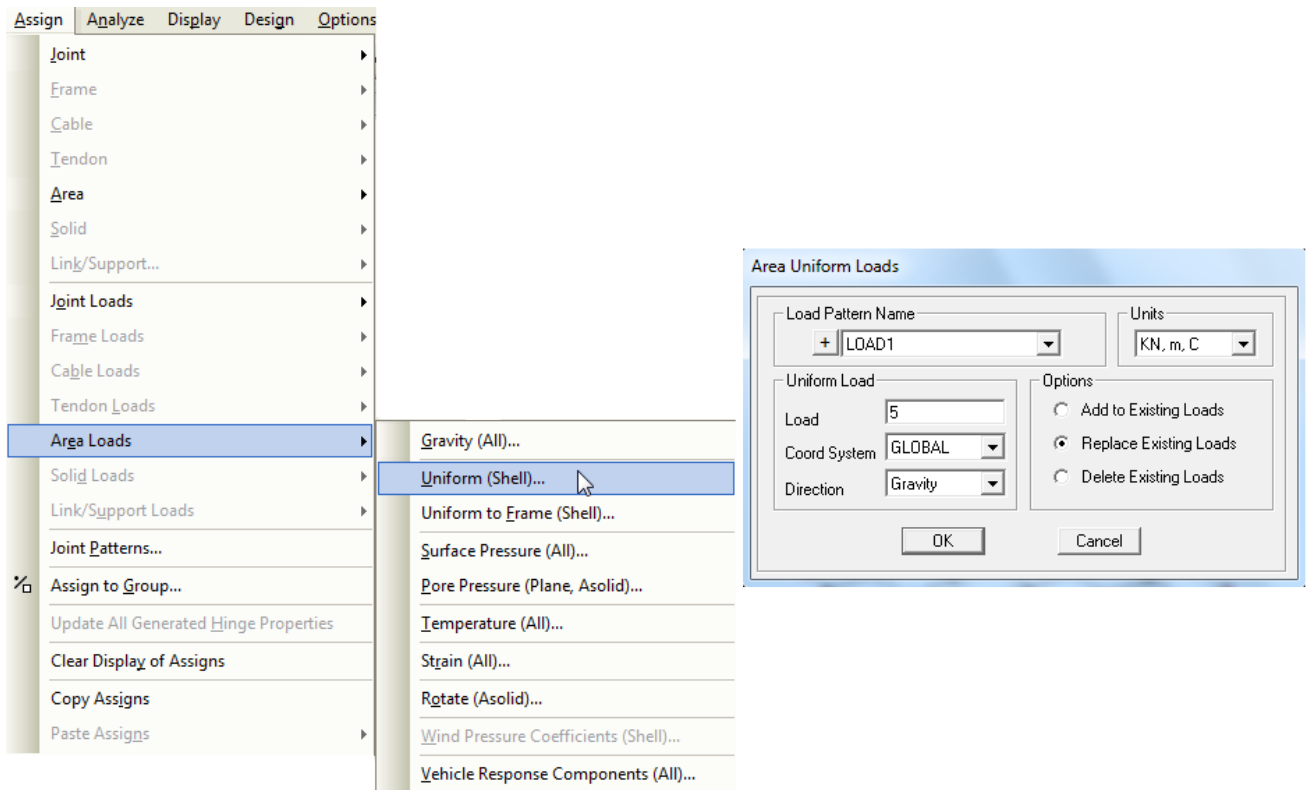
Όπως προαναφέρθηκε, το ειδικό βάρος του υλικού χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ίδιου βάρους της πλάκας. Υπάρχει όμως δυνατότητα το ίδιο βάρος της πλάκας να οριστεί με χρήση εξωτερικού, επιφανειακά κατανεμημένου φορτίου. Για να εξεταστούν και οι δυο εναλλακτικές προσεγγίσεις ορίζονται δυο (2) μορφές φόρτισης (*Define* → *Load Patterns*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5, μια για να ληφθεί υπόψη το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο (*LOAD1*, οπότε δίνεται συντελεστής ίδιου βάρους *0*) και μια για να ληφθεί υπόψη μόνο το ίδιο βάρος της διατομής (*SELF-WEIGHT* όπου δίνεται συντελεστής ίδιου βάρους *1*). Η προϋπάρχουσα μορφή φόρτισης με την ονομασία *DEAD* μπορεί να διαγραφεί. Στη συνέχεια γίνεται και ο έλεγχος του σωστού ορισμού των καταστάσεων ανάλυσης, από την εντολή *Define* → *Load Cases*, σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα παραδείγματα.

Το εξωτερικό κατανεμημένο φορτίο των 5kN/m² ορίζεται αφού επιλεγούν τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία της πλάκας, μέσω της εντολής *Define* → *Area Loads* → *Uniform Shell* στη μορφή φόρτισης *LOAD1* (Σχήμα 8.6).

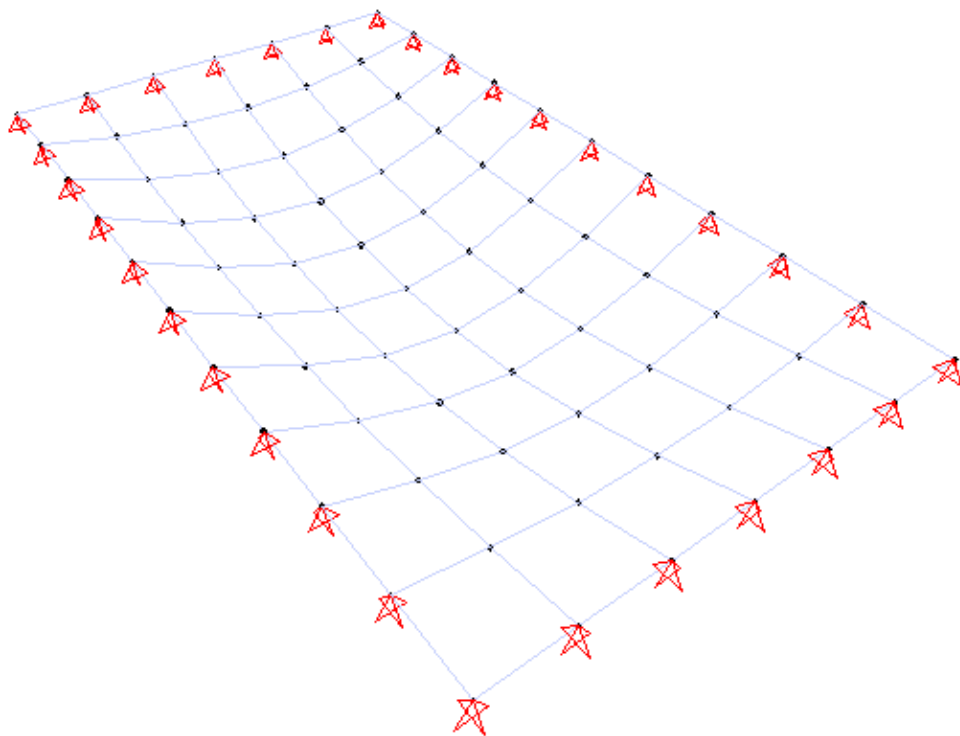
Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*. Από την εντολή *Display* → *Show Deformed Shape*, επιλέγεται η εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής του φορέα για το εξωτερικό φορτίο *LOAD1*, οπότε και εμφανίζεται η παραμόρφωση εκτός επιπέδου της πλάκας (Σχήμα 8.7). Με την επιλογή *Start Animation* εμφανίζεται παραστατικά το βέλος κάμψης της πλάκας εκτός επιπέδου. Ακριβώς ίδια εικόνα θα πρέπει να λαμβάνεται κατά την εμφάνιση της παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα λόγω της μορφή φόρτισης *SELF-WEIGHT*, καθώς η φόρτιση του φορέα είναι ισοδύναμη.



Σχήμα 8.5 Ορισμός μορφών φόρτισης με χρήση ειδικού βάρους υλικού (*SELF-WEIGHT*) ή εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου (*LOAD1*).



Σχήμα 8.6 Ανάθεση εξωτερικού, επιφανειακά κατανεμημένου φορτίου πλάκας στη μορφή φόρτισης LOAD1.

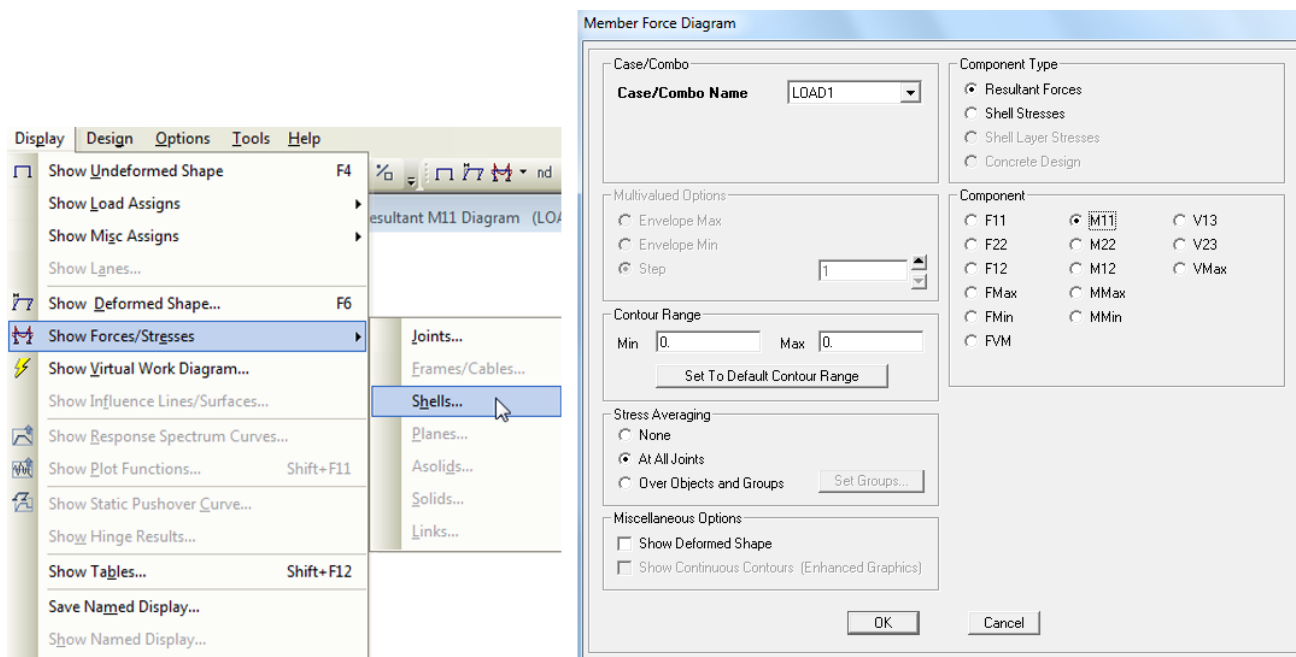


Σχήμα 8.7 Παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα για το εξωτερικό κατανεμημένο φορτίο LOAD1.

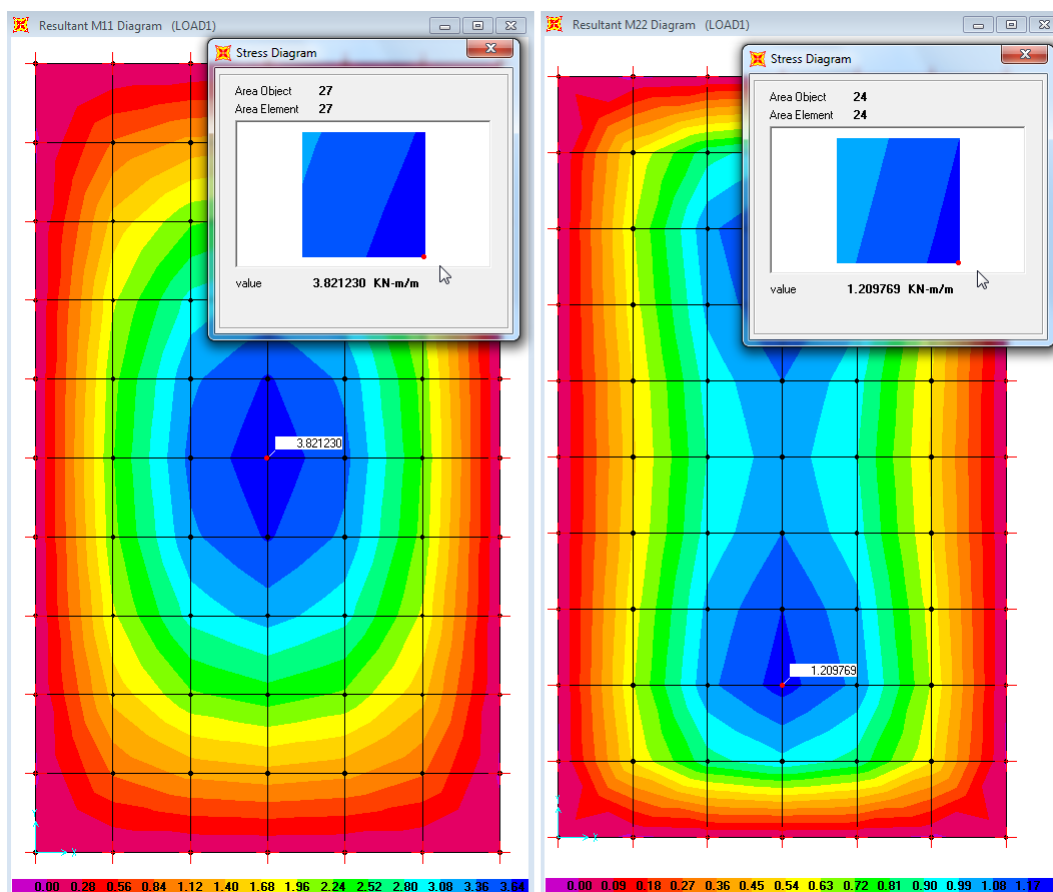
Οι καμπτικές ροπές της πλάκας μπορούν να εμφανιστούν από την εντολή *Display* → *Show Forces/Stresses* → *Shells*. Για την όπλιση κατά *X* επιλέγεται η ροπή *M11* και για την όπλιση κατά *Y* η ροπή *M22* (Σχήμα 8.8), οπότε εμφανίζονται οι εικόνες του Σχήματος 8.9. Σημειώνεται πως η μέγιστη τιμή της *M22* δεν είναι αυτή που εμφανίζεται στο μέσον της πλάκας αλλά σε μικρή απόσταση εκατέρωθεν, με τιμή *1.815kNm*. Η παρατήρηση αυτή συμβαδίζει με την ανάπτυξη των ροπών m_y , όπως εικονίζονται στα σκαριφήματα που συνοδεύουν τους πίνακες Czerzny. Όπως αναμενόταν, στην περίμετρο της πλάκας, η τιμή των καμπτικών ροπών μηδενίζεται σε κάθε διεύθυνση λόγω της αρθρωτής στήριξης.

Βλέποντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη φορτιστική κατάσταση *SELF-WEIGHT*, η οποία δεν περιλαμβάνει εξωτερικά φορτία αλλά μόνο το ίδιο βάρος της κατασκευής, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα είναι ταυτόσημα, κάτι που ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Η μορφή των διαγραμμάτων ροπών που εμφανίστηκαν κατά την ανάλυση με το *SAP 2000* συμβαδίζει με αυτή των σχημάτων που προτάθηκαν από τον Czerzny (1970). Η σύγκριση των τιμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.1, όπου διαπιστώνεται μια σχεδόν απόλυτη συμφωνία μεταξύ των δυο προσεγγίσεων.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης, κυρίως όσον αφορά την ακριβή μορφή μεταβολής των ροπών στα διάφορα σημεία της πλάκας, αναμένεται να διαφοροποιηθούν σε περίπτωση που επιλεγεί πιο αραιή ή πυκνότερη διακριτοποίηση της πλάκας σε επιμέρους επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 8.8 Εμφάνιση καμπτικών ροπών πλάκας κατά *X* (*M11*) για το εξωτερικό φορτίο.



Σχήμα 8.9 Εμφάνιση καμπτικών ροπών πλάκας κατά X ($M11$ -αριστερά) και κατά Y ($M22$ -δεξιά) για το εξωτερικό φορτίο $LOAD1$.

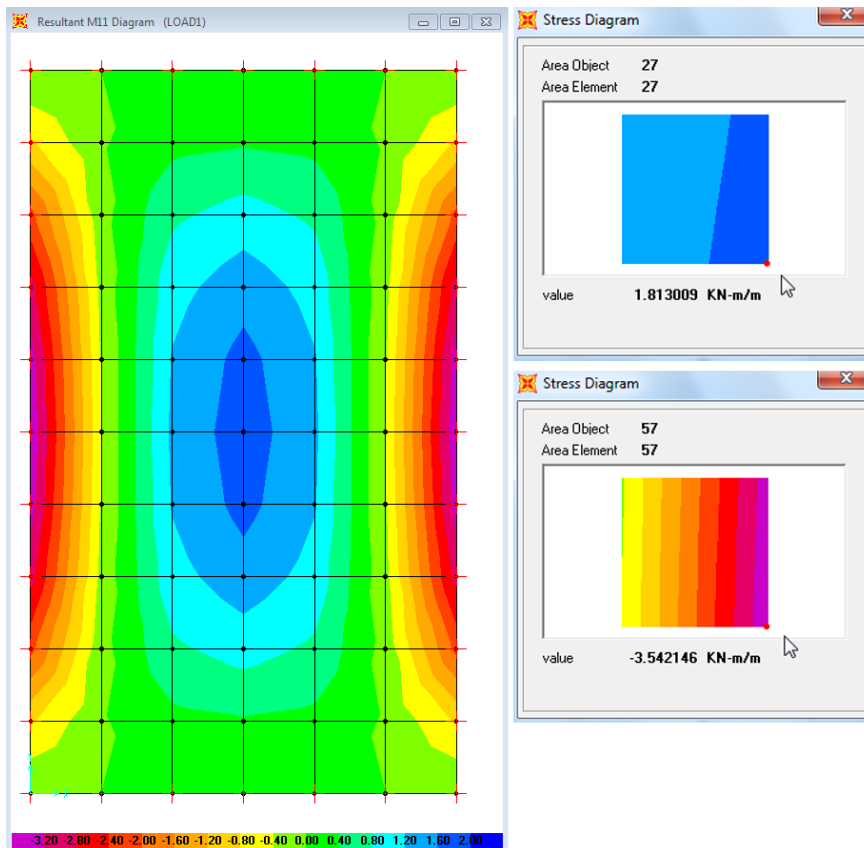
Μέθοδος	$M11=m_{x,m}$	$M22=m_{y,max}$
Πίνακες Czerny	3.78 kNm	1.21 kNm
SAP 2000	3.82 kNm	1.21 kNm
Απόκλιση	1.06%	0.00%

Πίνακας 8.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων ροπών κάμψης πλάκας (απλή έδραση περιμετρικά).

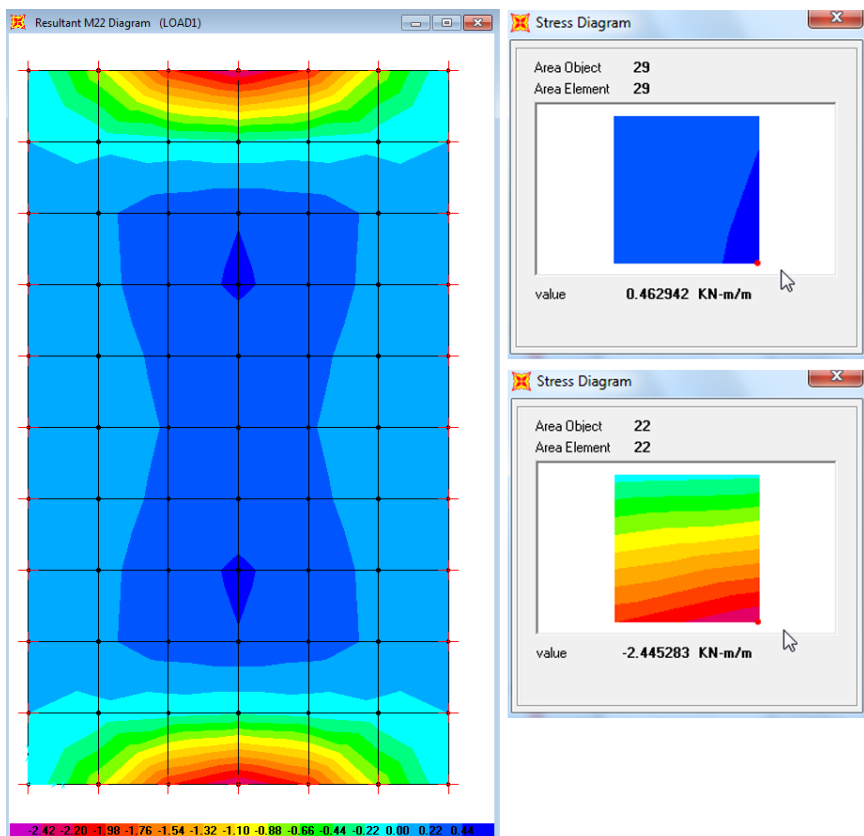
8.1.3. Προσομοίωση και ανάλυση πλάκας με συνθήκες στήριξης πάκτωσης

Για την επίλυση της πλάκας με τις πακτώσεις περιμετρικά, αρκεί η αποθήκευση του αρχείου με διαφορετικό όνομα ως [Chapter 08a2.SDB](#) και στη συνέχεια η μετατροπή του τύπου των στηρίξεων από αρθρώσεις σε πακτώσεις. Ακολουθεί η ανάλυση του προσομοιώματος.

Οι καμπτικές ροπές της πλάκας για την όπλιση κατά X (ροπή $M11$) και για την όπλιση κατά Y (ροπή $M22$) εμφανίζουν πλέον μη μηδενική τιμή στην περίμετρο, λόγω της ύπαρξης πάκτωσης (Σχήματα 8.10 και 8.11 αντίστοιχα). Η μορφή των διαγραμμάτων ροπών που εμφανίζονται κατά την ανάλυση με το [SAP 2000](#) συμβαδίζει με αυτή των σχημάτων που προτάθηκαν από τον Czerny (1970), ενώ η σύγκριση των τιμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.2. Διαπιστώνεται μια γενικά καλή συμφωνία σε όλες τις ροπές, με τη μέγιστη απόκλιση να φτάνει στο 8.38%. Σημειώνεται πως αν η ανάλυση επαναληφθεί με περαιτέρω διακριτοποίηση του κάθε επιφανειακού στοιχείου πλάκας, τα αποτελέσματα συγκλίνουν σχεδόν απόλυτα με αυτά των πινάκων Czerny (ενδεικτική εικόνα στο Σχήμα 8.12 για τη ροπή $M11$ και διακριτοποίηση του κάθε υφιστάμενου επιφανειακού στοιχείου σε 5x5 επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία).



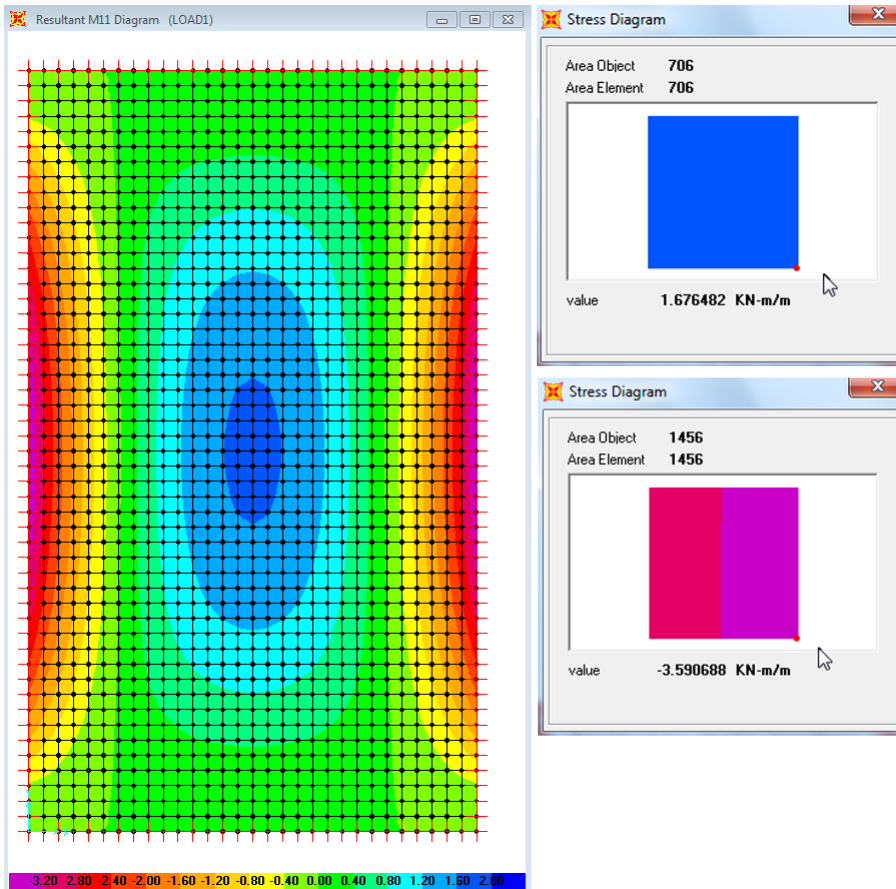
Σχήμα 8.10 Εμφάνιση καμπτικών ροπών πλάκας κατά X (M11) για το εξωτερικό φορτίο LOAD1.



Σχήμα 8.11 Εμφάνιση καμπτικών ροπών πλάκας κατά Y (M22) για το εξωτερικό φορτίο LOAD1 (σημειώνεται πως η μέγιστη τιμή ροπής ανοίγματος που εμφανίζεται στο σχήμα δεν αναπτύσσεται στο μέσον της πλάκας κατά Y).

Μέθοδος	M11= $m_{x,m}$	M22= $m_{y,max}$	M11= $m_{x,erm}$	M22= $m_{y,erm}$
Πίνακες Czerny	1.67 kNm	0.44 kNm	-3.60 kNm	-2.57 kNm
SAP 2000	1.81 kNm	0.46 kNm	-3.54 kNm	-2.45 kNm
Απόκλιση	8.38%	4.55%	1.67%	4.67%

Πίνακας 8.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ροπών κάμψης πλάκας (πάκτωση περιμετρικά).



Σχήμα 8.12 Εμφάνιση καμπτικών ροπών πλάκας κατά X (M11) για το εξωτερικό φορτίο LOAD1 σε προσομοίωμα με πυκνότερη διακριτοποίηση της πλάκας (κάθε υφιστάμενο επιφανειακό στοιχείο σε 5x5 επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία).

8.2. Δεδομένα παραδείγματος Β: Προσομοίωση διαφραγματικής λειτουργίας πλάκας με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

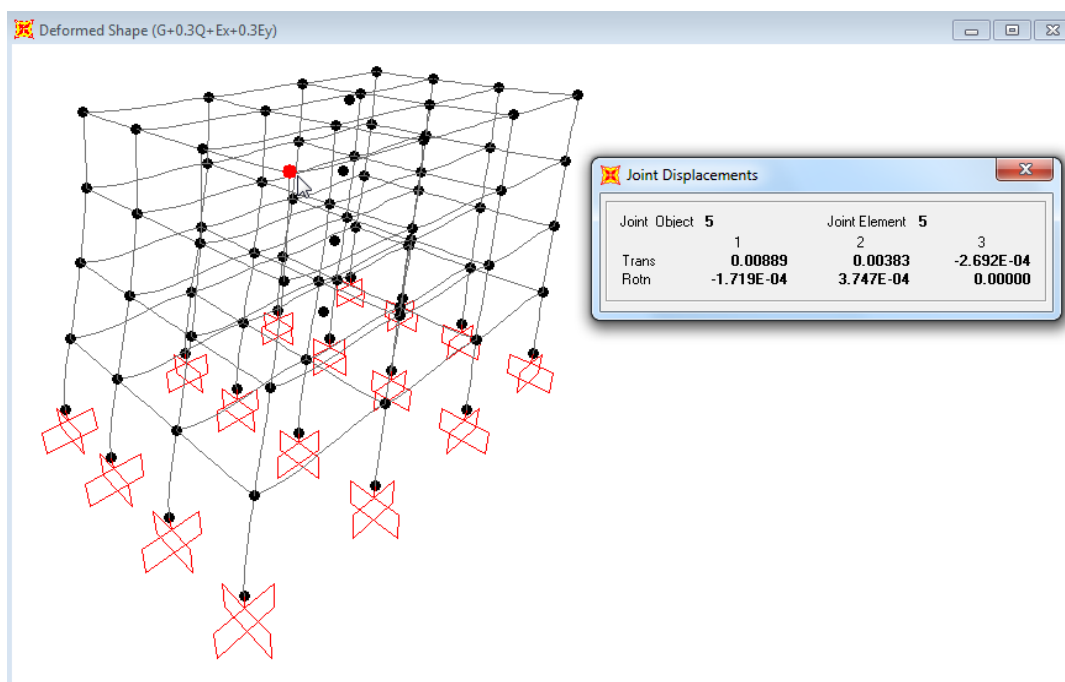
Ζητείται η προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας σε πλάκα ορόφου σπλισμένου σκυροδέματος, με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, στην περίπτωση του φορέα του Κεφαλαίου 5 και ενδεικτική σύγκριση με τα αποτελέσματα της αυτοματοποιημένης διαφραγματικής λειτουργίας του προγράμματος. Να θεωρηθεί πλάκα πάχους 0.15m, με ιδιότητες υλικού όμοιες με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία. Παράλληλα, να υιοθετηθούν ίδιες παραδοχές προσομοίωσης με το παράδειγμα του Κεφαλαίου 5, ώστε η σύγκριση να αφορά ισοδύναμα μοντέλα ανάλυσης.

Προσομοίωση διαφραγματικής λειτουργίας σε πλάκες μη κανονικού σχήματος

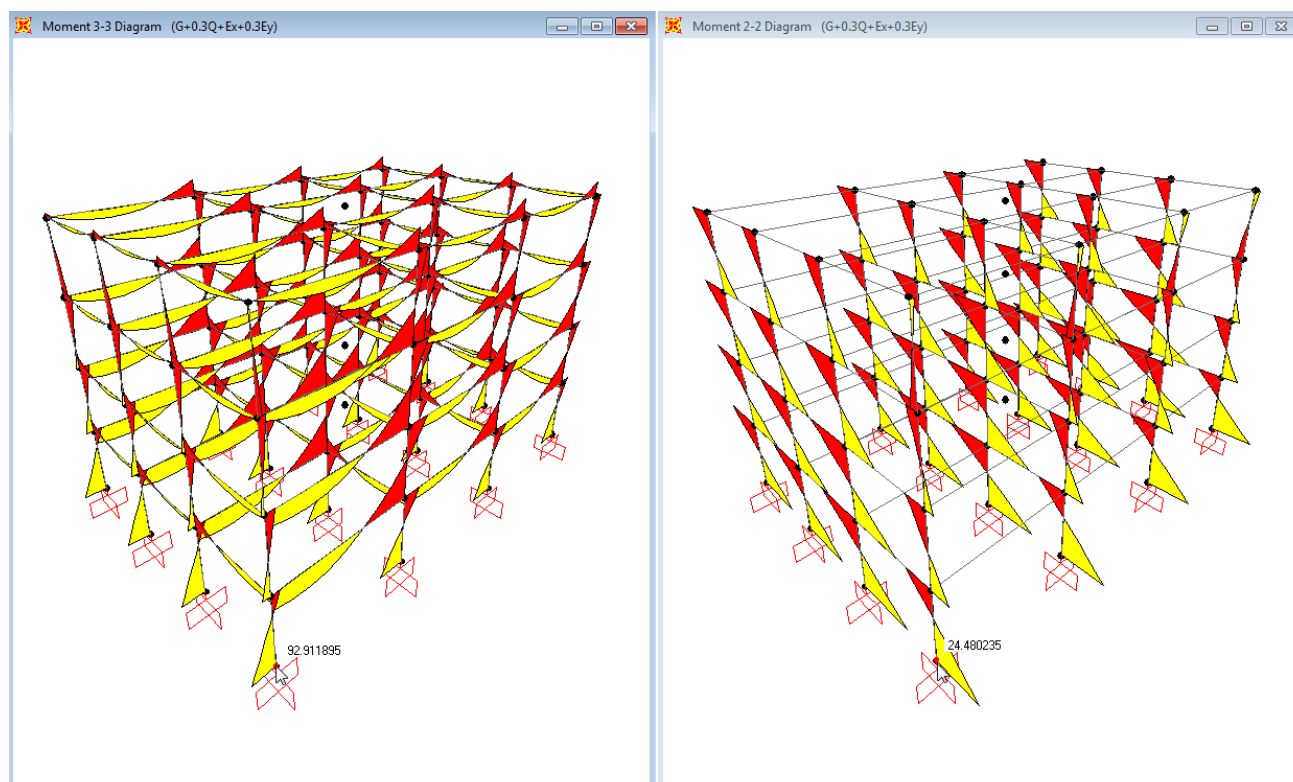
Όπως αναπτύσσεται εκτενώς στη βιβλιογραφία (Αβραμίδης, 2001· Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013) αλλά και στους Κανονισμούς (*EC8 §4.4.2.5 και §5.10· EAK 2000 §3.5.1[4]α και §4.1.7.1α[3]*), η διαφραγματική λειτουργία των πλακών σπλισμένου σκυροδέματος δεν είναι πάντα διασφαλισμένη. Αρκετοί παράγοντες, όπως το πάχος της πλάκας, το σχήμα του ορόφου, τυχόν ανοίγματα στην κάτοψη κτλ μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη διαφραγματική λειτουργία. Στις περιπτώσεις αυτές δεν είναι δυνατή η χρήση των αυτόματων διαφραγμάτων που συνήθως υπάρχουν ενσωματωμένα στα διάφορα λογισμικά. Αντίθετα, απαιτείται ο ορισμός επιμέρους τμημάτων στο επίπεδο του κάθε ορόφου τα οποία ενδέχεται να λειτουργούν ως διαφράγματα ή ορθότερα η χρήση επιφανειακών στοιχείων για την ακριβέστερη προσομοίωση της επιρροής της πλάκας σπλισμένου σκυροδέματος, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

8.2.1. Αποτελέσματα ανάλυσης φορέα με αυτοματοποιημένη διαφραγματική λειτουργία

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών προσομοιωμάτων θα περιοριστεί στην τιμή της μετακίνησης ενός κόμβου οροφής και της ροπής στη βάση ενός υποστυλώματος. Στο Σχήμα 8.13 εικονίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα του Κεφαλαίου 5 για τη φόρτιση $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$, όπως και οι τιμές των μετακινήσεων ενός γωνιακού κόμβου του τελευταίου ορόφου. Οι τιμές της ροπής στη βάση του γωνιακού στύλου για τον ίδιο συνδυασμό φόρτισης φαίνονται στο Σχήμα 8.14.



Σχήμα 8.13 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής φορέα και τιμών μετακίνησης γωνιακού κόμβου κορυφής (αυτοματοποιημένη διαφραγματική λειτουργία πλάκας).



Σχήμα 8.14 Εμφάνιση καμπτικών ροπών στη βάση γωνιακού υποστυλώματος φορέα (αυτοματοποιημένη διαφραγματική λειτουργία πλάκας).

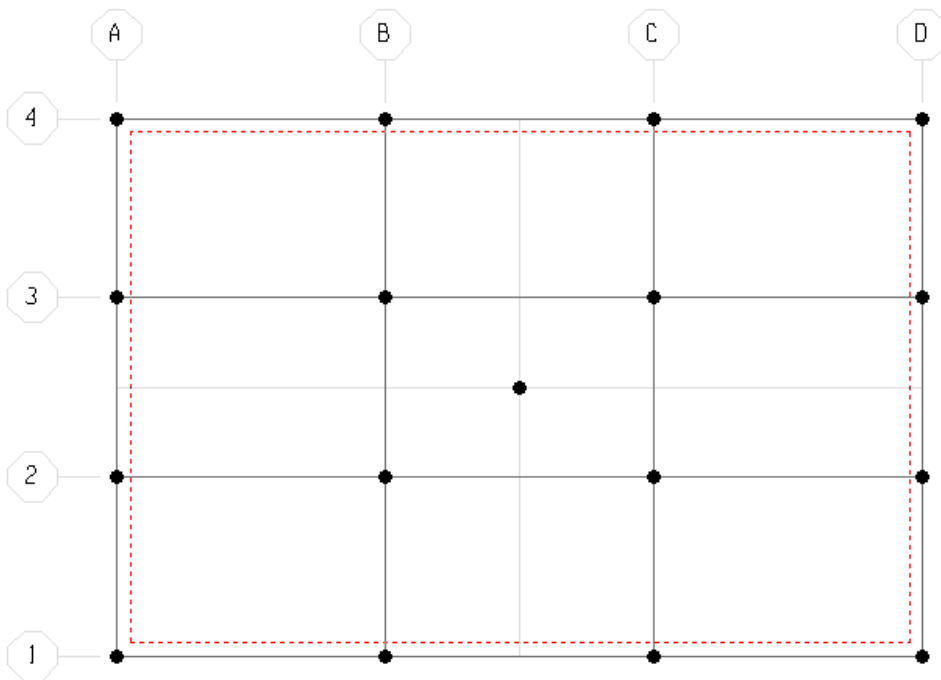
8.2.2. Ανάλυση φορέα με προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας πλάκας με τη χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Για την ανάλυση με προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας μέσω της χρήσης επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, το αρχείο του Κεφαλαίου 5 (*Chapter 05.SDB*) αποθηκεύεται ως *Chapter 08b.SDB*.

Αρχικά γίνεται διαγραφή των υφιστάμενων αυτοματοποιημένων διαφραγμάτων, με την επιλογή ενός τυχαίου κόμβου του φορέα (για την ενεργοποίηση του σχετικού *menu* εντολών) και την εντολή *Assign → Joint → Constraints*, όπου διαγράφονται τα υφιστάμενα διαφράγματα με *Delete Constraint*.

Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των επιφανειακών στοιχείων της πλάκας. Στο επίπεδο του 1ου ορόφου ($Z=3m$, σε όψη xy), σχεδιάζεται ένα ενιαίο επιφανειακό στοιχείο (*Draw → Draw Rectangular Area*) το οποίο καλύπτει όλη την επιφάνεια του ορόφου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.15. Για να δοθεί ορθότερη προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας, θα πρέπει το επιφανειακό στοιχείο να διαιρεθεί σε επιμέρους στοιχεία που θα συνδέονται με τις δοκούς του ορόφου. Σημειώνεται πως επειδή στο παρόν εξετάζεται μόνο η διαφραγματική λειτουργία της πλάκας, δεν απαιτείται ιδιαίτερα πυκνή διακριτοποίηση. Στην περίπτωση που ήταν επιθυμητή και η εξέταση θεμάτων όπως οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές στην πλάκα ή η κατανομή φορτίων από την πλάκα στις δοκούς, θα χρειαζόταν πυκνότερη διακριτοποίηση από αυτήν που υιοθετείται στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Ένας εναλλακτικός τρόπος διακριτοποίησης στοιχείων χρησιμοποιεί το πλέγμα των βοηθητικών γραμμών καννάβου (*Grid*). Αρχικά δημιουργούνται νέες βοηθητικές γραμμές κατά X και κατά Y στις θέσεις στις οποίες πρέπει να διακριτοποιηθεί το επιφανειακό στοιχείο, δηλαδή ανά μέτρο όπως έχει επιλεγεί στην παρούσα περίπτωση. Η αλλαγή του πλέγματος βοηθητικών γραμμών (Σχήμα 8.16) μπορεί να γίνει είτε από την επιλογή *Define → Coordinate Systems/Grids* και στη συνέχεια τροποποίηση του υφιστάμενου πλέγματος *GLOBAL*, είτε με *double click* σε μια υφιστάμενη βοηθητική γραμμή. Η νέα εικόνα του επιπέδου xy με τις βοηθητικές γραμμές που δημιουργήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 8.17.



Σχήμα 8.15 Επιφανειακό πεπερασμένο στοιχείο Shell στο επίπεδο του 1ου ορόφου.

Define Grid System Data

System Name: GLOBAL Units: KN, m, C

Grid Lines: Quick Start...

X Grid Data

Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	-9.	Primary	Show	End	
2	-3.	Primary	Show	End	
3	0.	Primary	Show	Start	
4	3.	Primary	Show	End	
5	9.	Primary	Show	End	
6	-8				
7	-7				
8	-6				

Y Grid Data

Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	-6.	Primary	Show	Start	
2	-2.	Primary	Show	Start	
3	0.	Primary	Show	Start	
4	2.	Primary	Show	Start	
5	6.	Primary	Show	Start	
6	-5				
7	-4				
8	-3				

Z Grid Data

Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	Z1	Primary	Show	End	
2	Z2	Primary	Show	End	
3	Z3	Primary	Show	End	
4	Z4	Primary	Show	End	
5	Z5	Primary	Show	End	
6					
7					
8					

Display Grids as: Ordinate Spacing

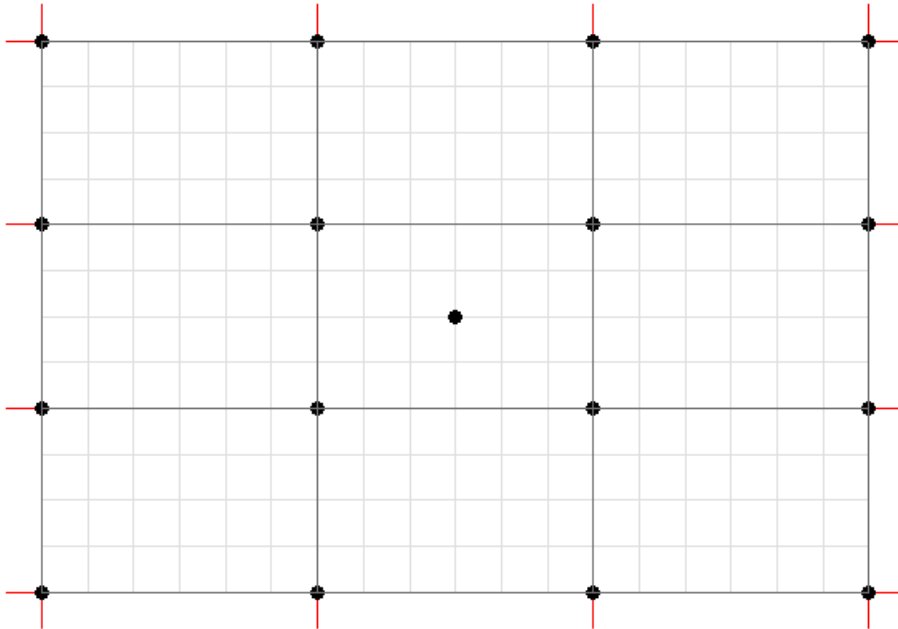
Hide All Grid Lines
 Glue to Grid Lines

Bubble Size: 1.125

Reset to Default Color
 Reorder Ordinates

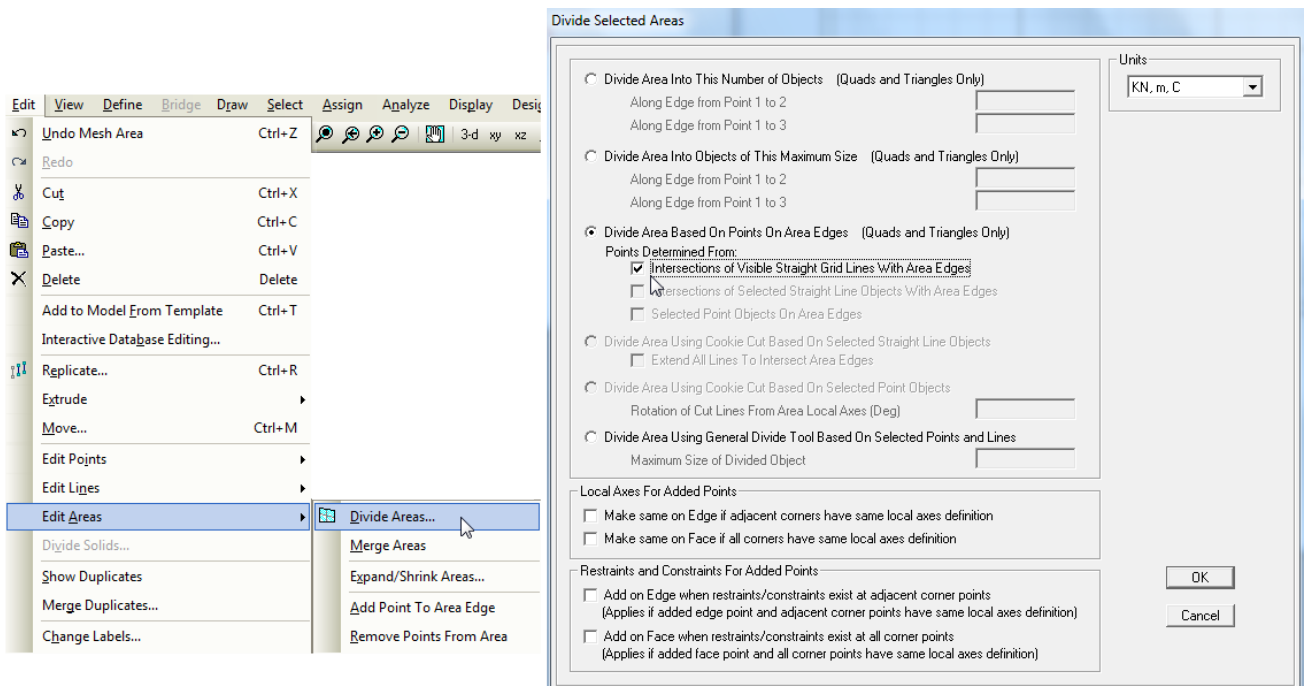
OK Cancel

Σχήμα 8.16 Προσθήκη βοηθητικών γραμμών καννάβου κάτω από τις υφιστάμενες κατά X (ανά μέτρο μεταξύ -9 και +9) και Y (ανά μέτρο μεταξύ -6 και +6).

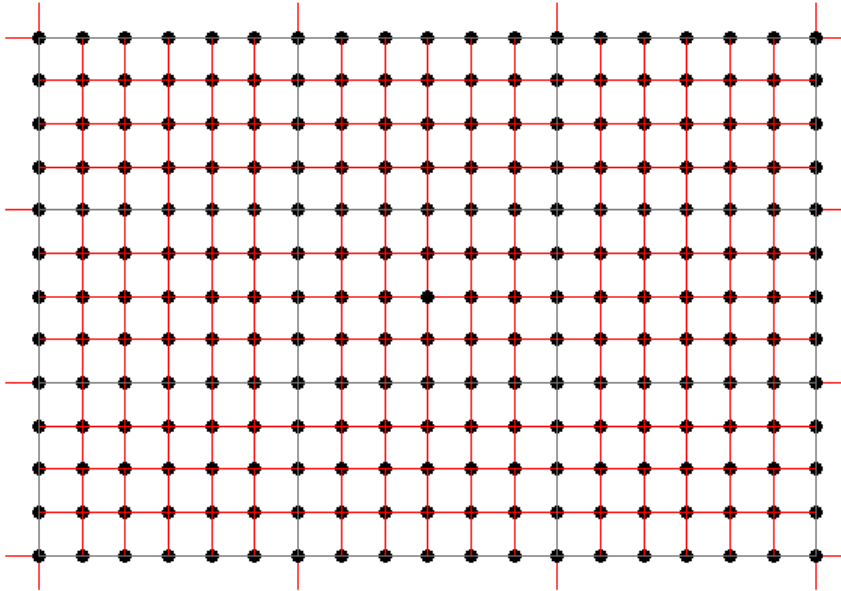


Σχήμα 8.17 Εικόνα του παραθύρου σχεδίασης σε XY με τις νέες βοηθητικές γραμμές.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το επιφανειακό στοιχείο και γίνεται η διακριτοποίηση του σε επιμέρους στοιχεία από την εντολή *Edit → Edit Areas → Divide Areas*, με την επιλογή *Divide Area Based on Points or Area Edges → Intersections of Visible Straight Grid Lines With Area Edges* (Σχήμα 8.18). Η εικόνα του φορέα μετά τη διακριτοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 8.19.

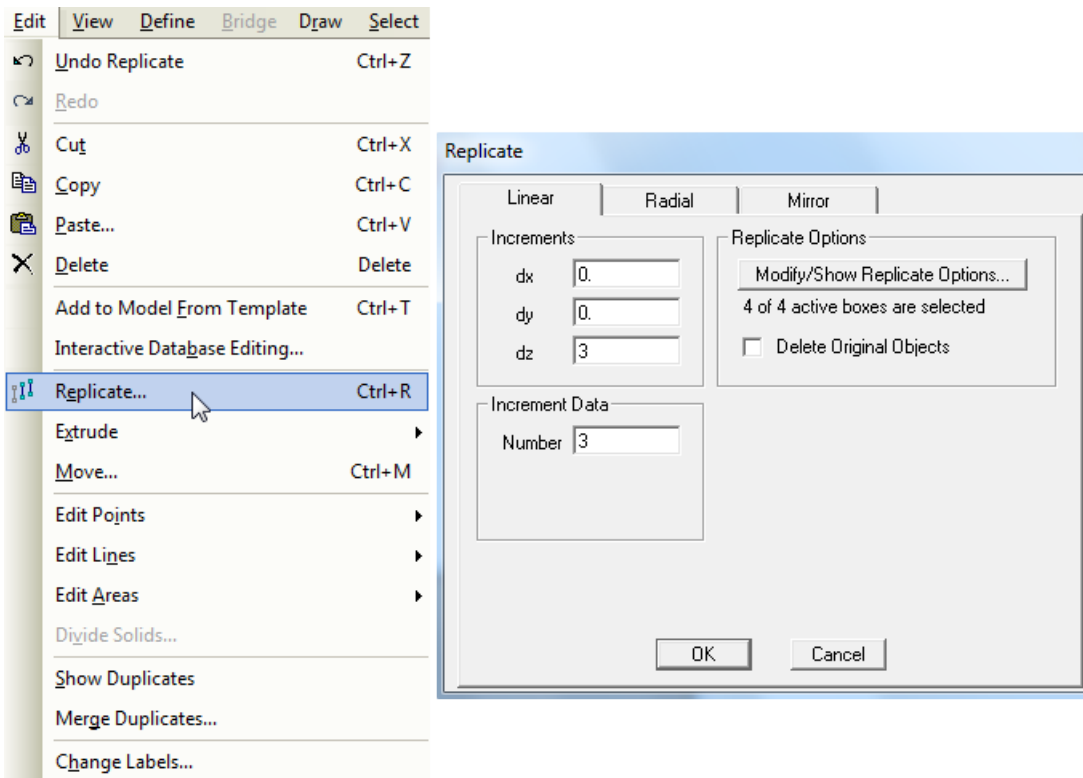


Σχήμα 8.18 Διακριτοποίηση του επιφανειακού στοιχείου με χρήση των βοηθητικών γραμμών καννάβου.

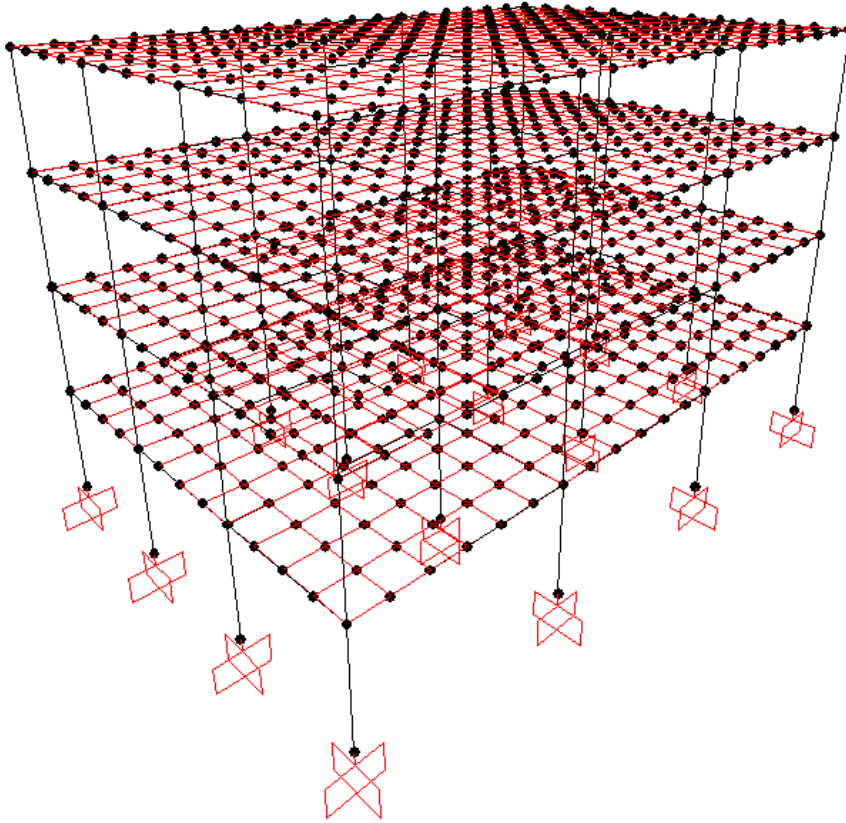


Σχήμα 8.19 Εικόνα του 1^{ου} ορόφου μετά τη διακριτοποίηση του επιφανειακού στοιχείου.

Ακολουθεί η αναπαραγωγή των επιφανειακών στοιχείων στους υπόλοιπους ορόφους. Χρησιμοποιείται για την επιλογή των επιφανειακών στοιχείων η εντολή *Select* → *Select* → *Properties* → *Area Sections (ASEC1)*, ενώ με την εντολή *Edit* → *Replicate* γίνεται αντιγραφή των επιφανειακών στοιχείων στους υπόλοιπους 3 ορόφους που ισαπέχουν μεταξύ τους κατά 3m (Σχήμα 8.20). Η τελική εικόνα του φορέα φαίνεται στο Σχήμα 8.21.



Σχήμα 8.20 Αντιγραφή των επιφανειακών στοιχείων στους υπόλοιπους ορόφους.



Σχήμα 8.21 Τελική εικόνα του φορέα.

Τέλος, απαιτείται ο ορισμός των κατάλληλων ιδιοτήτων για τα επιφανειακά στοιχεία που δημιουργήθηκαν. Από το *Define* → *Section Properties* → *Area Sections*, με τροποποίηση της υπάρχουσας διατομής *ASEC1*, γίνεται μετονομασία σε *PLAKA* και ορίζονται οι κατάλληλες τιμές ιδιοτήτων (πάχος πλάκας 0.15m) όπως και το επιθυμητό υλικό (Σχήμα 8.22). Καθώς η ύπαρξη των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων πλάκας έχει ως στόχο την αναπαραγωγή της διαφραγματικής της λειτουργίας, δίδεται τιμή πάχους μόνο στην ιδιότητα *Membrane* (μεμβράνη) του επιφανειακού στοιχείου. Πράγματι, τυχόν τιμή πάχους στην ιδιότητα *Bending* (κάμψη) θα είχε ως αποτέλεσμα πεπερασμένη τιμή δυσκαμψίας της πλάκας εκτός επιπέδου, άρα θα διαφοροποιούσε τη δυσκαμψία των δοκών με τις οποίες συνδέεται, τροποποιώντας τα δεδομένα της ανάλυσης σε σχέση με τον φορέα του Κεφαλαίου 5.

Συντελεστές απομείωσης ιδιοτήτων για πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος

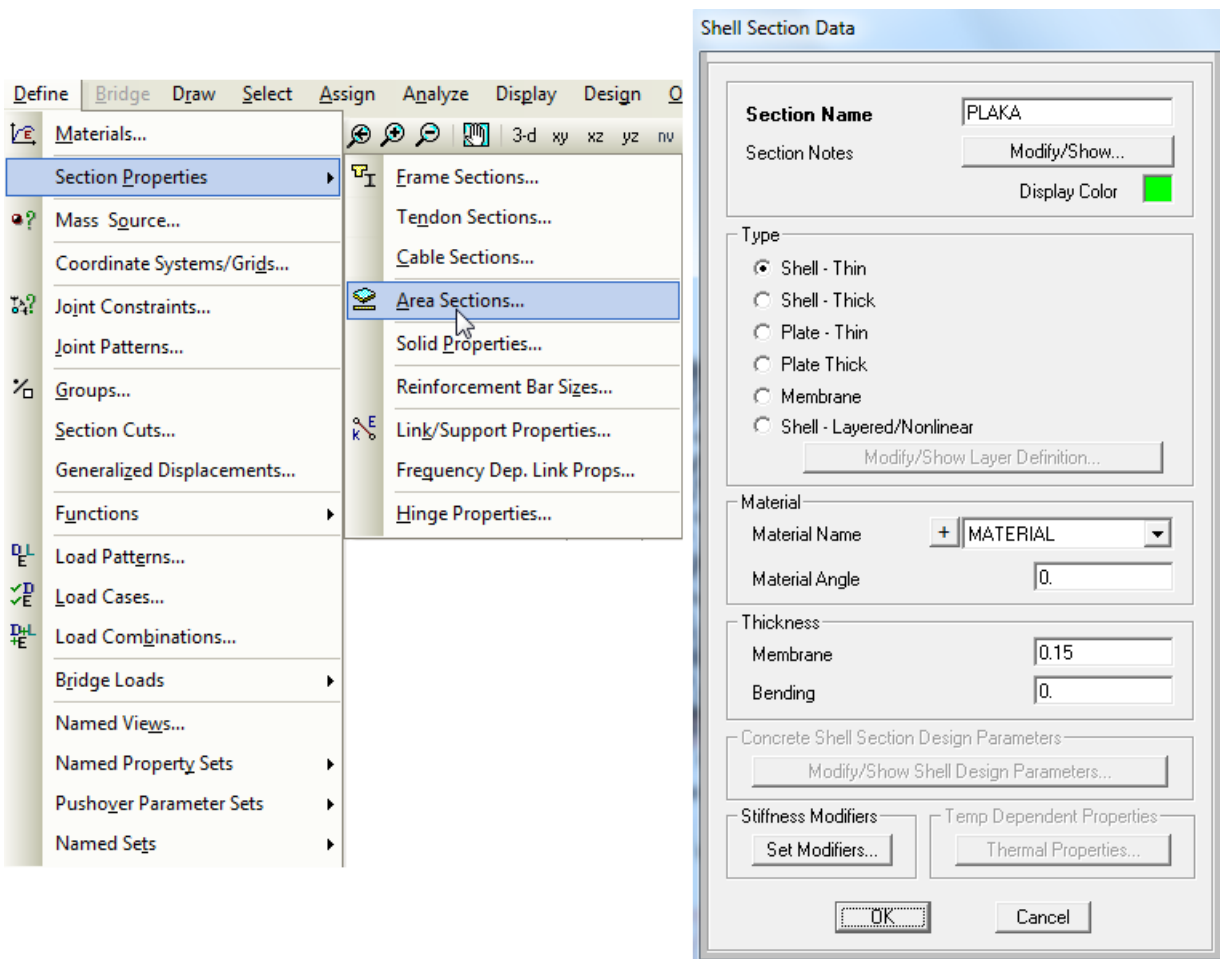
Όπως σημειώθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο του Κεφαλαίου, η πλάκα θεωρείται δομικό στοιχείο που ρηγματώνεται και συνεπώς η δυσκαμψία της θα πρέπει να απομειωθεί καταλλήλως. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς η λειτουργία των επιφανειακών στοιχείων σε κάμψη δεν είναι επιθυμητή, τέθηκε μηδενική τιμή πάχους στη σχετική ιδιότητα της διατομής (*Bending*). Συνεπώς, η απομείωση κάποιου συντελεστή δυσκαμψίας δεν έχει κανένα απολύτως νόημα.

Σημειώνεται πως εάν στόχος της προσομοίωσης είναι η λειτουργία των επιφανειακών στοιχείων και σε κάμψη, πέρα από την αναπαραγωγή της λειτουργίας του διαφράγματος, τότε η τιμή της δυσκαμψίας θα πρέπει να καθοριστεί σύμφωνα με τις επιταγές των Κανονισμών. Παράλληλα, η προσομοίωση των γραμμικών στοιχείων δοκού θα πρέπει πλέον να γίνεται με ορθογωνική διατομή και όχι διατομή πλακοδοκού, καθώς η πρόσθετη δυσκαμψία που προσφέρει το συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας θα υπεισέρχεται εγγενώς στο αριθμητικό προσομοίωμα, μέσω της σύνδεσης των γραμμικών με τα επιφανειακά στοιχεία. Βεβαίως, στην περίπτωση αυτή, η διακριτοποίηση των επιφανειακών στοιχείων θα

πρέπει να είναι αρκούτως πυκνή για την επιτυχή συνεργασία της πλάκας με τη δοκό, τόσο σε επίπεδο μεταφοράς δυσκαμψίας όσο και σε επίπεδο μεταφοράς κατακόρυφων φορτίων από την πλάκα στη δοκό.

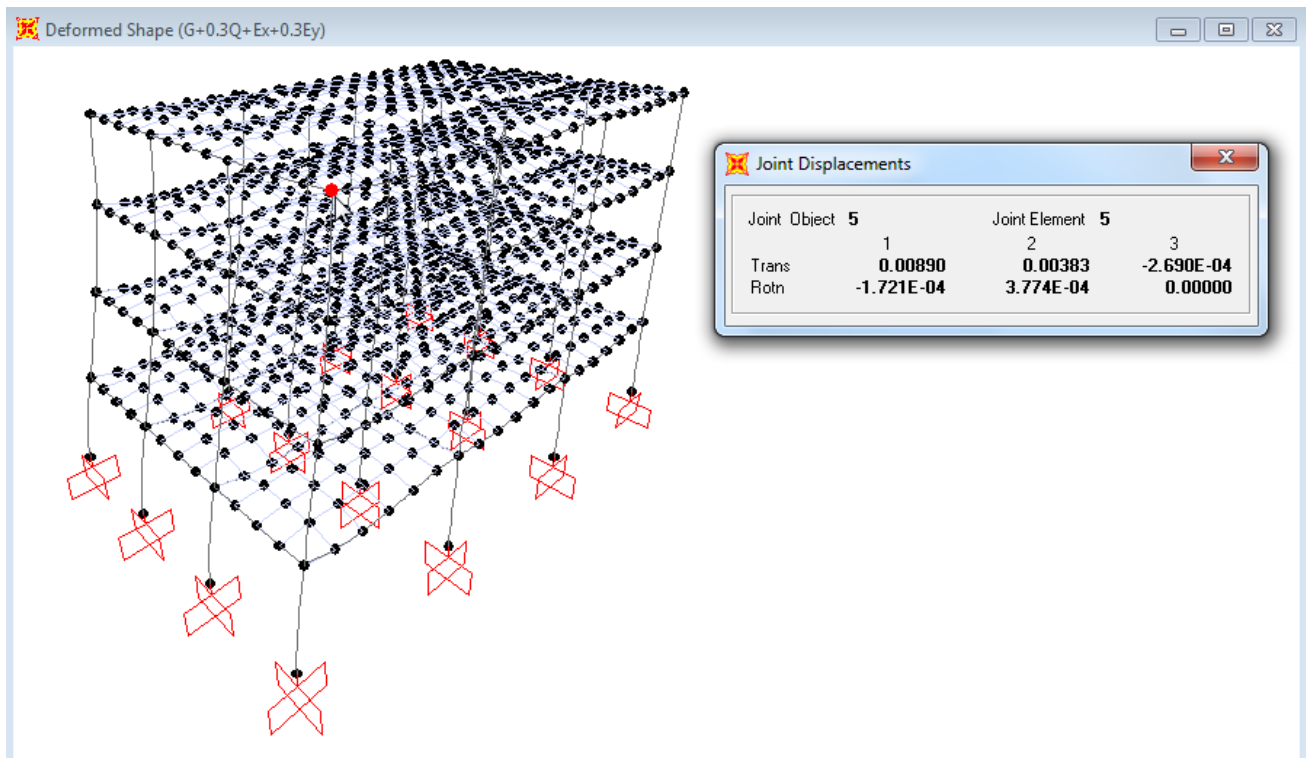
Σύνδεση επιφανειακών με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία

Για την ορθή λειτουργία των επιφανειακών στοιχείων, πρέπει να διασφαλίζεται η σωστή σύνδεση τους με τα γύρω γραμμικά στοιχεία δοκού. Το σημείο αυτό απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ανάλογα με το λογισμικό που χρησιμοποιείται η σύνδεση αυτή μπορεί να γίνεται αυτόματα ή θα πρέπει να οριστεί αναλυτικά από τον χρήστη. Ενδεικτικά σημειώνεται πως σε προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος *SAP 2000*, η ύπαρξη των επιφανειακών στοιχείων που εμφανίζονται στο Σχήμα 8.21 δεν σήμαινε αυτόματα και τη σύνδεση όλων των κόμβων τους με τις γύρω δοκούς, παρά μόνο στα άκρα (υφιστάμενους κόμβους) των δοκών. Για την ορθή προσομοίωση της λειτουργίας των επιφανειακών στοιχείων ο χρήστης ήταν υποχρεωμένος να διακριτοποιήσει και τις δοκούς σε επιμέρους γραμμικά στοιχεία, ώστε να δημιουργήσει κόμβους σε κοινές θέσεις με τους κόμβους των επιφανειακών στοιχείων, για να επιτευχθεί η σύνδεσή τους.

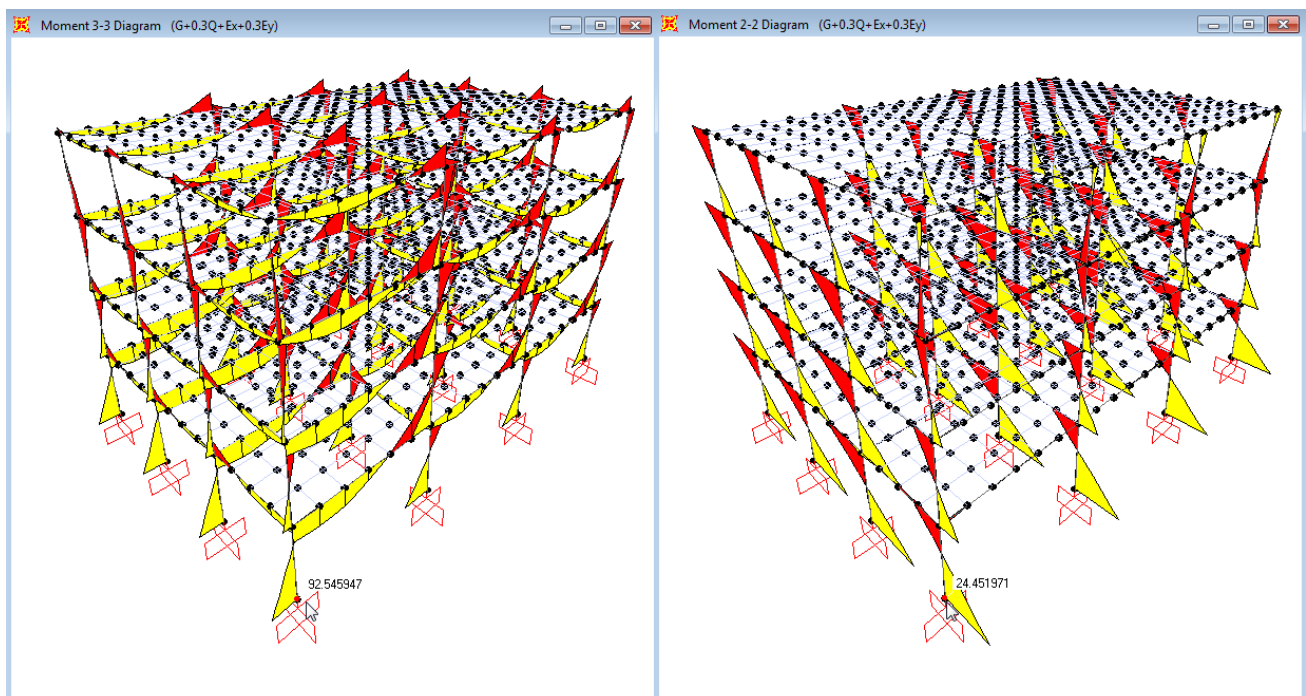


Σχήμα 8.22 Ορισμός ιδιοτήτων για τη διατομή των επιφανειακών στοιχείων πλάκας.

Πλέον ο φορέας είναι έτοιμος προς ανάλυση. Στο Σχήμα 8.23 εικονίζεται η παραμορφωμένη γραμμή του φορέα για τη φόρτιση $G+0.3Q+Ex+0.3Ey$, όπως και οι τιμές των μετακινήσεων του γωνιακού κόμβου του τελευταίου ορόφου. Οι τιμές της ροπής στη βάση του γωνιακού στύλου για τον ίδιο συνδυασμό φόρτισης φαίνονται στο Σχήμα 8.24.



Σχήμα 8.23 Εμφάνιση παραμορφωμένης γραμμής φορέα και τιμών μετακίνησης γωνιακού κόμβου κορυφής (διαφραγματική λειτουργία πλάκας με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων).



Σχήμα 8.24 Εμφάνιση καμπτικών ροπών στη βάση γωνιακού υποστυλώματος φορέα (διαφραγματική λειτουργία πλάκας με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων).

8.2.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ προσομοιωμάτων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, για τα προσομοιώματα αυτοματοποιημένης διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας και χρήσης επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, φαίνεται στον Πίνακα 8.3. Από την ταύτιση των αποτελεσμάτων που εξετάζονται, συμπεραίνεται πως η χρήση των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων αντικατέστησε με επιτυχία την αυτόματη διαφραγματική λειτουργία του προγράμματος.

Μέθοδος	Κόμβος Ux	Κόμβος Uy	Στύλος M33	Στύλος M22
Αυτοματοποιημένο διάφραγμα	0.00889m	0.00383m	92.91 kNm	24.48 kNm
Διαφραγματική λειτουργία με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων	0.00890m	0.00383m	92.55 kNm	24.45 kNm
Απόκλιση	0.11%	0.00%	0.39%	0.12%

Πίνακας 8.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών προσομοιωμάτων διαφραγματικής λειτουργίας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 8^{ου} Κεφαλαίου

American Concrete Institute (2011). *Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and Commentary*. ACI Committee 318.

CEN (2004). *EN 1998–1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.

Czerny, F. (1970). *Tafeln für vierseitig und dreiseitig gelagerte Rechteckplatten: Betonkalender*.

Αβραμίδης, Ι. Ε. (2001). *Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις μεθόδους προσομοίωσης κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Αϊβάζη.

Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

Δυναμική φασματική ανάλυση πολυώροφου χωρικού φορέα

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 9 παρουσιάζεται η προσομοίωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ενός φορέα. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: ακριβείς διαστάσεις δομικών στοιχείων κατά την προσομοίωση, αρίθμηση κόμβων και πεπερασμένων στοιχείων, υπολογισμός συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας, δυσκαμψία δομικών στοιχείων στους κόμβους, υπολογισμός κατακόρυφων φορτίων φορέα, κατανομή κατακόρυφων φορτίων πλακών στις δοκούς, προσομοίωση μάζας φορέα κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση (αδρανειακό προσομοίωμα φορέα), θέση κέντρου μάζας κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση, προσδιορισμός συντελεστή συμπεριφοράς q , παράμετροι υπολογισμού φάσματος σχεδιασμού του EC8, επιρροή τοιχοποιίας πλήρωσης στη σεισμική απόκριση των κατασκευών, προσδιορισμός ιδιομορφών φορέα, δυναμική φασματική ανάλυση φορέα, ανάγνωση πινακοποιημένων αποτελεσμάτων.

Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού και δυναμικής των κατασκευών και ικανότητα ανάγνωσης αντίστοιχων κανονιστικών κειμένων, επανάληψη του παραδείγματος που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 5, όπως και πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

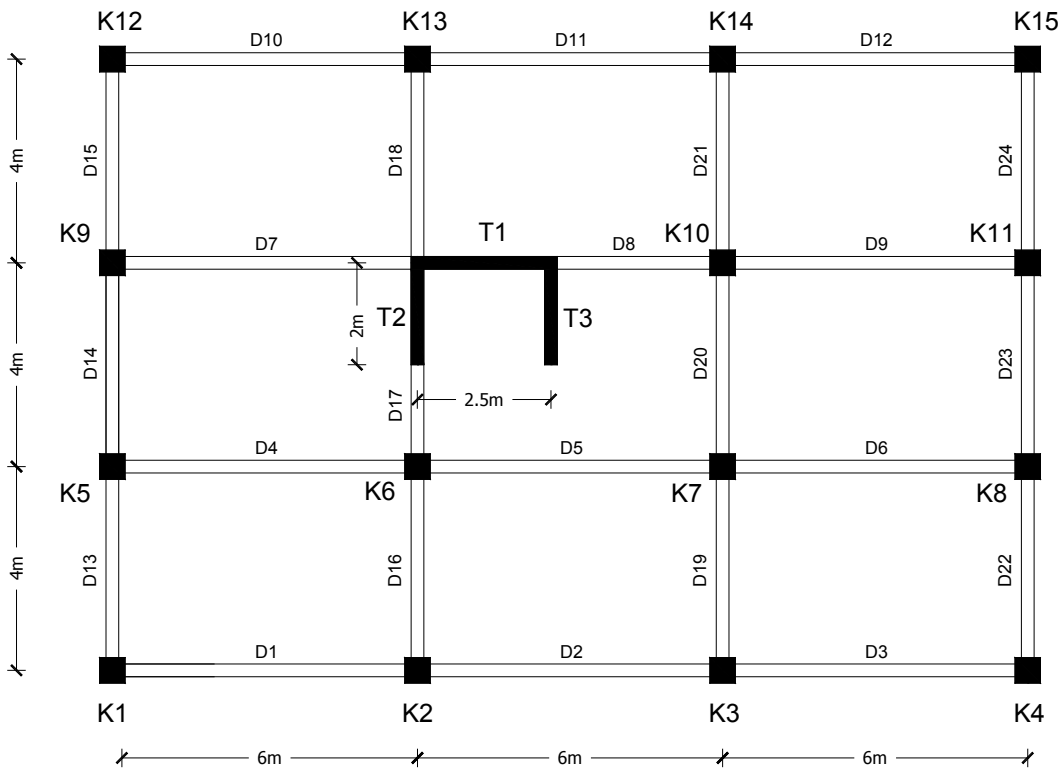
9.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η δυναμική φασματική ανάλυση βάσει του EC8 για τον φορέα του Κεφαλαίου 5 με τις παρακάτω τροποποιήσεις, όπως εικονίζονται στην κάτοψη του Σχήματος 9.1:

(α) Προσθήκη πυρήνα οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 25cm (προσομοίωση με χρήση γραμμικών στοιχείων).

(β) αλλαγή των διατομών πλακοδοκού υπολογίζοντας το συνεργαζόμενο πλάτος βάσει Κανονισμού.

Ο φορέας αφορά κτίριο κατοικιών (με μη συσχετισμένη χρήση μεταξύ των ορόφων), σε περιοχή ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Ι, κατηγορία εδάφους Β και σχεδιασμό για κατηγορία πλαστιμότητας μέση.



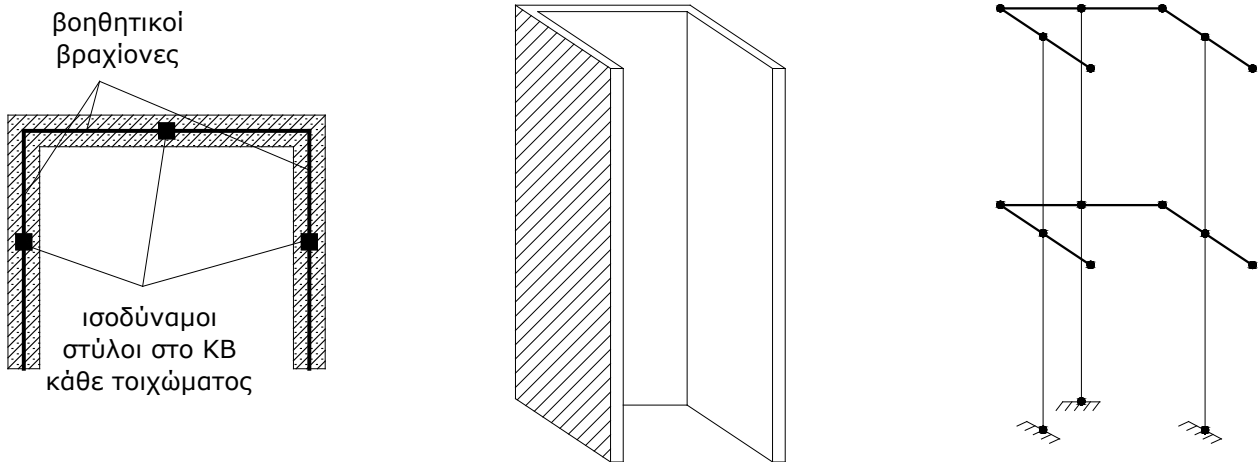
Σχήμα 9.1 Κάτοψη φορέα που εξετάζεται (τροποποίηση φορέα Κεφαλαίου 5).

9.2. Γεωμετρία φορέα

9.2.1. Τροποποίηση γεωμετρίας υφιστάμενου φορέα

Εφόσον η γεωμετρία του νέου φορέα βασίζεται στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 5, αρχικά γίνεται άνοιγμα του συγκεκριμένου αρχείου και αποθήκευση του με διαφορετικό όνομα *Chapter 09.SDB*, ώστε να γίνει η εισαγωγή των νέων δεδομένων.

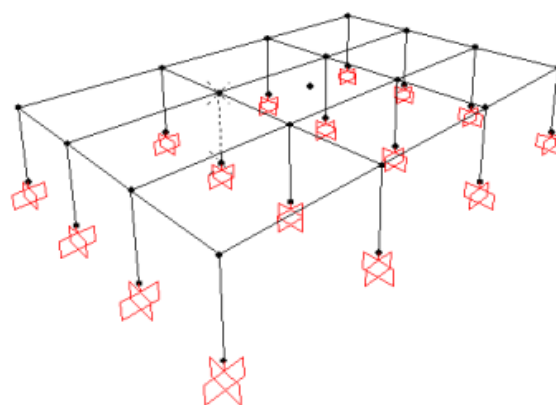
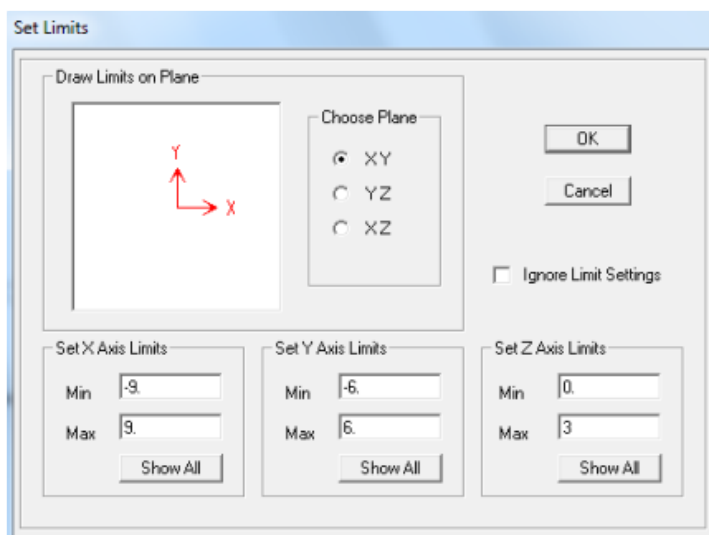
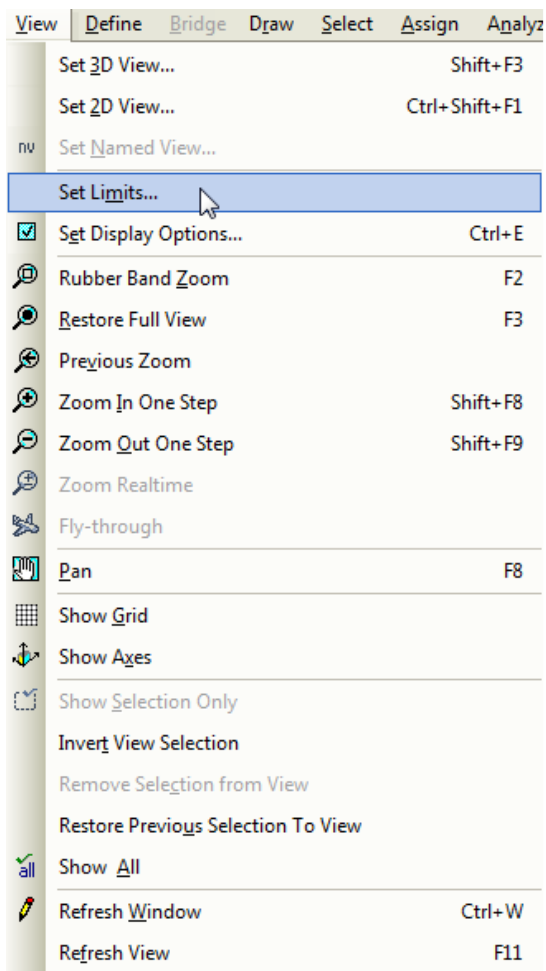
Η βασική τροποποίηση της γεωμετρίας του φορέα σχετίζεται με την ύπαρξη του πυρήνα που αποτελείται από τα τοιχώματα T1-T2-T3. Για την προσομοίωση του πυρήνα απαιτείται η ύπαρξη ενός κατακόρυφου στοιχείου (ισοδύναμος στύλος) και δυο βοηθητικών οριζόντιων τμημάτων (στερεοί βραχίονες) για το κάθε σκέλος τοιχώματος που τον αποτελεί (Σχήμα 9.2). Αναφορά στη θεωρητική προσέγγιση της ισοδύναμης πλαίσιακής προσομοίωσης τοιχωμάτων έχει γίνει στο Κεφάλαιο 6, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την προσομοίωση διατάξεων πυρήνα μπορούν να βρεθούν στους Μορφίδη, Μπαμπούκα και Αβραμίδη (2008) και στους Ξενίδη, Αβραμίδη και Τριαματάκη (1998).



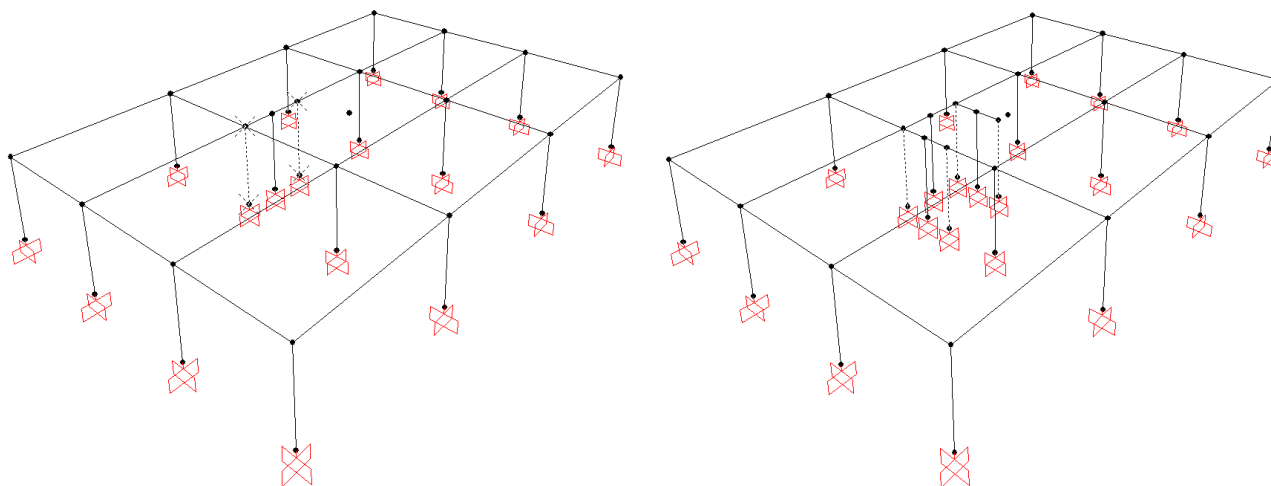
Σχήμα 9.2 Προσομοίωση πυρήνα με χρήση γραμμικών στοιχείων (ισοδύναμη πλαίσιακή προσομοίωση).

Για την προσομοίωση του πυρήνα απαιτείται η δημιουργία ισοδύναμων στύλων και η διακριτοποίηση των δοκών στους βραχίονες στα τμήματα πάνω από τα τοιχώματα. Ένας ενδεικτικός τρόπος για την επίτευξη των παραπάνω είναι ο εξής:

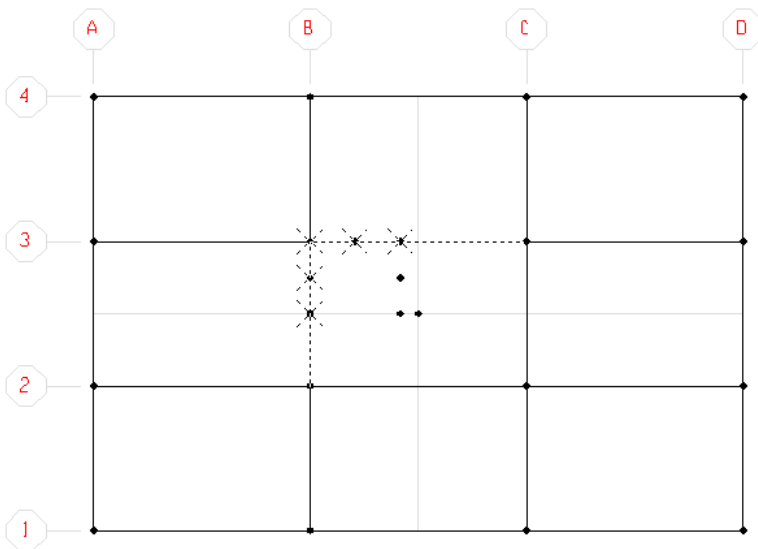
- Στο παράθυρο με την τρισδιάστατη απεικόνιση, από την εντολή *View → Set Limits*, τίθεται άνω όριο *Max=3m* στο επίπεδο *Set Z Axis Limits*. Έτσι, εμφανίζεται πλέον μόνο ο πρώτος όροφος του φορέα, κάνοντας ευκολότερη τη διαδικασία επέμβασης στη γεωμετρία (Σχήμα 9.3).
- Στη συνέχεια επιλέγεται το υποστυλώμα που βρίσκεται στην πάνω αριστερά γωνία του πυρήνα που πρόκειται να δημιουργηθεί, μαζί με τον άνω και κάτω κόμβο του (επισημαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 9.3).
- Γίνεται εφαρμογή της εντολής *Edit → Replicate*, όπου τίθενται τιμές *dx=1.25* και *Number=2* στα πεδία που εμφανίζονται. Δημιουργούνται έτσι δυο νέα υποστυλώματα με τους κόμβους τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.4 (αριστερά).
- Στη συνέχεια επιλέγονται τα δυο ακραία υποστυλώματα (επισημαίνονται με διακεκομμένη γραμμή στο αριστερά μέρος του Σχήματος 9.4) και ακολουθεί η ίδια διαδικασία *Replicate*, όπου πλέον τίθενται τιμές *dy=-1.0* και *Number=2* στα πεδία που εμφανίζονται (το πεδίο *dx* μηδενίζεται). Δημιουργούνται συνολικά άλλοι τέσσερις (4) στύλοι με τους κόμβους τους (Σχήμα 9.4, δεξιά).
- Σε επίπεδο *xy (Z=3)*, επιλέγονται οι δοκοί που «τρέχουν» πάνω στο τοίχωμα μαζί με όλους τους ενδιαμέσους κόμβους (Σχήμα 9.5). Η διακριτοποίηση των δοκών μπορεί να γίνει από την εντολή *Edit → Edit Lines → Divide Frames*, με την αυτοματοποιημένη επιλογή *Break at intersections with selected Joints, Frames, Area Edges and Solid Edges*. Πλέον οι δοκοί έχουν διακριτοποιηθεί σε επιμέρους γραμμικά στοιχεία, στα οποία αργότερα θα δοθούν ιδιότητες στερεού βραχίονα.
- Επιλέγονται τα δυο τμήματα βραχίονα του τοιχώματος T2 και δημιουργούνται οι βραχίονες του τοιχώματος T3, με χρήση της εντολής *Edit → Replicate* (τιμές *dx=2.5* και *Number=1*, δίχως αναπαραγωγή της κατανεμημένης φόρτισης *Distributed Load* καθώς το τμήμα αυτό θα θεωρηθεί αφόρτιστο).
- Πλέον μπορούν να διαγραφούν τα περιττά υποστυλώματα που βρίσκονται στις 4 γωνίες του πυρήνα που σχηματίζεται (με διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 9.4 δεξιά).



Σχήμα 9.3 Τροποποίηση της 3d όψης του φορέα ώστε να εμφανίζεται προσωρινά μόνο ο 1^{ος} όροφος.



Σχήμα 9.4 Ενδιάμεσα στάδια δημιουργίας γραμμικών στοιχείων προσομοίωσης του πυρήνα.



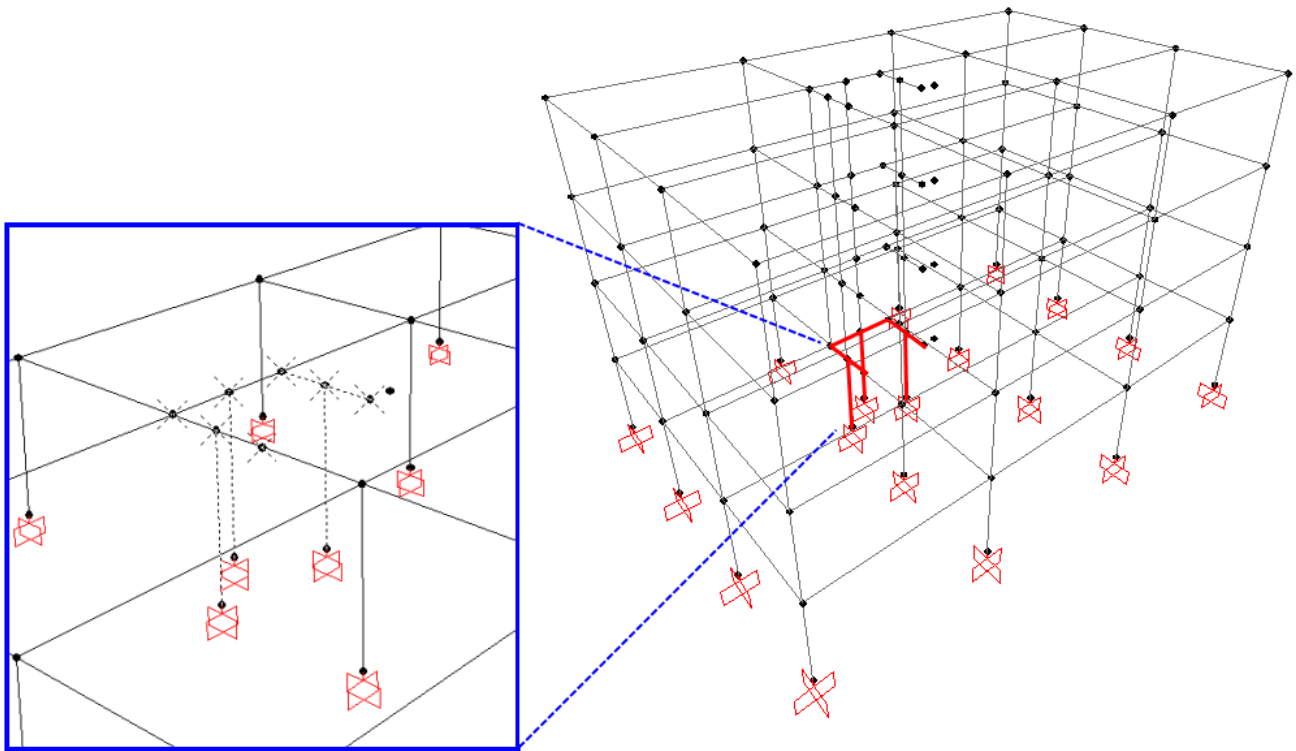
Σχήμα 9.5 Διακριτοποίηση των δοκών επάνω στα τοιχώματα σε επιμέρους γραμμικά στοιχεία.

Στη συνέχεια, για τη δημιουργία των αντίστοιχων τμημάτων στους ανώτερους ορόφους, ακολουθείται η διαδικασία:

- Επιλέγονται τα τρία (3) ισοδύναμα υποστυλώματα που έχουν σχηματιστεί, τα δυο (2) τμήματα βραχίονα του τοιχώματος T3, όπως και όλοι οι κόμβοι του πυρήνα στο επίπεδο $Z=3$ (συνολικά **7 Points - 5 Frames Selected**, όπως φαίνεται στο αριστερά τμήμα του Σχήματος 9.6). Δεν πρέπει να επιλεγούν οι κόμβοι της βάσης, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να μεταφερθεί η ιδιότητα της πάκτωσης σε επόμενους ορόφους.
- Με την εντολή **Edit → Replicate**, όπου τίθενται τιμές $dz=3.0$ και **Number=3**, γίνεται αναπαραγωγή των στοιχείων του πυρήνα στους υπόλοιπους ορόφους. Για να εμφανιστεί στην τρισδιάστατη όψη ο πλήρης φορέας (Σχήμα 9.6 δεξιά), θα πρέπει να επανέλθει το **Max=12** στη διεύθυνση Z από την εντολή **View → Set Limits**, ενώ πιθανώς χρειαστεί και σχετική ανανέωση της όψης με το **View → Restore Full View (F3)**.
- Διαγράφεται και στους επόμενους ορόφους ο περιττός στύλος στην αριστερά γωνία του πυρήνα, ο οποίος προϋπήρχε από τον προηγούμενο φορέα.
- Σε επίπεδο xy , διαδοχικά από όροφο σε όροφο, γίνεται διακριτοποίηση των δοκών του τοιχώματος σε επιμέρους τμήματα (**Divide Lines**) σύμφωνα και με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στον 1^ο όροφο.
- Τέλος, λόγω της δημιουργίας νέων κόμβων, ορίζονται εκ νέου τα διαφράγματα. Αρχικά με επιλογή ενός τυχαίου κόμβου, γίνεται διαγραφή των υφιστάμενων διαφραγμάτων από την εντολή **Assign → Joint → Constraints** (πλήκτρο **Delete Constraint**). Στη συνέχεια επιλέγεται όλος ο φορέας (**Ctrl+A**) και από την ίδια εντολή γίνεται επιλογή **Diaphragm** στο **Choose Constraint Type to Add** και με **Add new Constraint** δημιουργούνται τα νέα διαφράγματα σε επίπεδα κάθετα στον άξονα Z . Απαιτείται επιλογή του **Assign a different diaphragm constraint to each different selected Z level**, ώστε να μην δοθεί ίδιο διάφραγμα σε κόμβους διαφορετικού ορόφου.

Ακριβείς διαστάσεις δομικών στοιχείων κατά την προσομοίωση

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 9.1, οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων του φορέα δίνονται αξονικά, από κόμβο σε κόμβο γραμμικού στοιχείου του προσομοιώματος. Η πραγματικότητα σε μια τυπική κατασκευή είναι διαφορετική, καθώς οι δοκοί τοποθετούνται συνήθως συνευθειακά με μια από τις παρειές των υποστυλωμάτων και δεν συναντούν το υποστυλωμα στο μέσον του. Στα περισσότερα προγράμματα ανάλυσης κτιριακών φορέων, η δυνατότητα έκκεντρης τοποθέτησης δοκών-υποστυλωμάτων δίνεται αυτόματα, με τη σύνδεση μεταξύ των κόμβων των γραμμικών στοιχείων να υλοποιείται με μη-συνευθειακές άκαμπτες απολήξεις (στερεούς συνδέσμους).



Σχήμα 9.6 Αναπαραγωγή τμημάτων του πυρήνα στους υπόλοιπους ορόφους (απομένει η διαγραφή του υποστυλώματος στην αριστερά γωνία του πυρήνα στους υπόλοιπους ορόφους).

9.2.2. Μετονομασία δομικών στοιχείων φορέα

Κατά τη διαχείριση ενός πολυώροφου φορέα, είναι σκόπιμο η ονομασία των δομικών στοιχείων και κόμβων να βοηθά τον εύκολο έλεγχο του προσομοιώματος και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Στην συνέχεια της παραγράφου θα περιγραφεί μια διαδικασία μετονομασίας των παραπάνω στοιχείων για το σύνολο της κατασκευής. Καθώς η ονομασία (αρίθμηση) των διαφόρων στοιχείων δεν αφορά άμεσα την ορθότητα της προσομοίωσης, η εφαρμογή της δεν κρίνεται απαραίτητη για τον αναγνώστη που επιθυμεί απλώς μια πρώτη επαφή με το αντικείμενο της δυναμικής φασματικής ανάλυσης φορέα.

Αρίθμηση κόμβων και πεπερασμένων στοιχείων

Είναι σύνηθες σε προγράμματα προσανατολισμένα αποκλειστικά στην ανάλυση κτιριακών φορέων (στατικά πακέτα), η αρίθμηση των γραμμικών στοιχείων να γίνεται με τρόπο ελεγχόμενο και προσφέροντας δυνατότητα συσχέτισης της αρίθμησης των στοιχείων μεταξύ των ορόφων. Σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης, όπως είναι το *SAP 2000*, δεν προσφέρεται αυτόματα η συγκεκριμένη δυνατότητα. Ο μεγάλος αριθμός δομικών στοιχείων και κόμβων κάνει δυσχερή τη μετονομασία όλων των στοιχείων του φορέα, συνεπώς στη συνέχεια θα γίνει χρήση μιας εντολής που βοηθά εν μέρει τη διαδικασία. Καθώς όμως η συγκεκριμένη παράγραφος δεν παρουσιάζει πρόσθετο εκπαιδευτικό ενδιαφέρον, ενώ η διαδικασία που περιγράφεται είναι χρονοβόρα, ο αναγνώστης μπορεί να παραλείψει την εφαρμογή της κατά την εκτέλεση του συγκεκριμένου παραδείγματος.

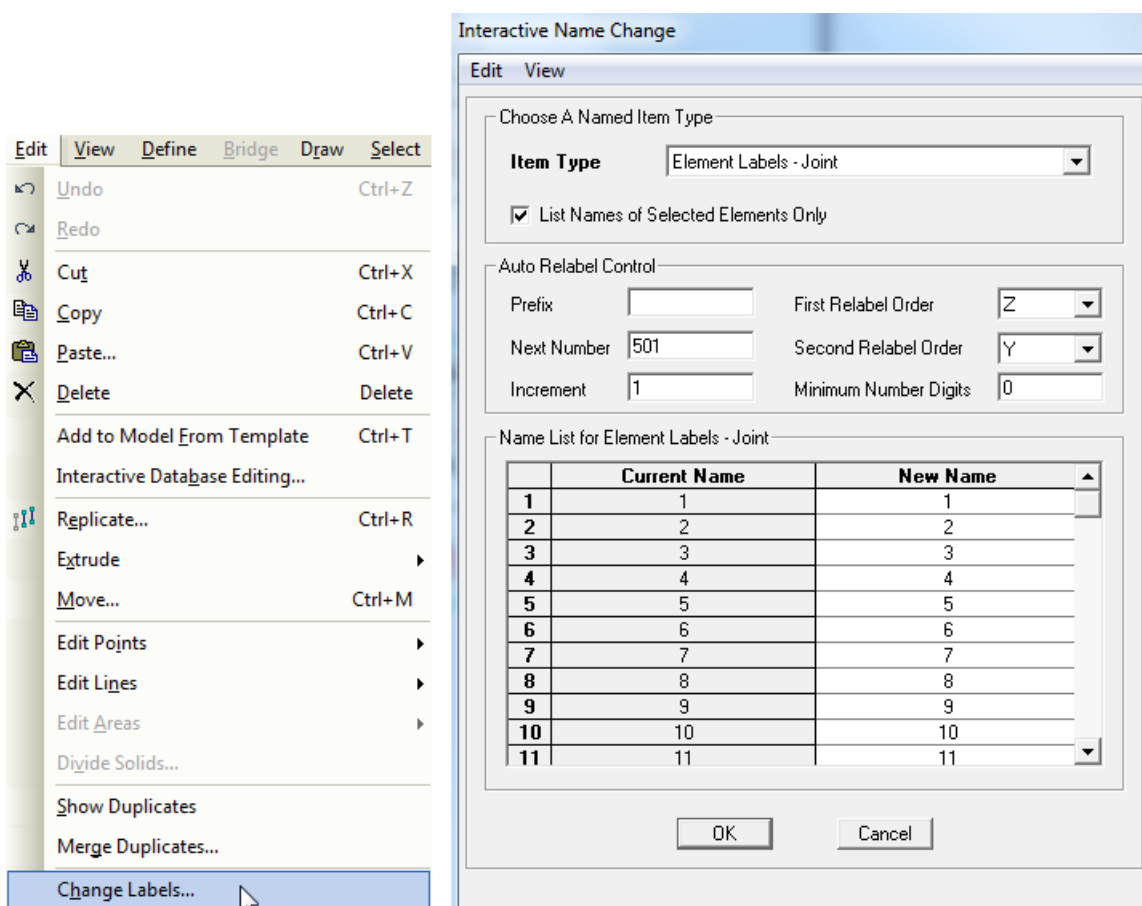
Καθορίζεται κάποιο πλάνο ονομασίας των διαφόρων στοιχείων, σύμφωνα με τα παρακάτω:

- Οι δοκοί ακολουθούν γενικά την ονομασία που φαίνεται στο Σχήμα 9.1. Για τον εύκολο εντοπισμό των δοκών στους διάφορους ορόφους αποφασίζεται να δοθεί το πρόθεμα *D*, ενώ οι δοκοί του 1^{ου} ορόφου ξεκινούν από τον αριθμό *101*, του 2^{ου} από τον αριθμό *201* κ.ο.κ.
- Τα κατακόρυφα στοιχεία ομοίως ακολουθούν την ονομασία που δίδεται στην κάτοψη, με πρόθεμα *K* για τα υποστυλώματα και *T* για τα τοιχώματα (είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται πάντα αγγλικό

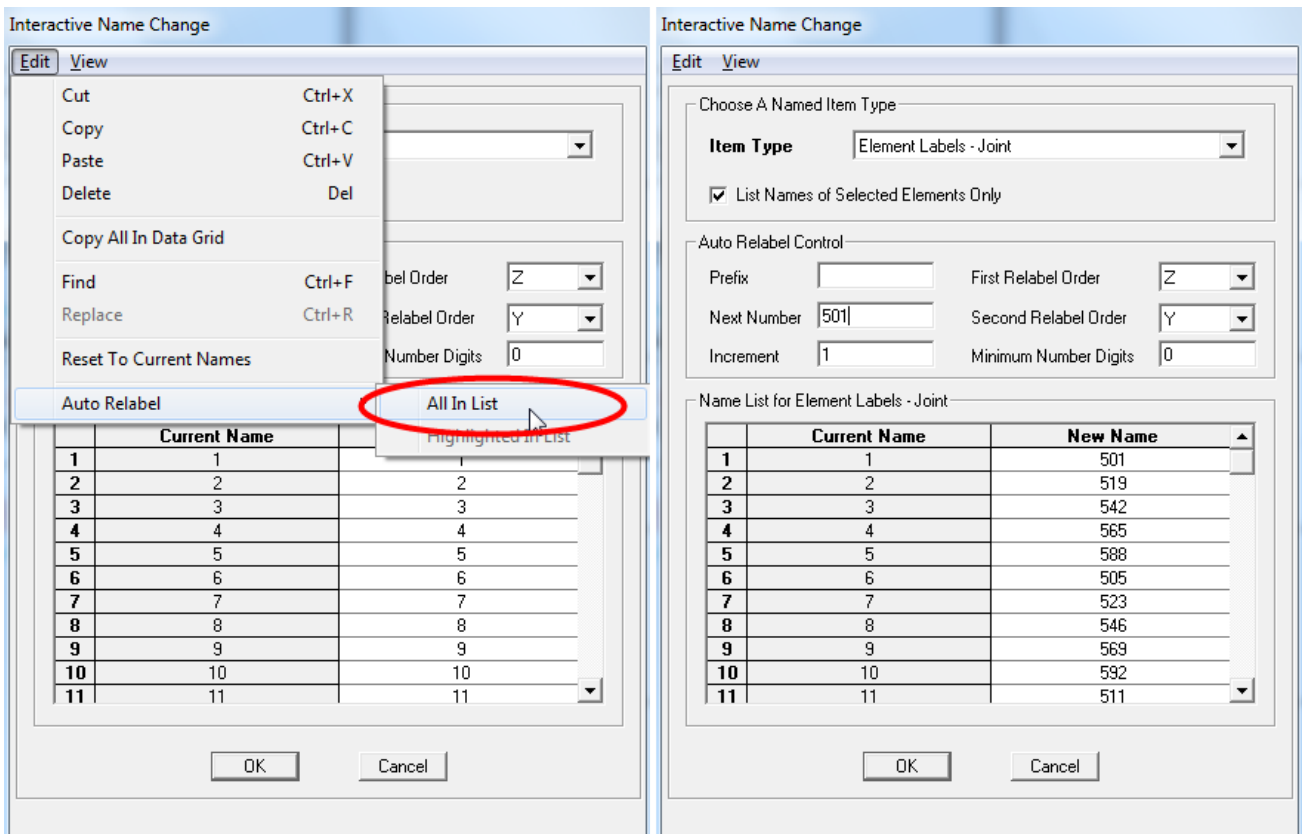
χαρακτήρες). Ομοίως τα στοιχεία του 1^{ου} ορόφου (στάθμη 0.0m έως 3.0m) ξεκινούν από τον αριθμό **101**, του 2^{ου} από τον αριθμό **201** κοκ.

- Τέλος, και οι κόμβοι ακολουθούν την ονομασία που εμφανίζεται στην κάτοψη, με τους κόμβους της βάσης να έχουν αρίθμηση που ξεκινά από τον αριθμό **1**, του 1^{ου} ορόφου από το **101** κοκ. Στους πρόσθετους κόμβους της περιοχής του πυρήνα θα δοθεί αρίθμηση σε συνέχεια των υπολοίπων κόμβων, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Πρώτα γίνεται η αλλαγή της αρίθμησης των κόμβων. Καθώς ενδέχεται κάποιοι από τους κόμβους να έχουν ήδη ονομασία που είναι επιθυμητό να δοθεί σε άλλο σημείο, γίνεται αρχικά μια αυτόματη μετονομασία με χρήση αριθμών που δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην τελική μορφή του φορέα, π.χ. πάνω από τον αριθμό 500. Επιλέγεται όλος ο φορέας και από την εντολή **Edit → Change Labels** επιλέγονται οι ονομασίες των κόμβων (*Item Type: Element Labels-Joint*). Τίθεται επόμενος αριθμός κόμβου **Next Number=501** και βήμα αρίθμησης **Increment=1** (Σχήμα 9.7). Η αλλαγή του ονόματος γίνεται από το **Edit → Auto Relabel → All In List**, ενώ η νέα ονομασία εμφανίζεται άμεσα σε μορφή λίστας, σε αντιπαραβολή με την προηγούμενη αρίθμηση των κόμβων (Σχήμα 9.8). Με **OK** ο χρήστης κάνει δεκτή τη μετονομασία, η οποία πλέον εφαρμόζεται στον φορέα.



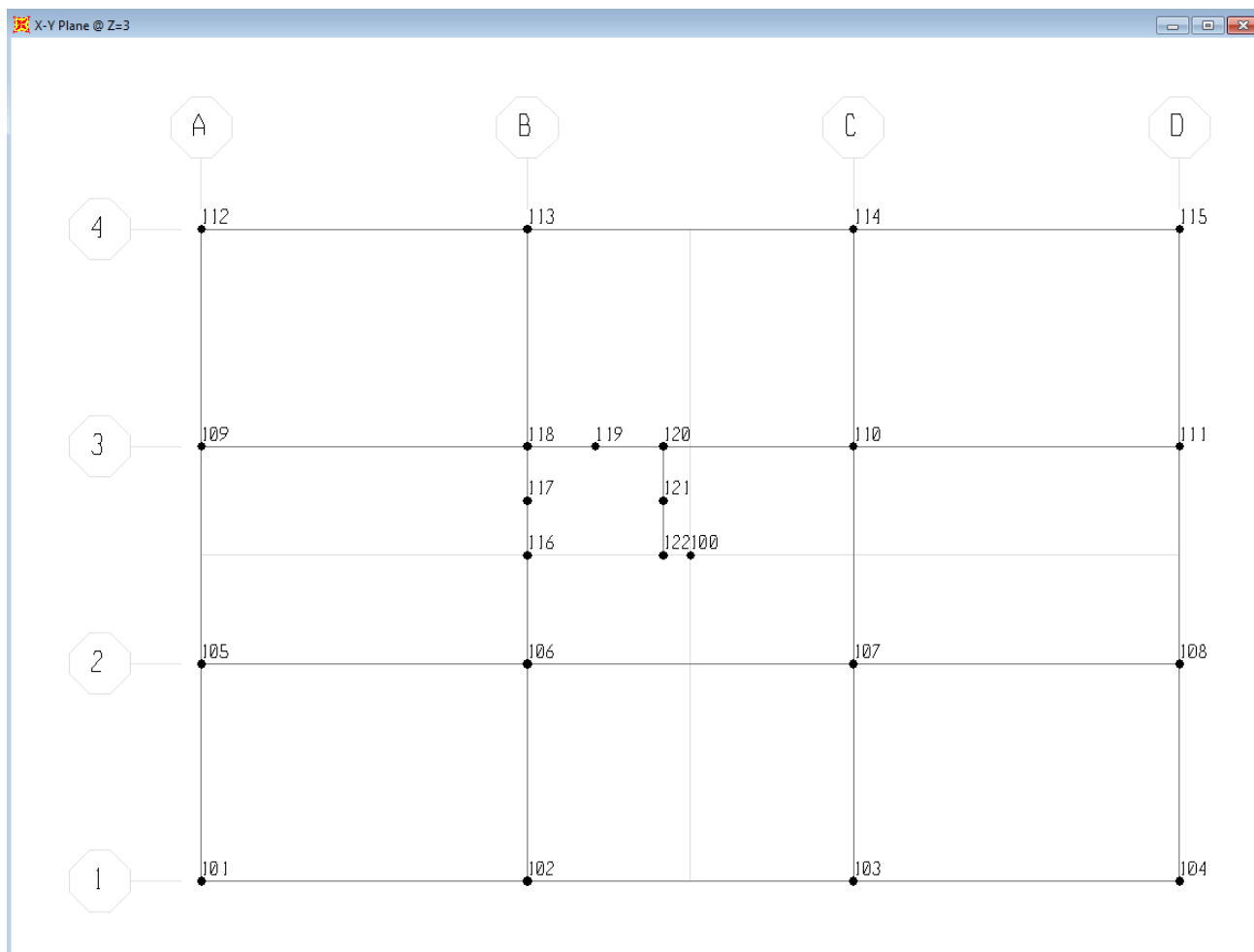
Σχήμα 9.7 Μετονομασία αρίθμησης κόμβων φορέα.



Σχήμα 9.8 Ενεργοποίηση εντολής μετονομασίας και νέα αρίθμηση κόμβων σε αντιπαράθεση με την προηγούμενη.

Σε επίπεδο xy ($Z=3m$), με ενεργή την εμφάνιση της ονομασίας των κόμβων (*View* → *Set Display Options* → *Joints* → *Labels*), επιλέγονται όλοι οι κόμβοι του πρώτου ορόφου εκτός των κόμβων της περιοχής του πυρήνα και τον κόμβο στο κέντρο της πλάκας. Με την παραπάνω διαδικασία γίνεται εκ νέου μετονομασία των κόμβων, αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιώντας τιμή *Next Number=101*. Αυτόματα όλοι οι κόμβοι που επιλέχθηκαν λαμβάνουν τις επιθυμητές τιμές αρίθμησης.

Οι κόμβοι της περιοχής του τοιχώματος μπορούν να αριθμηθούν με την ίδια εντολή, πληκτρολογώντας όμως μια-μια τις ονομασίες που εμφανίζονται στο δεξί τμήμα της λίστας των κόμβων (στήλη *New Name*) και στη συνέχεια επιλέγοντας απευθείας *OK* (όχι με *Auto Relabel*). Για τον κόμβο στο κέντρο της πλάκας (θέση που θα οριστεί η μάζα στη συνέχεια του παραδείγματος) επιλέγεται η ονομασία *100*. Η τελική εικόνα του 1^{ου} ορόφου εμφανίζεται στο Σχήμα 9.9, ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται και στους επόμενους ορόφους με τιμές που θα ξεκινούν από το *200* για τον 2^ο όροφο, *300* για τον 3^ο κοκ. Στη στάθμη θεμελίωσης του φορέα ($Z=0m$) η αρίθμηση ξεκινά από το *1*, ενώ σημειώνεται πως στην περιοχή του τοιχώματος υπάρχουν μόνο οι κόμβοι *17*, *19* και *21*, οι οποίοι βρίσκονται στις βάσεις των ισοδύναμων στύλων που προσομοιώνουν τον κορμό του τοιχώματος (βλ. σκαρίφημα γραμμικών στοιχείων στο Σχήμα 9.2).

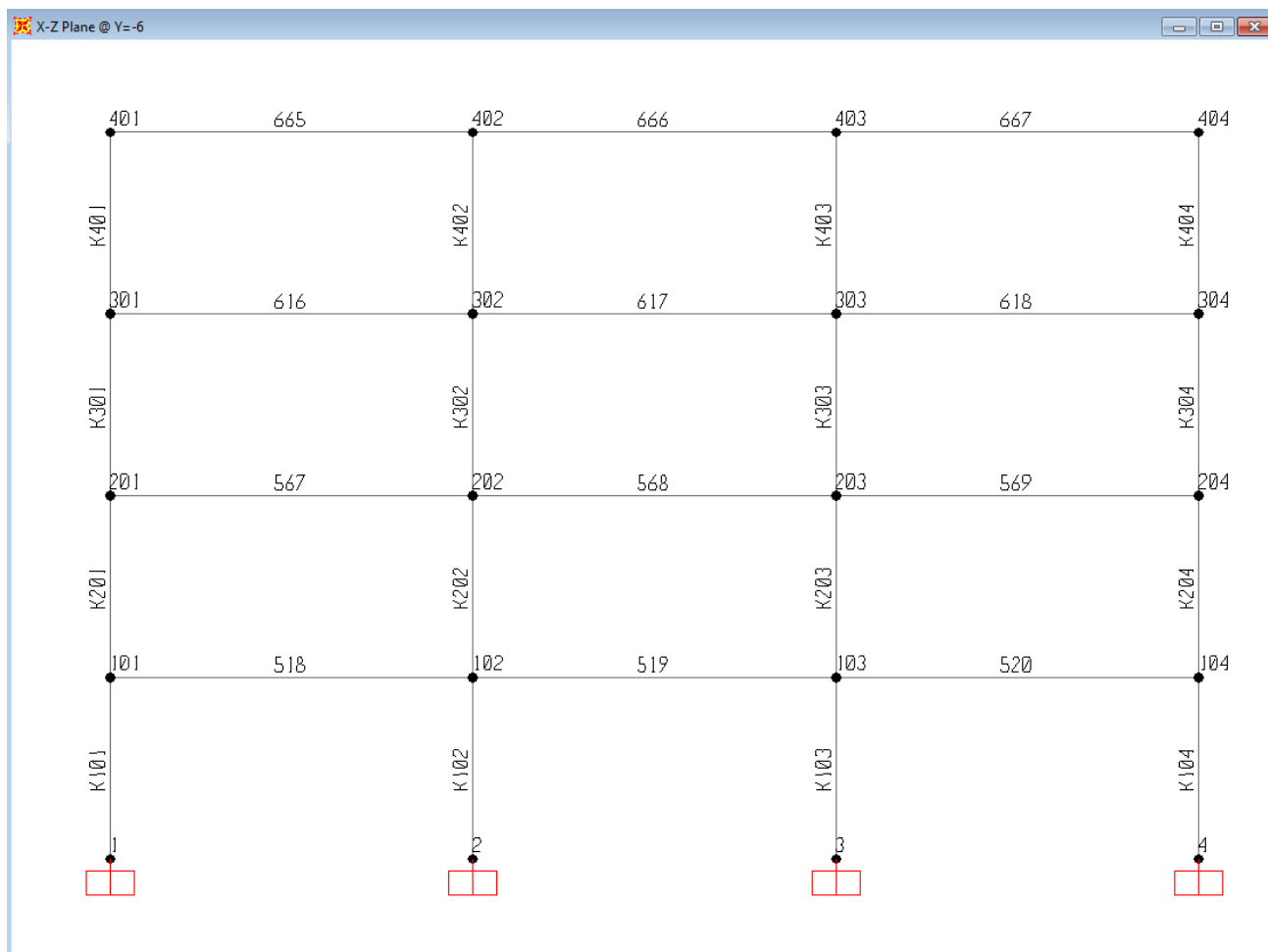


Σχήμα 9.9 Τελική αρίθμηση κόμβων του 1^{ου} ορόφου ($Z=3m$).

Ακολουθεί με αντίστοιχο τρόπο η μετονομασία των υποστυλωμάτων, με την επιλογή *Element Labels – Frame* στην εντολή που περιγράφηκε. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται και το πρόθεμα *Prefix=K* (αγγλικός χαρακτήρας), ώστε να είναι εύκολος ο εντοπισμός των υποστυλωμάτων κατά την ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία διευκολύνεται σε επίπεδο *xz* και με ορατή την αρίθμηση (*Labels*) τόσο των γραμμικών στοιχείων (*Frames*) όσο και των κόμβων (*Joints*), καθώς τα υποστυλώματα έχουν αντίστοιχη ονομασία με τους κόμβους στους οποίους καταλήγουν.

Η αρίθμηση με την αυτόματη διαδικασία σε επίπεδη τομή του φορέα, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο *xz* πλαίσιο του Σχήματος 9.10, γίνεται χωριστά για τον κάθε στύλο, επιλέγοντας ολόκληρο το υποστύλωμα από τη βάση έως την κορυφή του κτιρίου (τυχόν επιλογή και των κόμβων δεν θα επηρεάσει την ονομασία τους). Ενδεικτικά, για το αριστερά υποστύλωμα χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι *Prefix=K*, *Next Number=101* και *Increment=100*, οπότε ο στύλος του 1^{ου} ορόφου έλαβε ονομασία *101*, του 2^{ου} ορόφου *201* κ.ο.κ. Με τον ίδιο τρόπο γίνεται και η μετονομασία των υποστυλωμάτων στα υπόλοιπα πλαίσια σε επίπεδο *xz*.

Ειδικά για την αρίθμηση των τοιχωμάτων *T2* και *T3* (ονομασίες *T102*, *T103* για τον 1^ο όροφο κ.ο.κ), θα πρέπει να δημιουργηθούν οι σχετικές γραμμές καννάβου ($X=-0.5m$ και $Y=1m$) ώστε να εμφανίζονται σε επίπεδη όψη *xz* του προγράμματος.



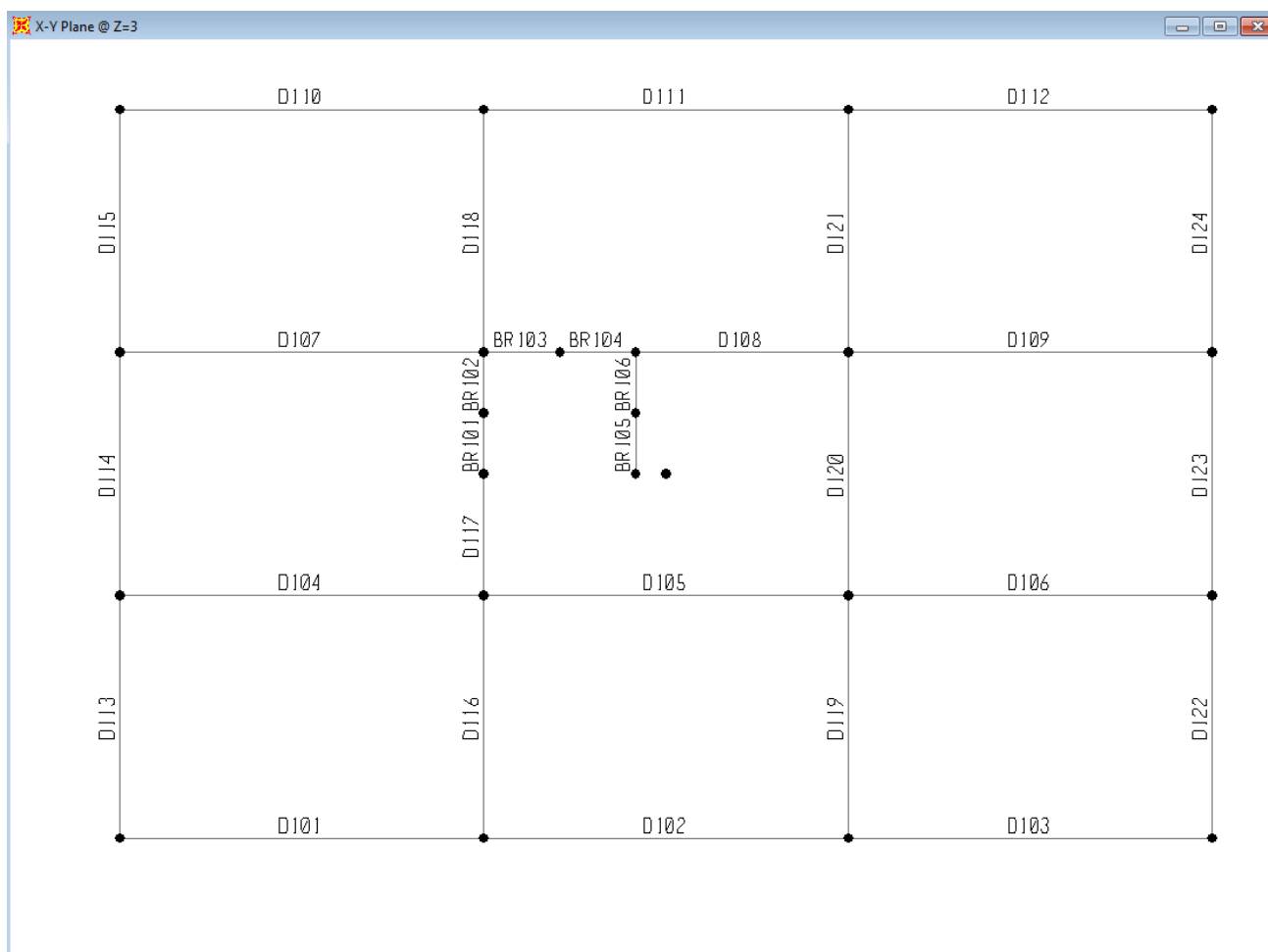
Σχήμα 9.10 Μετονομασία υποστυλωμάτων σε επίπεδο xz του φορέα (η ονομασία των δοκών θα αλλάξει σε επόμενο στάδιο).

Τελευταίο βήμα αποτελεί η μετονομασία των δοκών, αλλά και των τμημάτων στερεού βραχίονα επάνω στα τοιχώματα. Σε επίπεδο xy ($Z=3m$), επιλέγονται όλα τα κατά X τμήματα δοκού, εκτός από τα τμήματα βραχίονα. Με την εντολή *Edit* → *Change Labels* και παραμέτρους *Prefix=D*, *Next Number=101* και *Increment=1*, μετονομάζονται όλες οι κατά X δοκοί του ορόφου.

Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται για τις δοκούς που είναι παράλληλες με τον άξονα Y . Αυτή τη φορά όμως τίθεται πρώτη τιμή *Next Number=113*, σύμφωνα και με την αρίθμηση που εμφανίζεται στην κάτοψη (Σχήμα 9.1), ενώ η παράμετρος *Second Relabel Order* τροποποιείται από Y σε X .

Τέλος, τα τμήματα βραχίονα λαμβάνουν αρίθμηση με το πρόθεμα *BR*, όπως φαίνεται και στην τελική εικόνα της κάτοψης στο Σχήμα 9.11.

Με την ίδια λογική μετονομάζονται τα στοιχεία δοκού και στους υπόλοιπους ορόφους του φορέα.



Σχήμα 9.11 Τελική ονομασία κόμβων και δοκών στο επίπεδο του 1^{ου} ορόφου.

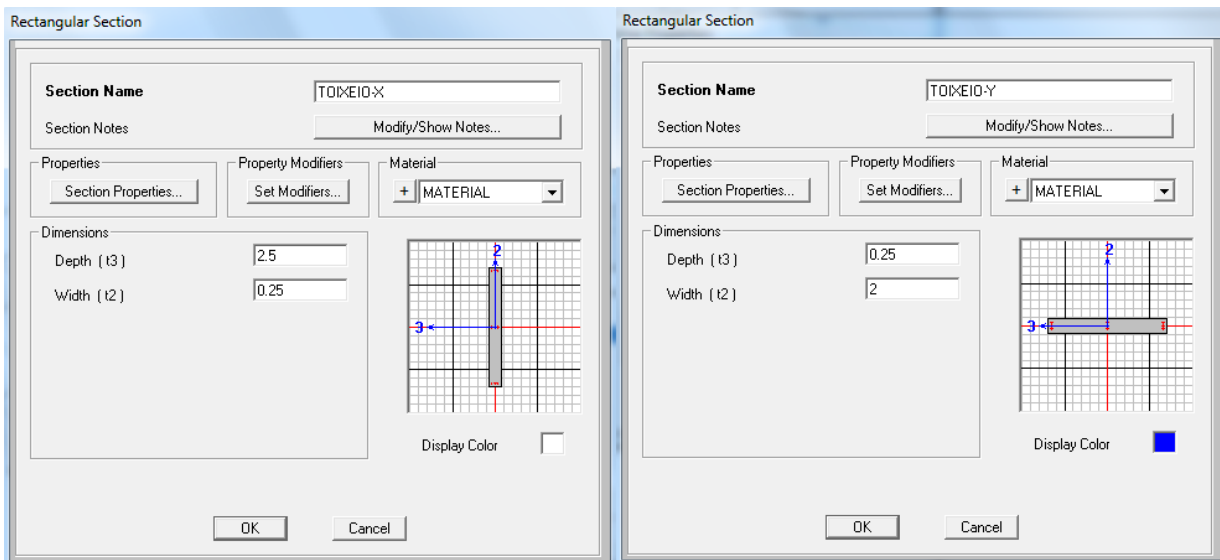
9.3. Διατομές δομικών στοιχείων φορέα

Οι διατομές των υποστυλωμάτων έχουν ήδη οριστεί πλήρως στο υφιστάμενο αρχείο. Στο τρέχον παράδειγμα θα πρέπει να οριστούν οι διατομές των γραμμικών στοιχείων που συνθέτουν τον πυρήνα, αλλά και να επανακαθοριστούν οι διατομές των δοκών μετά από υπολογισμό του συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας

9.3.1. Διατομές γραμμικών στοιχείων τοιχωμάτων πυρήνα

Η προσομοίωση του πυρήνα επιτυγχάνεται με την προσομοίωση των τριών τοιχωμάτων που τον αποτελούν και τη σύνδεση μεταξύ τους στα επίπεδα των ορόφων. Απαιτείται συνεπώς ο ορισμός των διατομών των ισοδύναμων στύλων (κατακόρυφα στοιχεία στο μέσον του κάθε τοιχώματος), αλλά και των στερεών βραχιόνων που συνδέουν τους ισοδύναμους στύλους σε κάθε όροφο.

Για τα κατακόρυφα στοιχεία που προσομοιώνουν τον κορμό του τοιχώματος, αρκεί η χρήση ορθογωνικής διατομής διαστάσεων ίσων με τη διατομή των τοιχωμάτων που υποκαθιστούν. Απαιτούνται δυο διαφορετικές διατομές τοιχώματος, καθώς το τοίχωμα της πλάτης του πυρήνα έχει διαφορετικές διαστάσεις (μήκος) από τα δυο πλαϊνά τοιχώματα (Σχήμα 9.12). Υπενθυμίζεται πως θα πρέπει να τεθούν και κατάλληλοι συντελεστές απομείωσης της δυσκαμψίας, δυσστησίας και δυστρεψίας του τοιχώματος (Πίνακας Β.1 στο Παράρτημα Β).



Σχήμα 9.12 Ορισμός διατομών ισοδύναμων στύλων για την προσομοίωση των τοιχωμάτων του πυρήνα.

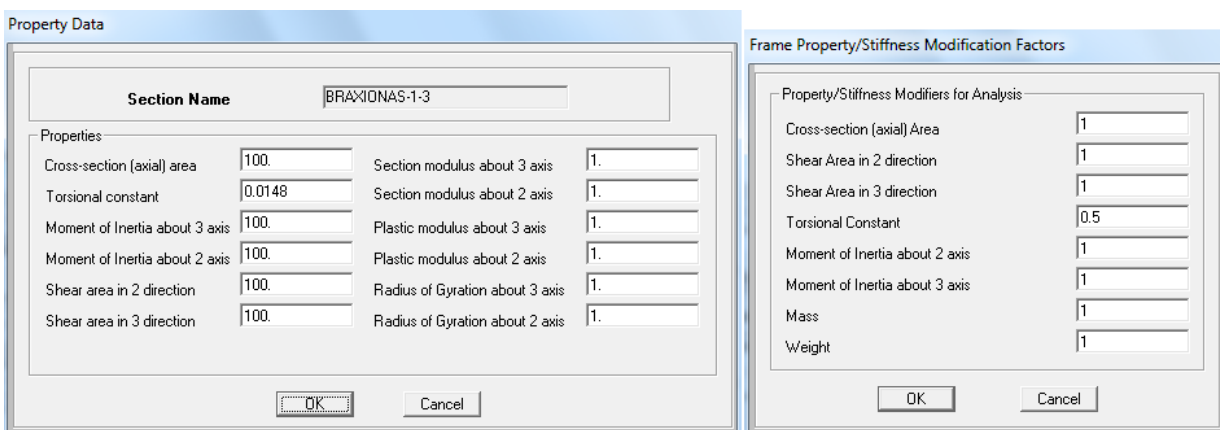
Για τον ορισμό του στερεού βραχίονα επιλέγεται η χρήση της διατομής τύπου *General* (ομάδα διατομών *Other*), η οποία επιτρέπει τον απευθείας καθορισμό των χαρακτηριστικών της δυσκαμψίας, δυστένειας κτλ, δίχως να απαιτείται προηγουμένως η επιλογή συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων διατομής. Τίθεται τιμή **100** σε όλα τα πεδία ελαστικής συμπεριφοράς, εκτός από το πεδίο όπου καθορίζεται η τιμή της δυστρεψιάς της διατομής (*Torsional constant*), η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 6.1. Παρατηρείται πως η τιμή της δυστρεψιάς για τους βραχίονες του τελευταίου ορόφου είναι διαφορετική, λόγω του διαφορετικού ύψους h από μέσον σε μέσον ορόφου (δεν υπάρχει ανώτερος όροφος):

$$J_{1-3} = \alpha t^3 h_{1-3} = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{192 \cdot 0.25m}{\pi^5 \cdot 3.0m} \right) \cdot \tanh \left(\frac{\pi \cdot 3.0m}{2 \cdot 0.25m} \right) \right] \cdot (0.25m)^3 \cdot 3.0m = 0.0148 \quad (9.1)$$

$$J_4 = \alpha t^3 h_4 = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{192 \cdot 0.25m}{\pi^5 \cdot 1.5m} \right) \cdot \tanh \left(\frac{\pi \cdot 1.5m}{2 \cdot 0.25m} \right) \right] \cdot (0.25m)^3 \cdot 1.5m = 0.0070m^4 \quad (9.2)$$

Κατά τα λοιπά, όσον αφορά τον ορισμό της διατομής βραχίονα (Σχήμα 9.13), ακολουθούνται όσα αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 6.

Με βάση τα παραπάνω, δημιουργούνται οι δύο διατομές ισοδύναμου στύλου (για τα τοιχώματα κατά X και κατά Y) και οι δύο διατομές στερεού βραχίονα (για τους ορόφους 1-3 και για τον όροφο 4, ανεξαρτήτως διεύθυνσης του βραχίονα), οι οποίες ανατίθενται στα κατάλληλα γραμμικά στοιχεία του φορέα.



Σχήμα 9.13 Ορισμός διατομής στερεού βραχίονα του πυρήνα (ενδεικτικά για τους πρώτους 3 ορόφους).

9.3.2. Συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας και διατομές πλακοδοκού

Στις υφιστάμενες διατομές των δοκών, μορφής πλακοδοκού, το συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας δεν υπολογίστηκε αλλά θεωρήθηκε δεδομένο στην παρούσα του μορφή. Στον νέο φορέα που εξετάζεται στο τρέχον Κεφάλαιο, το συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας θα υπολογιστεί χωριστά για την κάθε δοκό, ανάλογα με τη θέση της στον φορέα και σύμφωνα με τις προβλέψεις του *Ευρωκώδικα*.

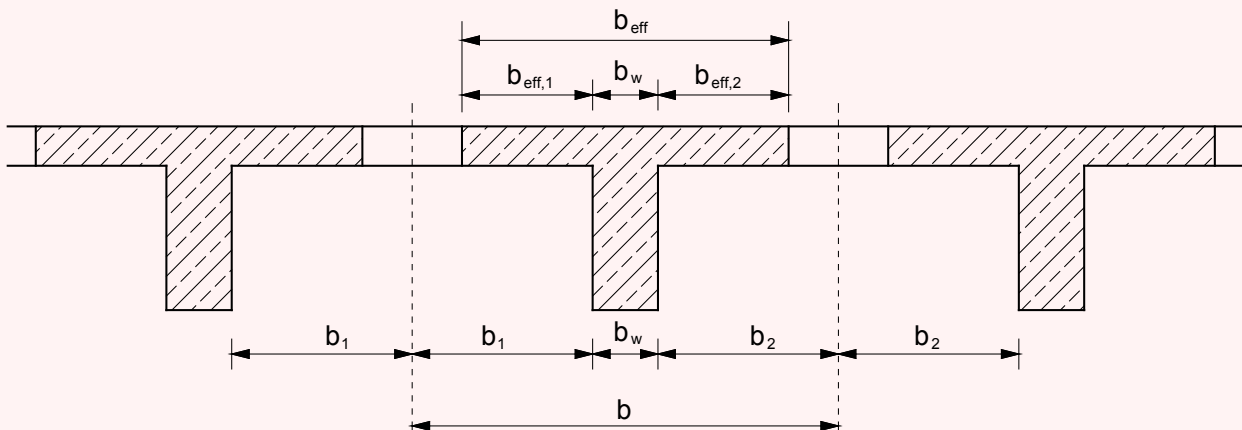
Υπολογισμός συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας βάσει του EC2

Ο υπολογισμός του συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας κατά την ανάλυση γίνεται βάσει του *EC2 §5.3.2.1*. Το συνεργαζόμενο πλάτος προκύπτει διαφορετικό στις θέσεις των ανοιγμάτων και των στηρίξεων, κατά την ανάλυση όμως επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί η τιμή που υπολογίζεται στο άνοιγμα (*EC2 §5.3.2.1.4*). Η γενική εξίσωση υπολογισμού είναι:

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (9.3)$$

$$b_{eff,i} = 0.2 \cdot b_i + 0.1 \cdot L_0 \leq \begin{cases} 0.2 \cdot L_0 \\ b_i \end{cases} \quad (9.4)$$

Ως L_0 λαμβάνεται το 0.85 του μήκους δοκού για ακραίο άνοιγμα ή το 0.7 του μήκους δοκού για ενδιάμεσο άνοιγμα (ενδεικτικά οι δοκοί Δ4 και Δ5 του Σχήματος 9.1 αντίστοιχα). Οι υπόλοιποι συμβολισμοί εμφανίζονται στο σκαρίφημα του Σχήματος 9.14. Σημειώνεται πως οι απλοποιημένοι υπολογισμοί που προβλεπόταν στον *ΕΚΩΣ 2000 (§Σ.8.4)* για συνήθη οικοδομικά έργα, δίνουν συστηματικά μικρότερες τιμές συνεργαζόμενου πλάτους σε σχέση με τον *EC2*.



Σχήμα 9.14 Παράμετροι καθορισμού συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας σε διατομή πλακοδοκού.

Διαδραστικό Αντικείμενο 9.1	Εφαρμογή
Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας σε δοκό κατά EC2 (§5.3.2.1).	

Διαδραστικό Αντικείμενο 9.2	Εφαρμογή
Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας σε δοκό κατά ΕΚΩΣ 2000 (προσεγγιστική σχέση §Σ8.4).	

Το συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας για την κάθε δοκό του φορέα υπολογίζεται στον Πίνακα 9.1. Σημειώνεται πως σε κάποιες από τις τιμές του πίνακα, κυρίως για τις κατά *Y* δοκούς, οι τιμές που προκύπτουν επηρεάζονται από τα μέγιστα όρια που προβλέπονται στις σχετικές εξισώσεις υπολογισμού του *EC2*.

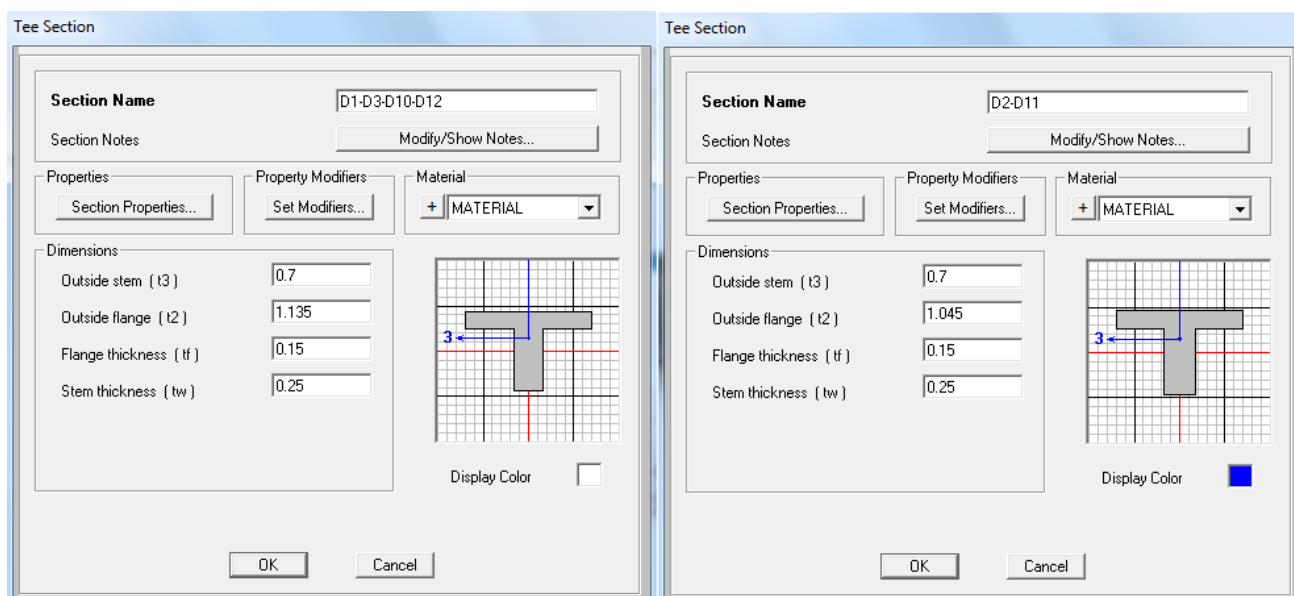
Δοκός	L (1)	L ₀ (2)	b ₁ = b ₂ (3)*	0.2L ₀ (4)	b _{eff,1} (5)≤(3),(4)	b _{eff,2} (6)≤(3),(4)	b _w (7)	b (8)	b _{eff} (9)=(5)+(6)+(7) ≤(8)
D1, D3, D10, D12	6.000	5.100	1.875	1.020	0.885	-	0.250	2.125	1.135m
D2, D11	6.000	4.200	1.875	0.840	0.795	-	0.250	2.125	1.045m
D4, D6, D7, D9	6.000	5.100	1.875	1.020	0.885	0.885	0.250	4.000	2.020m
D5	6.000	4.200	1.875	0.840	0.795	0.795	0.250	4.000	1.840m
D8	3.500	2.450	1.875	0.490	0.490	0.490	0.250	4.000	1.230m
D13, D15, D22, D24	4.000	3.400	2.875	0.680	0.680	-	0.250	3.125	0.930m
D14, D23	4.000	2.800	2.875	0.560	0.560	-	0.250	3.125	0.810m
D16, D18, D19, D21	4.000	3.400	2.875	0.680	0.680	0.680	0.250	6.000	1.610m
D20	4.000	2.800	2.875	0.560	0.560	0.560	0.250	6.000	1.370m
D17	2.000	1.400	2.875	0.280	0.280	0.280	0.250	6.000	0.810m

Πίνακας 9.1 Υπολογισμός συνεργαζόμενου πλάτους πλάκας για δοκούς (διαστάσεις σε m) (*για μονόπλευρες πλακοδοκούς είναι b₂=0).

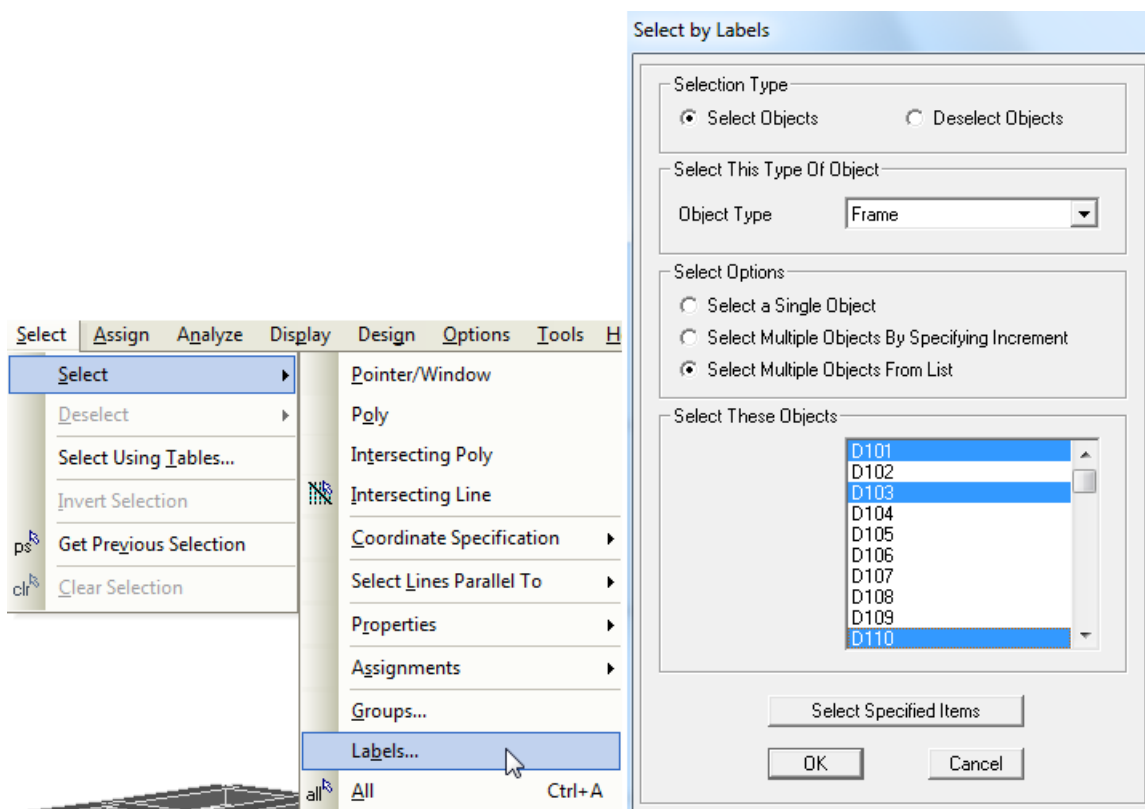
Ακολουθεί η δημιουργία των διατομών πλακοδοκού (*Define* → *Section Properties* → *Frame Sections*), κατά την οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι συντελεστές απομείωσης της δυσκαμψίας, δυστημψίας και δυστρεψίας, όπως εμφανίζονται στον Πίνακα Β.1 (Παράρτημα Β). Σημειώνεται πως η μορφή δοκού T (αμφίπλευρη) μπορεί να επιλεγεί ακόμη και για τις μονόπλευρες πλακοδοκούς, αρκεί να οριστεί σωστά το συνεργαζόμενο πλάτος πλάκας που έχει υπολογιστεί. Οι γεωμετρικές ιδιότητες της δοκού που εμπλέκονται στην ανάλυση προκύπτουν ίδιες και στις δυο περιπτώσεις, ενώ ο χρήστης δεν προβληματίζεται για τον ακριβή προσανατολισμό της μονόπλευρης πλακοδοκού.

Για την αύξηση της ταχύτητας δημιουργίας των διάφορων διατομών, αντί της προσθήκης νέας διατομής μπορεί να επιλέγεται η αντιγραφή μιας υφιστάμενης με την επιλογή *Add Copy of Property*. Στην περίπτωση αυτή, εκτός της νέας ονομασίας που ορίζεται, απαιτείται αλλαγή μόνο στην τιμή του συνεργαζόμενου πλάτους. Η ονομασία των διατομών αντιστοιχεί στις δοκούς που αφορά, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 9.15.

Για την ανάθεση της κατάλληλης διατομής σε κάθε δοκό, βολεύει η επιλογή των δοκών από την εντολή *Select* → *Select* → *Labels* με παραμέτρους *Object Type: Frame* και *Select Multiple Objects from List*. Ενδεικτικά, για την ανάθεση της διατομής *D1-D3-D10-D12* επιλέγονται (με πατημένο το *Control*) οι ονομασίες δοκού *D101, D103, D110, D112* (1^{ου} ορόφου), *D201, D203, D210, D212* (2^{ου} ορόφου) κ.ο.κ. Με *OK* οι συγκεκριμένες δοκοί εμφανίζονται επιλεγμένες στον φορέα, οπότε με *Assign* → *Frame* → *Frame Sections* γίνεται ανάθεση της παραπάνω διατομής. Με τον ίδιο τρόπο ανατίθενται διατομές και στις υπόλοιπες δοκούς.



Σχήμα 9.15 Ορισμός διατομών μορφής πλακοδοκού (ενδεικτικές περιπτώσεις).



Σχήμα 9.16 Επιλογή ονομάτων δοκών για την ανάθεση διατομής (στο δεξί παράθυρο δεν είναι ορατές όλες οι επιλεγμένες δοκοί).

9.3.3. Άκαμπτα άκρα δομικών στοιχείων

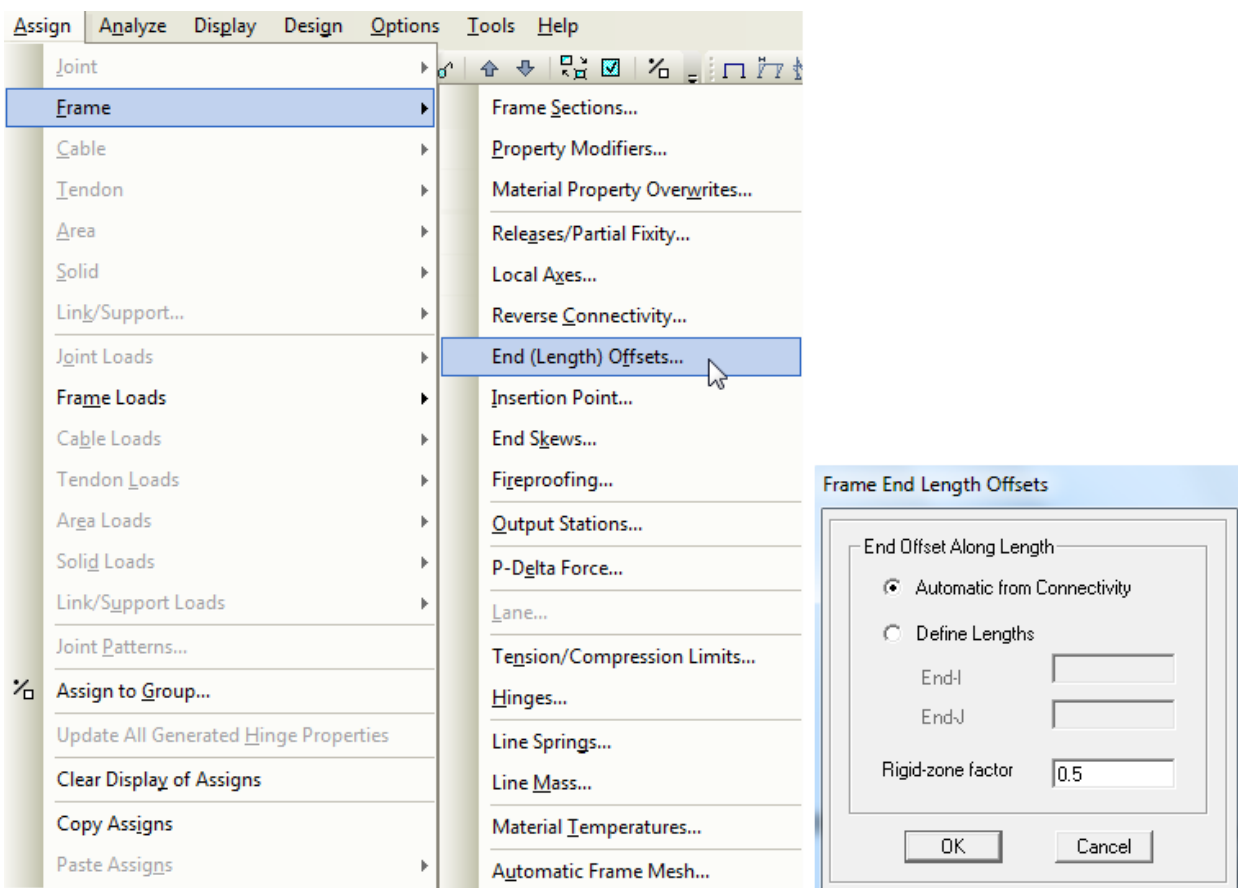
Κατά την προσομοίωση του φορέα με χρήση γραμμικών στοιχείων, η σύνδεση τους στους κόμβους γίνεται στον άξονα του κάθε δομικού στοιχείου που αναπαριστούν. Προκύπτει συνεπώς, ότι ένα τμήμα των γραμμικών στοιχείων δοκών και υποστυλωμάτων στα άκρα τους βρίσκεται εντός του κόμβου που δημιουργείται στη θέση σύνδεσης, άρα έχει σημαντικά αυξημένη δυσκαμψία σε σχέση με το ελεύθερο

μήκος του γραμμικού στοιχείου. Σύμφωνα με τον **EC8 §4.3.1(2)**, το προσομοίωμα θα πρέπει να αποδίδει τη συμβολή των περιοχών κόμβων στην παραμορφωσιμότητα του κτιρίου.

Για την εφαρμογή της παραπάνω απαίτησης στον φορέα που εξετάζεται, θα τεθούν άκαμπτα άκρα δοκών και υποστυλωμάτων στις θέσεις σύνδεσης. Σημειώνεται πως τα τμήματα βραχίονα και ισοδύναμου στύλου τοιχώματος έχουν ήδη τις κατάλληλες ιδιότητες αυξημένης δυσκαμψίας στις θέσεις που χρειάζεται, κατά συνέπεια δεν απαιτείται περαιτέρω τροποποίηση των ιδιοτήτων τους.

Επιλέγονται αρχικά όλες οι δοκοί και τα υποστυλώματα του φορέα, με τη βοήθεια της εντολής **Select → Select → Properties → Frame Sections**. Γίνεται ταυτόχρονη επιλογή πολλών διατομών (με **Control**), συμπεριλαμβάνοντας τη διατομή υποστυλώματος (**COLUMN**) και όλες τις διατομές δοκών του φορέα που δημιουργήθηκαν προηγουμένως (**D17, D14-D23**, κτλ). Στη συνέχεια, με την εντολή **Assign → Frame → End (Length) Offsets**, ανατίθενται τα άκαμπτα άκρα με επιλογή αυτοματοποιημένου τρόπου υπολογισμού του μήκους τους (**Automatic from Connectivity**), όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.17. Ο συντελεστής άκαμπτου τμήματος ορίζεται **Rigid-zone factor=0.5**, σύμφωνα με τη σύσταση του εγχειριδίου χρήσης του προγράμματος, θεωρώντας δηλαδή μόνο το ½ του μήκους εντός του κάθε κόμβου ως πραγματικά άκαμπτο κατά την ανάλυση. Με **OK** ολοκληρώνεται η διαδικασία ανάθεσης των άκαμπτων άκρων.

Είναι προφανές από τα παραπάνω, πως θα πρέπει πρώτα να ολοκληρωθεί ο ορισμός της γεωμετρίας και η ανάθεση των τελικών διατομών του φορέα, ώστε να γίνει σωστά στη συνέχεια ο υπολογισμός του άκαμπτου μήκους από τη συνδεσιμότητα του κάθε γραμμικού στοιχείου. Η επισκόπηση του καθορισμού άκαμπτου άκρου μπορεί να ελεγχθεί με δεξί **click** στο γραμμικό στοιχείο, οπότε οι παράμετροι (μήκος και συντελεστής άκαμπτου τμήματος) εμφανίζονται στην καρτέλα **Assignments** στο πεδίο **End Length Offsets**.



Σχήμα 9.17 Αυτοματοποιημένη ανάθεση άκαμπτων άκρων των γραμμικών στοιχείων στους κόμβους.

9.4. Κατακόρυφα φορτία και μάζα φορέα

9.4.1. Κατακόρυφα φορτία φορέα

Ο προσδιορισμός των κατακόρυφων φορτίων του φορέα είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς πέραν της επιρροής τους ως φόρτιση στο φέροντα οργανισμό αποτελούν τη βάση υπολογισμού της μάζας που λαμβάνεται υπόψη κατά τη σεισμική ανάλυση. Τα κατακόρυφα φορτία αποτελούνται από τις μόνιμες δράσεις και τις μεταβλητές δράσεις. Οι μόνιμες δράσεις αφορούν ίδια βάρη σκυροδέματος (πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα και τοιχώματα) και τοιχοποιίας, όπως και το βάρος των επιστρώσεων, ενώ οι μεταβλητές δράσεις αφορούν κατά βάση τα κινητά φορτία στις πλάκες.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τα κατακόρυφα φορτία έχουν δοθεί απευθείας ως ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία δοκών, που περιλαμβάνουν μάλιστα τα ίδια βάρη των δομικών στοιχείων (για τον λόγο αυτόν τίθεται μηδενικό ειδικό βάρος στο υλικό). Μάλιστα, για την περαιτέρω απλοποίηση του παραδείγματος, θεωρείται πως τα φορτία αυτά είναι όμοια σε όλες τις δοκούς (ακόμη και στους βραχίονες των τοιχωμάτων T1 και T2 που αποτελούν συνέχεια δοκού), εκτός βεβαίως από τις δοκούς του τελευταίου ορόφου όπου λείπουν τα σημαντικά φορτία των τοιχοπληρώσεων. Η θεώρηση αυτή είναι σαφές ότι απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα, και υιοθετείται στο παρόν καθαρά για λόγους ταχύτητας της προσομοίωσης. Τονίζεται πως κανονικά πρέπει να προηγείται αναλυτικός υπολογισμός μόνιμων και μεταβλητών κατακόρυφων δράσεων και να ακολουθούνται συγκεκριμένες πρακτικές για την κατανομή τους στις δοκούς του φορέα.

Υπολογισμός κατακόρυφων φορτίων φορέα βάσει Ευρωκώδικα

Τα μόνιμα φορτία υπολογίζονται βάσει των ίδιων βαρών σκυροδέματος και δομικών υλικών που αφορούν. Ενδεικτικές τιμές ειδικού βάρους για διάφορα υλικά παρέχονται στο πληροφοριακού χαρακτήρα **Παράρτημα Α** του **EC1**. Ενδεικτικά, προτείνεται ειδικό βάρος οπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 25kN/m^3 (24kN/m^3 για το σκυρόδεμα και προσαύξηση 1kN/m^3 για κανονικό ποσοστό χάλυβα οπλισμού, όπως φαίνεται στον **EC1, Table A.1**).

Για τον προσδιορισμό των μεταβλητών δράσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική η κατάταξη του φορέα στην κατάλληλη κατηγορία χρήσης (**EC1 §6.3.1.1 Table 6.1**). Βάσει των κατηγοριών αυτών, είναι δυνατή η χρήση τιμών για τα επιβαλλόμενα μεταβλητά φορτία σε πλάκες (**EC1 §6.3.1.2 Table 6.2** λαμβάνοντας υπόψη τις τροποποιήσεις που γίνονται στο **Εθνικό Προσάρτημα**). Ενδεικτικά, για χώρους κατοικιών και γραφείων προτείνεται τιμή κατανεμημένου μεταβλητού φορτίου ίση με 2.0kN/m^2 στις πλάκες και 5.0kN/m^2 στα μπαλκόνια.

Κατανομή κατακόρυφων φορτίων πλακών στις δοκούς

Για την κατανομή των κατακόρυφων φορτίων πλακών στις δοκούς χρησιμοποιείται συνήθως η λογική των επιφανειών επιρροής, οι οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες περιμετρικής έδρασης της κάθε πλάκας (ενδεικτική εικόνα στον **ΕΚΩΣ 2000 §Σ.9.1.5, Σχήμα 9.1**). Αν και η κατανεμημένη φόρτιση που προκύπτει στην κάθε δοκό από τα φορτία της πλάκας έχει τριγωνική ή τραπεζοειδή μορφή, επιτρέπεται συνήθως η κανονικοποίησή της σε ισοδύναμο, ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, βάσει συγκεκριμένης θεώρησης (ίσων τεμνουσών ή ίσων ροπών).

Διαδραστικό Αντικείμενο 9.3	Εφαρμογή
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται ο υπολογισμός των φορτίων πλάκας που μεταφέρονται στις γύρω δοκούς. Κατά τον υπολογισμό εξισώνεται η τριγωνική ή τραπεζοειδής επιφάνεια επιρροής της πλάκας με την αντίστοιχη «ισοδύναμη» ορθογωνική (υπολογισμός βάσει τεμνουσών). Μεταβάλλοντας τον τύπο της πλάκας αλλάζουν οι συνθήκες στήριξης στην περίμετρό της.</p>	

9.4.2. Υπολογισμός και ανάθεση μάζας φορέα

Σε κτίρια με εξασφαλισμένη διαφραγματική λειτουργία πλακών, η μάζα του φορέα μπορεί να θεωρηθεί συγκεντρωμένη στα επίπεδα των ορόφων και μάλιστα στο κέντρο βάρους τους. Θα πρέπει συνεπώς να υπολογιστεί η μάζα και η ροπή αδράνειας μάζας σε κάθε όροφο του φορέα και να ανατεθεί με κατάλληλο τρόπο στο προσομοίωμα.

Προσομοίωση μάζας φορέα κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση (αδρανειακό προσομοίωμα φορέα)

Κατά τη σεισμική καταπόνηση κτιρίων με διασφαλισμένη διαφραγματική λειτουργία, η μάζα του κτιρίου (που σχετίζεται άμεσα με τις θέσεις εφαρμογής της σεισμικής-αδρανειακής φόρτισης) μπορεί να θεωρηθεί συγκεντρωμένη στα επίπεδα των ορόφων (EC8 §4.2.1.5(1)). Επίσης, στην περίπτωση που οι πλάκες μπορούν να θεωρηθούν διαφράγματα στο επίπεδό τους, οι ιδιότητες της μάζας και της ροπής αδράνειας μάζας μπορούν να θεωρηθούν συγκεντρωμένες στο κέντρο βάρους του κάθε ορόφου (EC8 §4.3.1(4)). Βεβαίως, για τη διασφάλιση της διαφραγματικής λειτουργίας, θα πρέπει να συντρέχουν οι προϋποθέσεις που ορίζονται στον EC8 (§4.4.2.5 και §5.10).

Ο υπολογισμός των μαζών (EC8 §4.3.1(10)P) γίνεται από το συνδυασμό των κατακόρυφων φορτίων (EC8 §3.2.4(2)P και §4.2.4(2)P):

$$\Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (9.5)$$

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2i} \quad (9.6)$$

Στην παραπάνω σχέση, οι συνιστώμενες τιμές για τον συντελεστή φ ισούνται με 1.0 για τον τελευταίο όροφο (στέγη), 0.8 για συσχετισμένη χρήση ορόφων και 0.5 για ασυσχέτιστη χρήση ορόφων (οι τιμές αφορούν κατηγορίες χρήσης A-C που συμπεριλαμβάνουν χώρους διαμονής και συνάθροισης κοινού εκτός πολυκαταστημάτων, όπως ορίζονται στον EC1 §6.3.1.1(2)P). Για τις κατηγορίες χρήσης που αναφέρθηκαν λαμβάνεται $\psi_{2i}=0.3$, όπως προκύπτει από τον ECO §6.4.3.4 και §A1.3.2-§A1.3.2 (Tables A1.1 και A1.3).

Αντίστοιχες προβλέψεις με τις παραπάνω εμπεριέχονται και στον EAK 2000, αναφορικά τόσο με τη θεώρηση της μάζας στα επίπεδα των ορόφων (EAK 2000 §3.2.1[2]), όσο και τη συγκέντρωσή της στο κέντρο βάρους του κάθε ορόφου (EAK 2000 §3.2.2[2]). Στην περίπτωση όμως του EAK 2000, διέφερε ο υπολογισμός της μάζας που λαμβάνεται υπόψη κατά τη σεισμική καταπόνηση (EAK 2000 §3.2.2[3] και §4.1.2.1[4]).

Από το Κεφάλαιο 5, λαμβάνονται οι τιμές των μόνιμων και μεταβλητών φορτίων δοκών $G=19.5\text{kN/m}$ για τους τυπικούς ορόφους, $G=13.0\text{kN/m}$ για τον τελευταίο όροφο, και $Q=5.5\text{kN/m}$ για όλους τους ορόφους. Υπενθυμίζεται πως τα εν λόγω μόνιμα φορτία συμπεριλαμβάνουν τα ίδια βάρη της κατασκευής. Καθώς το συνολικό μήκος δοκών ορόφου είναι ίσο με 120m (4 πλαίσια των 18m κατά X και 4 πλαίσια των 12m κατά Y), μπορούν να υπολογιστούν τα συνολικά φορτία σε κάθε έναν από τους 4 ορόφους ως εξής:

$$G_{1-3} = 19.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 120\text{m} = 2340\text{kN} \quad (9.7)$$

$$G_4 = 13.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 120\text{m} = 1560\text{kN} \quad (9.8)$$

$$Q_{1-4} = 5.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 120\text{m} = 660\text{kN} \quad (9.9)$$

Τελικά, τα συνολικά κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού και οι αντίστοιχες μάζες για ορόφους με ασυσχέτιστη χρήση προκύπτουν:

$$G_{1-3} + \psi_{E,1-3} \cdot Q_{1-3} = 2340 + (0.5 \cdot 0.3) \cdot 660 = 2439\text{kN} \quad (9.10)$$

$$G_4 + \psi_{E,4} \cdot Q_{k,4} = 1560 + (1.0 \cdot 0.3) \cdot 660 = 1758 \text{ kN} \quad (9.11)$$

$$m_{1-3} = \frac{G_{1-3} + \psi_{E,1-3} \cdot Q_{1-3}}{g} = 248.62 \text{ t} \quad (9.12)$$

$$m_4 = \frac{G_4 + \psi_{E,4} \cdot Q_4}{g} = 179.20 \text{ t} \quad (9.13)$$

Η ροπή αδράνειας μάζας, θεωρώντας πως η μάζα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην πλάκα, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$J_m = m \cdot \left(\frac{L_x^2 + L_y^2}{12} \right) \quad (9.14)$$

Στην παραπάνω σχέση m είναι η συνολική μάζα ορόφου ενώ L_x και L_y οι διαστάσεις της κάτοψης. Τελικά προκύπτει:

$$J_{m,1-3} = 248.62 \text{ t} \cdot \left(\frac{18^2 + 12^2}{12} \right) \text{ m}^2 = 9696.18 \text{ tm}^2 \quad (9.15)$$

$$J_{m,4} = 179.20 \text{ t} \cdot \left(\frac{18^2 + 12^2}{12} \right) \text{ m}^2 = 6988.80 \text{ tm}^2 \quad (9.16)$$

Θέση κέντρου μάζας κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση

Σύμφωνα με τον **EC8 §4.3.2(1)P** (αντίστοιχα και **EAK 2000 §3.3.1**), για τον συνυπολογισμό στρεπτικών φαινομένων που προκύπτουν από τις αβεβαιότητες αναφορικά με την ακριβή κατανομή των μαζών στην κάτοψη και τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης, το κέντρο μάζας του κάθε ορόφου πρέπει να λαμβάνεται μετατοπισμένο σε κάθε διεύθυνση κατά την τυχηματική εκκεντρότητα:

$$e_{oi} = \pm 0.05 \cdot L_i \quad (9.17)$$

Συνολικά προκύπτουν τέσσερις (4) θέσεις ανάλυσης, δυο με μετατόπιση της μάζας κατά τη διεύθυνση X και δυο κατά τη διεύθυνση Y . Λόγω της μετατόπισης της θέσης που τίθεται η μάζα του ορόφου, απαιτείται και τροποποίηση της τιμής της ροπής αδράνειας μάζας. Κατά τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά από τους Αβραμίδη, Αθανατοπούλου, Μορφίδη και Σέξτο (2011), η νέα τιμή της ροπής αδράνειας μάζας προκύπτει:

$$J'_{m,i} = J_{m,i} + m_i \cdot e_{oi}^2 \quad (9.18)$$

Εναλλακτικά της παραπάνω διαδικασίας μετατόπισης της θέσης της μάζας, ο **EC8 §4.3.3.3(1)** δίνει τη δυνατότητα συνυπολογισμού των στρεπτικών δράσεων με τη χρήση στατικής επιβαλλόμενων στρεπτικών ροπών στο κέντρο βάρους της κάτοψης. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση που η προσομοίωση της μάζας επιλέγεται να γίνει με τη μορφή σημειακά κατανεμημένης μάζας σε όλους τους κόμβους της κάτοψης (στην περίπτωση αυτή αρκεί η ανάθεση μεταφορικών μαζών στους κόμβους και δεν απαιτείται ο υπολογισμός τιμών ροπής αδράνειας μάζας).

Σημειώνεται πως εάν η κατανομή των τοιχοπληρώσεων δεν είναι ομοιόμορφη, η επιρροή των τυχηματικών εκκεντροτήτων θα πρέπει να λαμβάνεται διπλάσια (**EC8 §4.3.6.3.1(4)**).

Για να ληφθεί υπόψη η τυχηματική εκκεντρότητα, θα πρέπει η θέση που ανατίθεται η μάζα να ληφθεί μετατοπισμένη σε σχέση με το κέντρο μάζας του ορόφου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εξετάζεται ενδεικτικά μια από τις τέσσερις (4) θέσεις μάζας που προκύπτουν, αυτή όπου λαμβάνεται υπόψη θετική μετατόπιση κατά τον άξονα X ίση με:

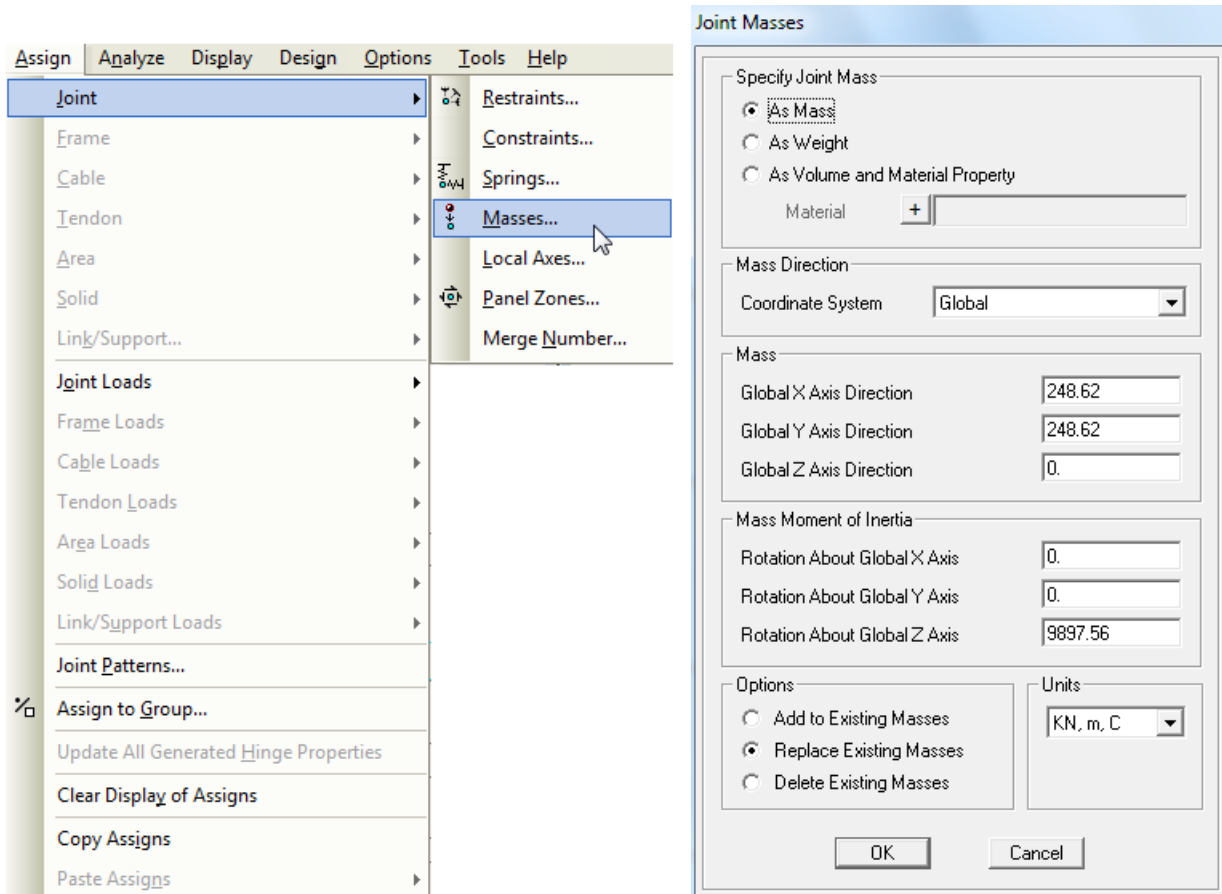
$$e_{oi} = 0.05 \cdot L_{xi} = 0.05 \cdot 18 \text{ m} = 0.90 \text{ m} \quad (9.19)$$

Προκύπτει τροποποίηση της ροπής αδράνειας μάζας ως εξής:

$$J'_{m,1-3} = J_{m,1-3} + m_{1-3} \cdot e_{a,1-3}^2 = 9696.18 + 248.62 \cdot 0.9^2 = 9897.56 \text{tm}^2 \quad (9.20)$$

$$J'_{m,4} = J_{m,4} + m_4 \cdot e_{a,4}^2 = 6988.80 + 179.20 \cdot 0.9^2 = 7133.95 \text{tm}^2 \quad (9.21)$$

Αρχικά επιλέγονται οι κόμβοι στο γεωμετρικό κέντρο της κάθε πλάκας και μετακινούνται κατά $+0.90\text{m}$ στη διεύθυνση X (*Edit* → *Move*). Στη συνέχεια, επιλέγονται οι κόμβοι των 3 πρώτων ορόφων και ανατίθενται οι παραπάνω τιμές μάζας και ροπής αδράνειας μάζας, με χρήση της εντολής *Assign* → *Joint* → *Masses* (Σχήμα 9.18). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον τελευταίο όροφο που έχει διαφορετικές τιμές παραμέτρων μάζας.



Σχήμα 9.18 Ανάθεση μεταφορικής μάζας και ροπής αδράνειας μάζας στο κέντρο βάρους του κάθε ορόφου (ενδεικτικά στο Σχήμα για τους 3 πρώτους ορόφους).

9.5. Υπολογισμός και ανάθεση φάσματος σχεδιασμού του EC8

Σύμφωνα με τα δεδομένα της εκφώνησης, η περιοχή του φορέα βρίσκεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I, το έδαφος είναι κατηγορίας B, ενώ ο σχεδιασμός αφορά κατηγορία πλαστιμότητας μέση. Παράλληλα, η κατασκευή αφορά σύνηθες κτίριο με ορόφους δίχως συσχετισμένη χρήση. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων (σχεδιασμού) στην οριζόντια διεύθυνση του *EC8* (§3.2.2.5), σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (9.22)$$

$$T_b \leq T \leq T_c: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \quad (9.23)$$

$$T_c \leq T \leq T_d: S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_c}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (9.24)$$

$$T_d \leq T: S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_c \cdot T_d}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (9.25)$$

Διαδραστικό Αντικείμενο 9.4	Εφαρμογή
Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται ο υπολογισμός και η σχεδίαση του φάσματος σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 (EC8) για παραμέτρους που ισχύουν στην Ελλάδα βάσει του σχετικού Εθνικού Παραρτήματος.	

Προσδιορισμός συντελεστή συμπεριφοράς q

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q παίζει ιδιαίτερο ρόλο στη φιλοσοφία των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών. Ο συντελεστής q μειώνει τις σεισμικές δράσεις κατά την ελαστική ανάλυση, επιτρέποντας ουσιαστικά την ανελαστική απόκριση του φορέα (εμφάνιση βλαβών με μορφή πλαστικών αρθρώσεων) κατά το σεισμό σχεδιασμού. Επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτόν εκμετάλλευση της υπεραντοχής της κατασκευής, αρκεί να πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις αναφορικά με τη μόρφωση του φέροντος οργανισμού και τη διαστασιολόγηση των κρίσιμων, για τη σεισμική απόκριση, δομικών στοιχείων.

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q , βάσει του **EC8 §5.2.2.2**, θα πρέπει πρώτα το στατικό σύστημα να κατηγοριοποιηθεί σε έναν από τους τύπους που αναφέρονται στην **§5.1.2**. Είναι σαφές πως ο φορέας χαρακτηρίζεται ως διπλό σύστημα (μικτό σύστημα πλαισίων και τοιχωμάτων), με ερωτηματικό το ποσοστό ανάληψης σεισμικών δυνάμεων από τα τοιχώματα σε σχέση με τη συνολική σεισμική δύναμη που αναπτύσσεται. Θα πρέπει συνεπώς να γίνει κάποια μορφή σεισμικής ανάλυσης, προκειμένου να προσδιοριστεί το εν λόγω ποσοστό.

Ο **EC8** δεν περιγράφει κάποια συγκεκριμένη διαδικασία ή είδος ανάλυσης, τύπο και κατανομή φόρτισης κτλ, ώστε να γίνει η παραπάνω διάκριση. Κρίνεται σκόπιμο (Αβραμίδης και συνεργάτες, 2011) να διενεργηθούν δυο ανεξάρτητες στατικές αναλύσεις, υπό τη δράση οριζόντιων φορτίων στο κέντρο μάζας του ορόφου. Τα φορτία αυτά θα ληφθούν κατανομημένα βάσει της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (**EC8 §4.3.3.2**), όπως αυτή εφαρμόστηκε στο Κεφάλαιο 5. Καθώς για τον προσδιορισμό του στατικού συστήματος ενδιαφέρει μόνο η κατανομή και όχι η ακριβής τιμή των οριζόντιων δράσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι φορτιστικές καταστάσεις E_x και E_y , με τις ίδιες τιμές φορτίων που είχαν προσδιοριστεί για την περίπτωση του αρχικού φορέα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όπως και τα σχετικά ποσοστά παραλαβής σεισμικής δύναμης ανά κατεύθυνση, εμφανίζονται στον Πίνακα 9.2 (οι τιμές προκύπτουν ως αντιδράσεις στήριξης στη βάση των τοιχωμάτων για τις εν λόγω φορτιστικές καταστάσεις). Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα του Πίνακα αφορούν θέσεις επιβολής της οριζόντιας φόρτισης σε κόμβους στο κέντρο βάρους της κάθε πλάκας, πριν δηλαδή τη μετακίνηση των συγκεκριμένων κόμβων λόγω της τυχηματικής εκκεντρότητας που περιγράφηκε προηγουμένως.

	Φόρτιση Ex	Φόρτιση Ey
Τέμνουσα βάσης φορέα	951.42kN	951.42kN
Τοίχωμα T1	486.98kN	-
Τοίχωμα T2	-	320.76kN
Τοίχωμα T3	-	309.83kN
Ποσοστό τοιχωμάτων	51.18%	66.28%

Πίνακας 9.2 Προσδιορισμός ποσοστού παραλαβής σεισμικής δύναμης από τα τοιχώματα (λαμβάνεται υπόψη η σεισμική δύναμη του κάθε τοιχώματος μόνο στην ισχυρή του διεύθυνση).

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα, διαπιστώνεται πως το στατικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί (**EC8 §5.1.2(1)**):

- Στη διεύθυνση **X**: Διπλό σύστημα ισοδύναμο προς σύστημα τοιχωμάτων (οριακά άνω του 50%).
- Στη διεύθυνση **Y**: Σύστημα τοιχωμάτων (οριακά άνω του 65%).
- Η σχέση υπολογισμού του συντελεστή συμπεριφοράς δίνεται (**EC8 §5.2.2.2()**):

$$q = q_o \cdot k_w \geq 1.5 \quad (9.26)$$

Στην παραπάνω σχέση, για πλαισιακά ή ισοδύναμα συστήματα ισχύει $k_w=1$ (**EC8 §5.2.2.2(11)P**). Για συστήματα τοιχωμάτων ή ισοδύναμα προς τοιχώματα διπλά συστήματα λαμβάνεται:

$$k_w = \frac{1 + a_o}{3} \leq 1.0, \quad a_o = \frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}} \quad (9.27)$$

Για τον προσδιορισμό του a_o , υπολογίζεται ανά διεύθυνση το συνολικό ύψος των τοιχωμάτων και διαιρείται με το συνολικό τους μήκος. Προκύπτει:

- Στη διεύθυνση **X**: $a_o=12/2.5=4.8$ και $k_w=1.93$ άρα λαμβάνεται $k_w=1.0$.
- Στη διεύθυνση **Y**: $a_o=(12+12)/(2+2)=6.0$ και $k_w=2.33$ άρα λαμβάνεται $k_w=1.0$.

Η τιμή του q_o λαμβάνεται από τον **EC8 §5.2.2.2(2), Table 5.1**. Για κατηγορία πλαστιμότητας μέση (DCM) του φέροντος οργανισμού, μπορεί να ληφθεί:

- Στη διεύθυνση **X**: $q_o=3.0a_w/\alpha_1$ για διπλό (μικτό) σύστημα ισοδύναμο προς σύστημα τοιχωμάτων. Από τον **EC8 §5.2.2.2(5)b** προκύπτει $a_w/\alpha_1=1.2$, $q_o=3.6$ και τελικά $q_x=3.6$. Σημειώνεται πως για τη θεώρηση των συγκεκριμένων τιμών a_w/α_1 θεωρείται πως το κτίριο πληροί τα κριτήρια κανονικότητας σε κάτοψη (**EC8 §4.2.3.2**).
- Στη διεύθυνση **Y**: $q_o=3.0$ για σύστημα τοιχωμάτων, οπότε $q_y=3.0$.

Προκύπτει συνεπώς διαφορετικός συντελεστής συμπεριφοράς στις δυο διευθύνσεις για τον φορέα του παραδείγματος που εξετάζεται (αντίστοιχη περίπτωση παρατίθεται σε παράδειγμα από τον Φαρδή, 2011). Σημειώνεται επίσης, πως στην τιμή του παραπάνω συντελεστή συμπεριφοράς ενσωματώνεται και οποιαδήποτε απόκλιση της ιξώδους απόσβεσης από την τιμή αναφοράς 5%.

Είναι σαφές πως υπάρχει μια σημαντική πολυπλοκότητα στον προσδιορισμό του συντελεστή συμπεριφοράς, εξαρτώμενη συχνά από παραμέτρους που προϋποθέτουν τη γνώση κάποιων αποτελεσμάτων ανάλυσης (π.χ. για το χαρακτηρισμό του φέροντος συστήματος βάσει **EC8 §5.1.2(1)**). Μια συνοπτική εικόνα τιμών συντελεστή συμπεριφοράς για διάφορες περιπτώσεις φέροντος συστήματος μπορεί να βρεθεί στους Φαρδή, Κόλια, Παναγιωτάκο και Κανιτάκη (2009). Παράλληλα, η διαφορετική τιμή συντελεστή συμπεριφοράς ανά διεύθυνση δημιουργεί κάποιους προβληματισμούς σχετικά με τη χωρική επαλληλία των μεγεθών απόκρισης, όπως αναλύεται από τους Αβραμίδη και συνεργάτες (2011). Στους τελευταίους, μπορούν να βρεθούν και ιδιαίτερα χρήσιμα διαγράμματα ροής για τη διευκόλυνση των πολύπλοκων υπολογισμών που απαιτούνται κατά τη διαδικασία που περιγράφηκε, όπως και μια αναλυτική διαδικασία υπολογισμού των κριτηρίων κανονικότητας σε κάτοψη του **EC8 (§4.2.3.2(6))**.

Παράμετροι υπολογισμού φάσματος σχεδιασμού του EC8

Για τον φορέα του παραδείγματος λαμβάνεται συντελεστής κάτω ορίου φάσματος σχεδιασμού $\beta=0.2$ (EC8, §3.2.2.5(4)P του Εθνικού Προσαρτήματος) και συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma_i=1.0$ για κατηγορία σπουδαιότητας II (συνήθη κτίρια από EC8 §4.2.5(4) με παραπομπή στο §4.2.5(5)P του Εθνικού Προσαρτήματος).

Η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού λαμβάνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, όπου η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση για Σεισμική Ζώνη Ι ισούται με 0.16g (EC8, Πίνακας ΕΠ.1 του Εθνικού Προσαρτήματος):

$$a_g = \gamma_i \cdot a_{gR} = 0.16g \quad (9.28)$$

Διευκρινίζεται πως, βάσει του Εθνικού Προσαρτήματος του EC8, στην Ελλάδα λαμβάνεται υπόψη το οριζόντιο φάσμα απόκρισης Τύπου 1 (μέγεθος σεισμού $M \geq 5.5$), όπως αυτό καθορίζεται από τον EC8 §3.2.2.2(2)P, οπότε για έδαφος Β προκύπτει $S=1.2$, $T_B=0.15s$, $T_C=0.50s$, $T_D=2.50s$ (Πίνακας ΕΠ.3 του Εθνικού Προσαρτήματος).

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, και παρόλο που οι Σεισμικές Ζώνες είναι ίδιες με τον πρόσφατο Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (EAK 2000 με βάση την τροποποίηση του 2003), στον EC8 προκύπτει ελαφρώς διαφορετική μορφή του φάσματος σχεδιασμού. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στον συντελεστή S , ο οποίος εξαρτάται από την κατηγορία εδάφους, στην ελαφρώς διαφορετική μορφή των εξισώσεων υπολογισμού, αλλά και στην αρκετά διαφορετική θεώρηση της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q που αναλύθηκε παραπάνω. Ειδικά για την κατηγοριοποίηση των εδαφικών συνθηκών σε τύπους εδάφους, πρόσθετες πληροφορίες και σχετική αξιολόγηση των κανονιστικών προβλέψεων μπορούν να βρεθούν στους Bouckovalas, Papadimitriou and Karamitros (2006) και στους Pitilakis, Riga and Anastasiadis (2013).

Τέλος, σημειώνεται πως η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού λαμβάνεται υπόψη μόνο για τιμές κατακόρυφης εδαφικής επιτάχυνσης μεγαλύτερες του 0.25g και φορείς με συγκεκριμένα δομικά χαρακτηριστικά (EC8 §4.3.3.5.2).

Επιρροή τοιχοποιίας πλήρωσης στη σεισμική απόκριση των κατασκευών

Είναι ευρέως γνωστό πως οι τοιχοποιίες πλήρωσης επηρεάζουν γενικότερα τη σεισμική συμπεριφορά κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος, αυξάνοντας τη δυσκαμψία του, ενώ ταυτόχρονα αποτελούν μια πρώτη ζώνη άμυνας κατά τη σεισμική καταπόνηση (ενδεικτικές αναφορές Asteris & Cotsonos, 2012· Calvi & Bolognini, 2001· Fardis & Panagiotakos, 1997· Kakaletsis & Karayiannis, 2009· Kappos, Stylianidis, & Michailidis, 1998). Κατά τη μελέτη φορέων υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας, θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την επιρροή των τοιχοπληρώσεων σε συστήματα πλαισίων ή μικτά συστήματα ισοδύναμα με πλαισιακά, εφόσον συντρέχουν οι προϋποθέσεις που αναφέρονται στον EC8 §4.3.1.(8) και §4.3.6. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται ο συνυπολογισμός των συνεπειών μη-κανονικότητας σε κάτοψη (ασύμμετρη διάταξη τοιχοπληρώσεων) ή καθ' ύψος (έλλειψη τοιχοπληρώσεων σε κάποιους ορόφους σε σύγκριση με άλλους). Αν κάποια κριτήρια δεν πληρούνται, τότε, ανάλογα με την περίπτωση, επιβάλλεται αύξηση των αποτελεσμάτων της τυχηματικής εκκεντρότητας, συντελεστής μεγέθυνσης στα εντατικά μεγέθη δομικών στοιχείων ή απαίτηση συμμετοχής των τοιχοπληρώσεων στο προσομοίωμα. Για συστήματα τοιχωμάτων ή μικτά συστήματα ισοδύναμα προς τοιχώματα η επίδραση των τοιχοπληρώσεων μπορεί να αγνοηθεί.

Λόγω του διαφορετικού συντελεστή συμπεριφοράς σε κάθε εξεταζόμενη διεύθυνση για τα δεδομένα του φορέα που εξετάζεται, προκύπτουν δυο διαφορετικά φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων βάσει του EC8. Τα ζεύγη τιμών ιδιοπεριόδου-φασματικής επιτάχυνσης εμφανίζονται στον Πίνακα 9.3, ενώ η απεικόνιση του φάσματος σχεδιασμού επιταχύνσεων σε κάθε διεύθυνση βάσει EC8, συγκρινόμενη με το αντίστοιχο φάσμα του EAK 2000, παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.19.

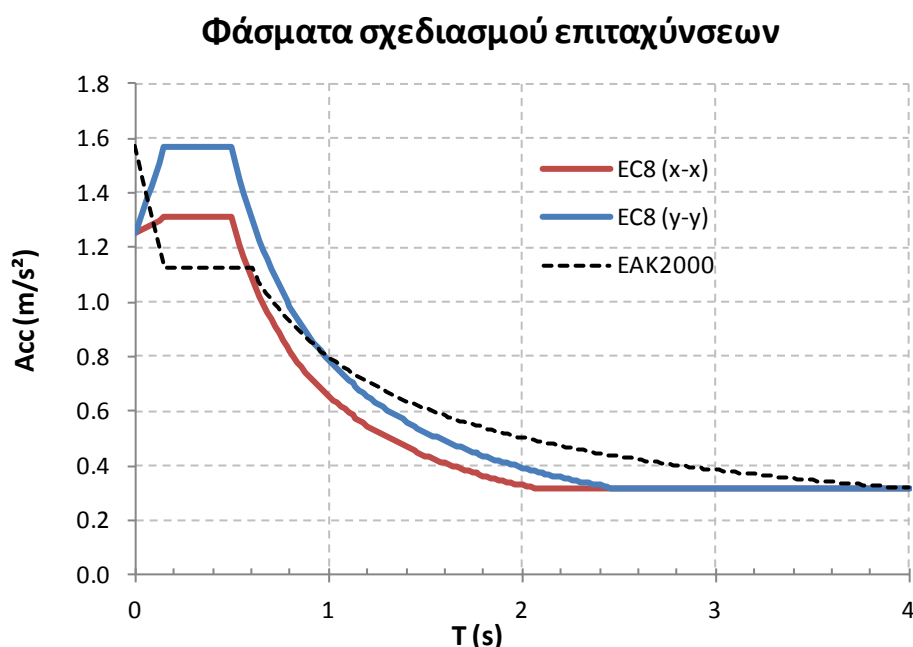
T(s)	$S_{d,x}(T)$ (m/s ²)	$S_{d,y}(T)$ (m/s ²)	T(s)	$S_{d,x}(T)$ (m/s ²)	$S_{d,y}(T)$ (m/s ²)
0.00	1.256	1.256	1.40	0.467	0.561
0.15	1.308	1.570	1.60	0.409	0.491
0.50	1.308	1.570	1.80	0.363	0.436
0.60	1.090	1.308	2.00	0.327	0.392
0.70	0.934	1.121	2.08	0.314	0.377
0.80	0.818	0.981	2.20	0.314	0.357
0.90	0.727	0.872	2.40	0.314	0.327
1.00	0.654	0.785	2.50	0.314	0.314
1.20	0.545	0.654	4.00	0.314	0.314

Πίνακας 9.3 Τιμές των φασμάτων σχεδιασμού επιταχύνσεων του EC8 για τα δεδομένα του παραδείγματος που εξετάζεται. Επισημαίνονται με έντονη γραφή οι τιμές ιδιοπεριόδου όπου ανά διεύθυνση προκύπτει η ελάχιστη τιμή φασματικής επιτάχυνσης.

Παρατηρήσεις κατά τον προσδιορισμό της συνάρτησης του φάσματος σχεδιασμού του EC8

Ο προσδιορισμός του φάσματος σχεδιασμού επιταχύνσεων του EC8 για την εισαγωγή του σε κάποιο πρόγραμμα ανάλυσης, περιλαμβάνει τον υπολογισμό μιας σειράς από ζεύγη τιμών ιδιοπεριόδου-φασματικής επιτάχυνσης (Πίνακας 9.3). Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών από τον μελετητή, απαιτείται η προσεκτική επισκόπηση των παραμέτρων του φάσματος. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται:

- Υπολογισμός στις χαρακτηριστικές τιμές ιδιοπεριόδων του φάσματος $T=0$, T_B , T_C και T_D . Για τον ορισμό της περιοχής έως την τιμή T_C αρκούν οι τιμές φασματικής επιτάχυνσης στις χαρακτηριστικές θέσεις του φάσματος, καθώς τα ενδιάμεσα τμήματα είναι ευθύγραμμα και προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή. Για ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες της T_C απαιτείται μια πύκνωση των τιμών (αυξάνοντας την πύκνωση αυξάνεται η ακρίβεια), καθώς πλέον το διάγραμμα δεν είναι ευθύγραμμο.
- Προσδιορισμός της τιμής του T όπου τυχόν παρατηρείται η ελάχιστη τιμή φασματικής επιτάχυνσης από την εξίσωση 9.24 (αρκεί μια επίλυση ως προς T η οποία θα πρέπει να δίνει τιμή μικρότερη του T_D , διαφορετικά η τιμή αυτή αναζητείται στο εύρος περιόδων της επόμενης εξίσωσης). Για περιόδους μεγαλύτερες της συγκεκριμένης T , το φάσμα πλέον παρουσιάζει μια σταθερή ελάχιστη τιμή φασματικής επιτάχυνσης. Στην περίπτωση που εξετάζεται, η υπέρβαση αυτή συμβαίνει στο συγκεκριμένο εύρος τιμών για το φάσμα κατά τη διεύθυνση X , σε τιμή $T=2.08s$, οπότε και αλλάζει η τελική τιμή της φασματικής επιτάχυνσης σχεδιασμού από την ιδιοπερίοδο αυτή και άνω (έως το τέλος του φάσματος).
- Αν η εν λόγω υπέρβαση δεν παρατηρείται στην Εξίσωση 9.24, τότε πρέπει να γίνει προσδιορισμός της τιμής του T όπου τυχόν παρατηρείται η ελάχιστη τιμή φασματικής επιτάχυνσης από την Εξίσωση 9.25 (ομοίως αρκεί μια επίλυση ως προς T , η οποία θα πρέπει να δίνει τιμή ίση ή μεγαλύτερη με το T_D). Καθώς στο τρέχον παράδειγμα στη διεύθυνση X η ελάχιστη τιμή έχει ήδη προκύψει στο προηγούμενο εύρος ιδιοπεριόδων, δεν απαιτείται η συγκεκριμένη διερεύνηση. Απαιτείται όμως στη διεύθυνση Y , όπου από την επίλυση προκύπτει τιμή $T=2.50s$.



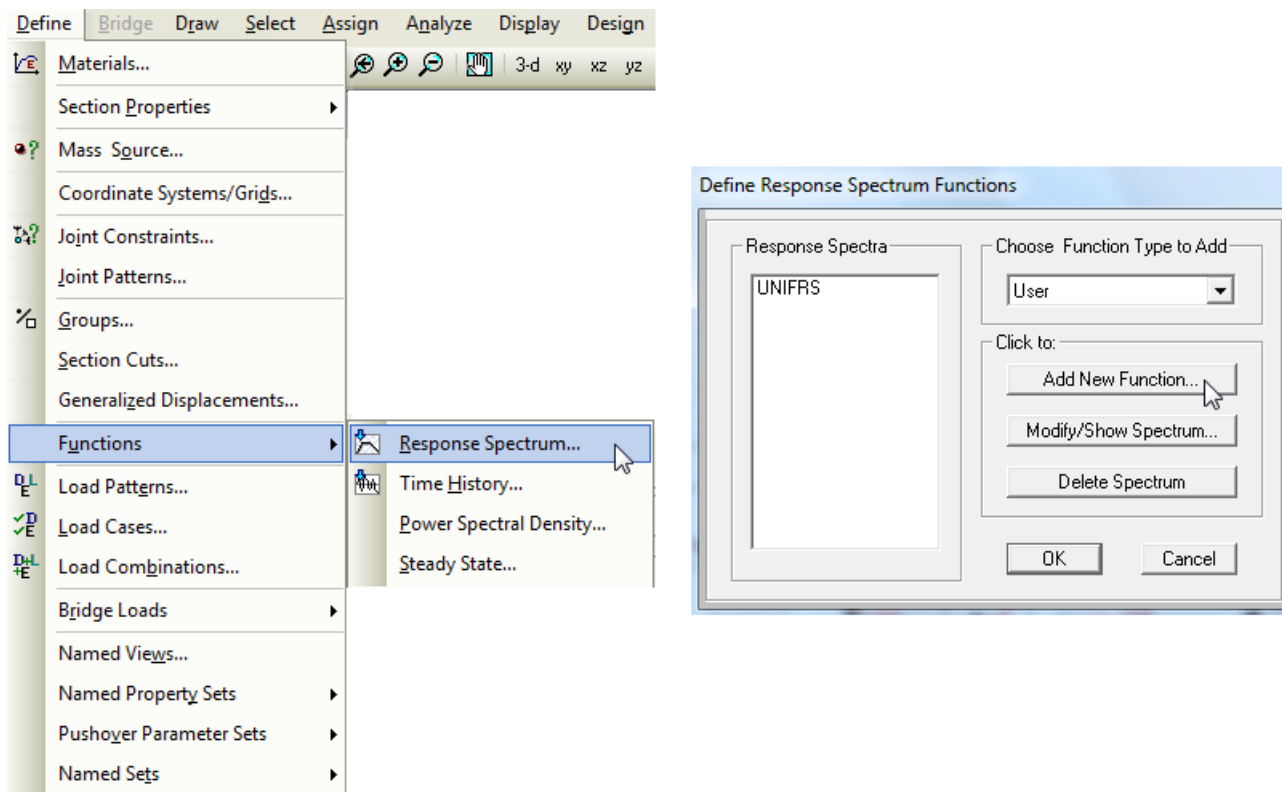
Σχήμα 9.19 Φάσματα σχεδιασμού επιταχύνσεων του EC8 για τα δεδομένα του παραδείγματος που εξετάζεται και σύγκριση με το φάσμα του EAK 2000.

Φάσμα σχεδιασμού για την περίπτωση του αρχικού φορέα δίχως τοιχώματα (Κεφάλαιο 5)

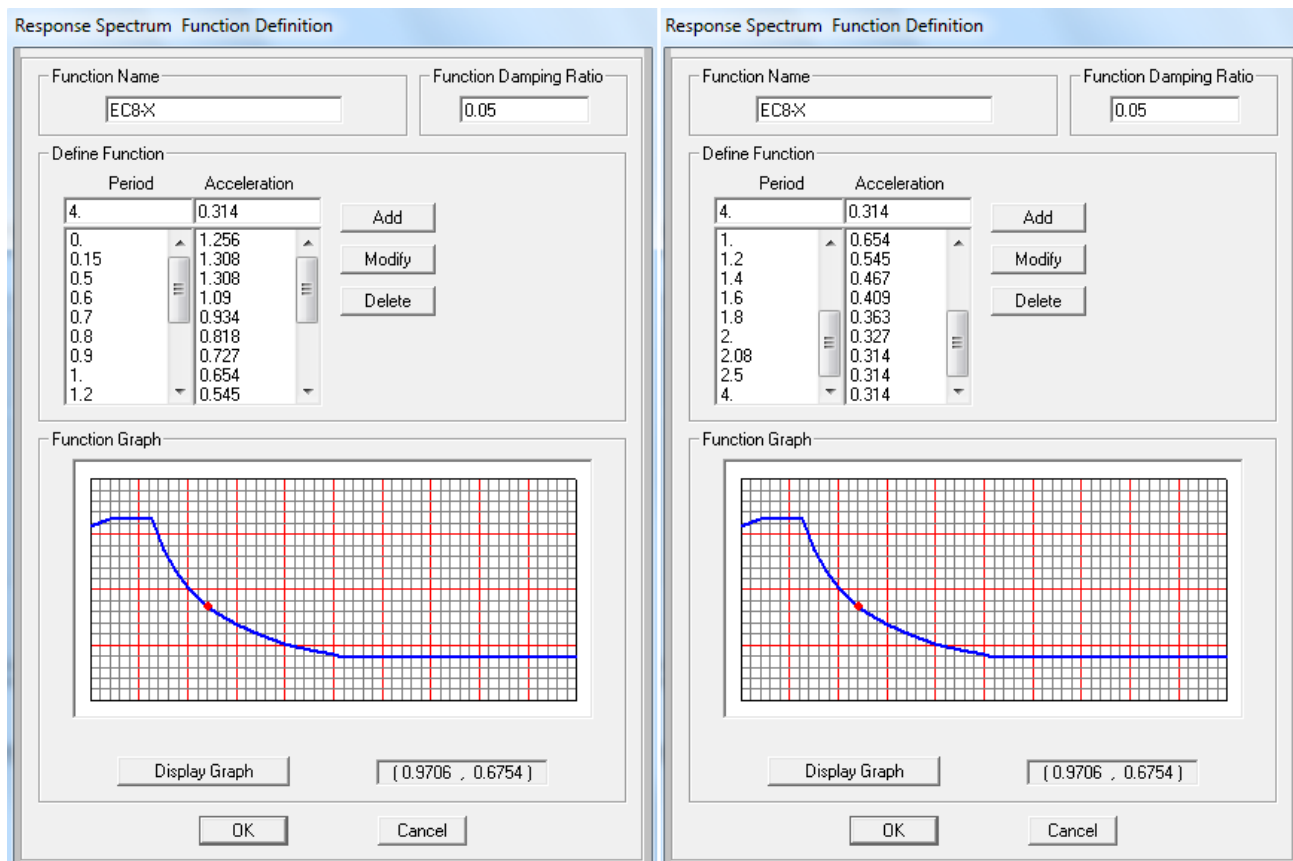
Σημειώνεται πως η περίπτωση του αρχικού φορέα του Κεφαλαίου 5 αφορά πολυώροφο, πολύστυλο πλαισιακό στατικό σύστημα (δεν υπάρχουν καθόλου τοιχώματα). Ως εκ τούτου, στους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, η τιμή α_w/α_1 λαμβάνεται ίση με 1.3 (EC8 §5.2.2.2(5)), ενώ ο συντελεστής συμπεριφοράς q προκύπτει ίσος με 3.9, με αποτέλεσμα να τροποποιείται το φάσμα σχεδιασμού του φορέα σε σχέση με τα φάσματα που υπολογίστηκαν στο παρόν. Η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης για περίοδο $T=0.48s$, που απαιτήθηκε για τον προσδιορισμό της σεισμικής τέμνουσας βάσης στο Κεφάλαιο 5, προκύπτει ίση με $1.21m/s^2$.

Για την εκτέλεση δυναμικής φασματικής ανάλυσης θα πρέπει αρχικά να δοθεί στο πρόγραμμα το σχήμα του κάθε φάσματος, όπως αυτά υπολογίστηκαν προηγουμένως. Αυτό μπορεί να γίνει από την εντολή *Define* → *Functions* → *Response Spectrum* (Σχήμα 9.20). Από την επιλογή *Choose Function Type to Add* επιλέγεται προσθήκη φάσματος τύπου *User*, όπου ο χρήστης καθορίζει με ζεύγη τιμών την ακριβή μορφή του φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, με την εντολή *Add New Function*, γίνεται βήμα-βήμα η εισαγωγή του κάθε φάσματος ως ζεύγη τιμών ιδιοπεριόδου (*Period*) και επιτάχυνσης (*Acceleration*), όπως υπολογίστηκαν στον Πίνακα 9.3. Κατά την εισαγωγή του φάσματος ορίζεται αρχικά το κάθε ζεύγος τιμών, ενώ με *Add* προστίθεται στη λίστα που εμφανίζεται στο Σχήμα 9.21 (ενδεικτικά για το φάσμα κατά τη διεύθυνση *X*). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον ορισμό του φάσματος κατά *Y*.

Εναλλακτικά της παραπάνω διαδικασίας, η εισαγωγή των τιμών του φάσματος μπορεί να γίνει μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου κειμένου (txt), από την επιλογή *From File* (πεδίο *Choose Function Type to Add*) του προηγούμενου παραθύρου. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συχνά κατά την εισαγωγή δεδομένων σε μορφή λίστας σε κάποιο πρόγραμμα, και θα παρουσιαστεί σε επόμενο Κεφάλαιο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα απευθείας ορισμού φάσματος του EC8 από την επιλογή *EuroCode8 2004*. Στην περίπτωση αυτή, πέρα από τον ορισμό χώρας *other* για τη δυνατότητα παραμετροποίησης των τιμών που εμφανίζονται, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και στις τελικές τιμές των διαφόρων πεδίων που προκύπτουν, σε σχέση με όσα περιγράφονται στο *Εθνικό Προσάρτημα του EC8*.



Σχήμα 9.20 Εισαγωγή φάσματος σχεδιασμού από τον χρήστη.



Σχήμα 9.21 Ζεύγη τιμών ιδιοπεριόδου-επιτάχυνσης του φάσματος κατά X που υπολογίστηκε (σημειώνεται πως μετά την ελάχιστη τιμή φασματικής επιτάχυνσης σε $T=2.08s$ δεν απαιτούνται άλλα ζεύγη τιμών έως το $T=4.0s$).

9.6. Καθορισμός φορτιστικών καταστάσεων και συνδυασμών δράσεων

Ο ορισμός των νέων φορτιστικών καταστάσεων γίνεται από το *Define* → *Load Cases*. Εκεί υπάρχουν ήδη οι καταστάσεις *G*, *Q*, *Ex*, *Ey* που είχαν οριστεί από το προηγούμενο παράδειγμα. Οι σεισμικές καταστάσεις φόρτισης ειδικότερα, αφορούν την επιβολή των οριζόντιων φορτίων με ισοδύναμη στατική φόρτιση και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στο παρόν για την κατάταξη του φορέα στην κατάλληλη κατηγορία στατικού συστήματος.

Καθώς τα κατακόρυφα φορτία έχουν ήδη οριστεί στον αρχικό φορέα, θα πρέπει στη συνέχεια να οριστούν οι φορτιστικές καταστάσεις που αφορούν τη δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής. Για τον ορισμό της δυναμικής φασματικής ανάλυσης πρέπει να προηγηθεί ιδιομορφική ανάλυση του κτιρίου, ώστε οι ιδιομορφές που θα προκύψουν να χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα κατά τον υπολογισμό της δυναμικής του απόκρισης, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

9.6.1. Ορισμός ιδιομορφικής ανάλυσης φορέα

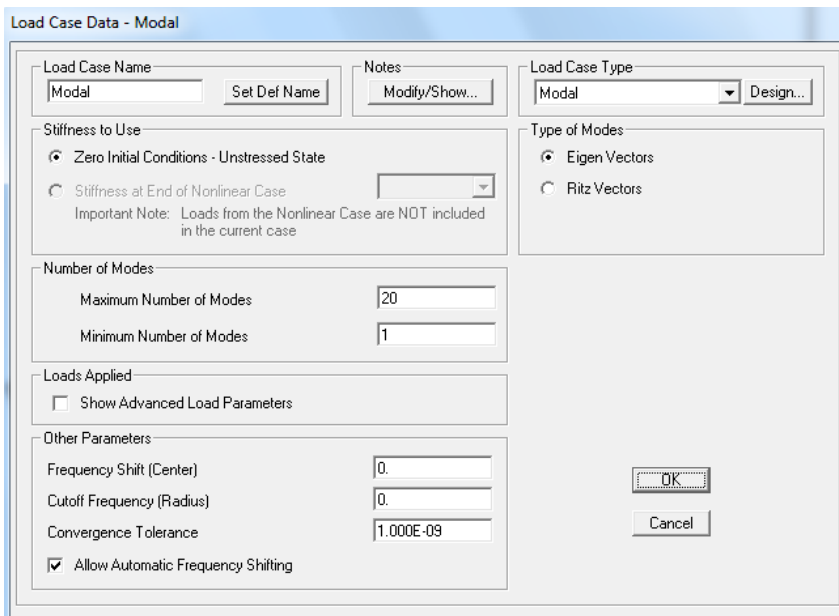
Ο ορισμός της ιδιομορφικής ανάλυσης του φορέα είναι απαραίτητος για την δυναμική φασματική ανάλυση που θα ακολουθήσει. Με την εντολή *Add New Load Case* ορίζεται νέα φορτιστική κατάσταση, στην οποία δίνεται ονομασία *Modal* και τύπος *Modal (Load Case Type)*. Λαμβάνοντας υπόψη πως σε κάθε όροφο η μάζα έχει δυο μεταφορικές ελευθερίες κίνησης (κατά *X* και *Y*) και μια στρεπτική γύρω από τον *Z* (λόγω της ροπής αδράνειας μάζας), για ένα τετραώροφο κτίριο αρκούν οι 12 ιδιομορφές που εμφανίζονται. Σε κάθε περίπτωση όμως μπορούν να ζητηθούν περισσότερες, ώστε να γίνει εμμέσως και ένας σχετικός έλεγχος του αδρανειακού προσομοιώματος (ενδεικτικά εδώ ζητούνται 20 ιδιομορφές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.22).

Από τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης θα προκύψει και ο βαθμός συμμετοχής της κάθε ιδιομορφής στην απόκριση του φορέα, ως ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας ανά διεύθυνση κίνησης. Σημειώνεται πως κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση υπάρχει απαίτηση ενεργοποίησης ποσοστού μάζας τουλάχιστο 90% της συνολικής μάζας του κτιρίου ανά διεύθυνση, ενώ παράλληλα πρέπει να συνυπολογίζονται όλες οι ιδιομορφές με ποσοστό ενεργοποίησης μάζας μεγαλύτερο του 5% (*EC8 §3.3.3.3.1· EAK 2000 §3.4.2*).

Στην περίπτωση διαφορετικού τρόπου προσομοίωσης της μάζας, π.χ. με σημειακές μάζες κατανεμημένες στους διάφορους κόμβους του ορόφου ή με συνδυασμό συγκεντρωμένης μάζας και υλικού με μη-μηδενική πυκνότητα, ο συνολικός αριθμός των ιδιομορφών που μπορούν να προκύψουν από την ανάλυση είναι πολύ μεγαλύτερος, οι σημαντικές όμως ιδιομορφές που συμμετέχουν ουσιαστικά στην απόκριση του φορέα θα είναι πρακτικά οι ίδιες.

Προσδιορισμός ιδιομορφών φορέα

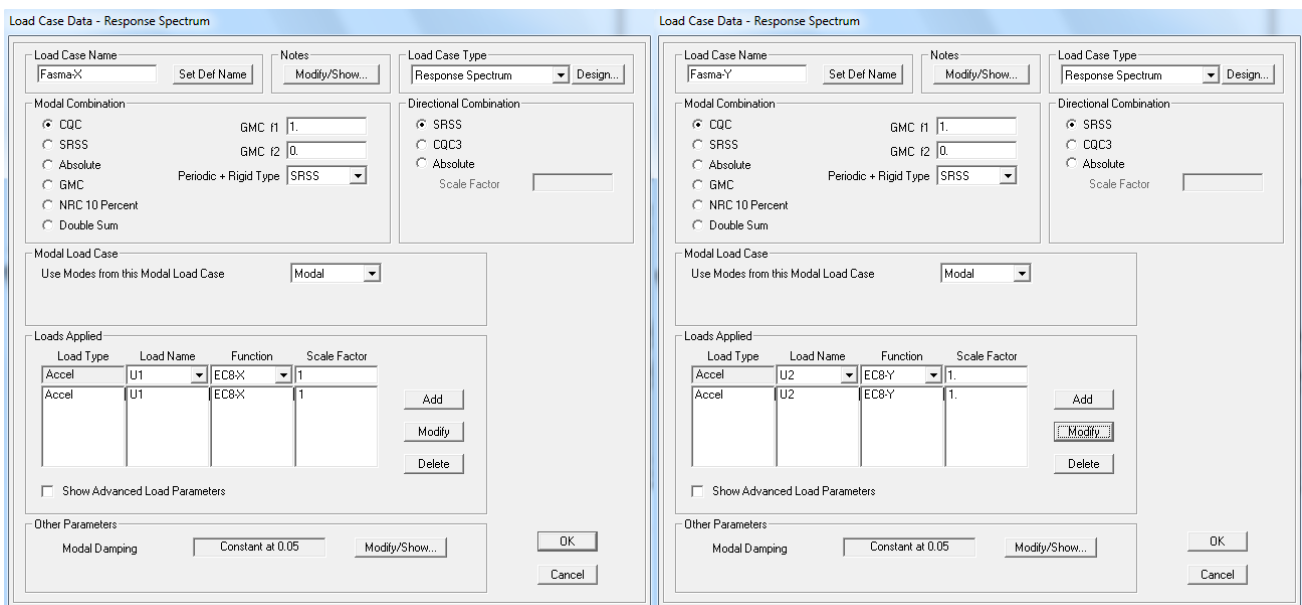
Ο προσδιορισμός των ιδιομορφών του φορέα μέσω μιας ιδιομορφικής ανάλυσης δεν αποτελεί κάποια μορφή φόρτισης και είναι εντελώς ανεξάρτητος από τις δράσεις που έχουν εφαρμοστεί. Σχετίζεται αποκλειστικά με τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης ενός κτιρίου, δηλαδή τη μάζα και τη δυσκαμψία του. Είναι συνεπώς δυνατή η εκτέλεση προκαταρκτικών ιδιομορφικών αναλύσεων, προκειμένου να προσδιοριστούν κάποια χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του φορέα, πριν την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Θα πρέπει βεβαίως να έχει ολοκληρωθεί η γεωμετρία και ο ορισμός και η ανάθεση των διατομών των γραμμικών στοιχείων (δυσκαμψία φορέα), όπως και η κατάλληλη προσθήκη της μάζας του φορέα.



Σχήμα 9.22 Ορισμός ιδιομορφικής ανάλυσης φορέα (ο αριθμός των ζητούμενων ιδιομορφών γίνεται για λόγους ελέγχου, καθώς αναμένονται 12 ιδιομορφές στον φορέα).

9.6.2. Ορισμός δυναμικής φασματικής ανάλυσης φορέα

Στη συνέχεια ορίζεται η δυναμική φασματική ανάλυση της κατασκευής. Η ανάλυση δημιουργείται με την επιλογή *Add New Load Case* και τον ορισμό φορτιστικής κατάστασης τύπου *Response Spectrum* (φάσμα απόκρισης). Ορίζεται μια φορτιστική κατάσταση για κάθε διεύθυνση φόρτισης, με τις ονομασίες *Fasma-X* και *Fasma-Y* για τις διευθύνσεις *U1* και *U2* αντίστοιχα, όπου επιλέγεται με προσοχή το κατάλληλο φάσμα ανά κατεύθυνση (Σχήμα 9.23). Υπενθυμίζεται ότι οι τοπικοί άξονες *1,2,3* έχουν την ίδια διεύθυνση με τους γενικούς άξονες *X,Y,Z*, όταν αναφέρονται σε κόμβους ή στο σύνολο του φορέα (Παράρτημα Α). Ως ιδιομορφική ανάλυση που αποτελεί τη βάση προσδιορισμού της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ορίζεται η *Modal* που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Σε κάθε μια από τις φορτιστικές καταστάσεις η επαλληλία μεταξύ των ιδιομορφών γίνεται με τη μέθοδο *CQC* της πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας, η οποία προτείνεται ως η ακριβέστερη (*EC8 §4.3.3.2(3)P· EAK 2000, §3.4.3[2]*).



Σχήμα 9.23 Ορισμός δυναμικής φασματικής ανάλυσης φορέα στις δυο διευθύνσεις φόρτισης.

9.6.3. Συνδυασμοί δράσεων

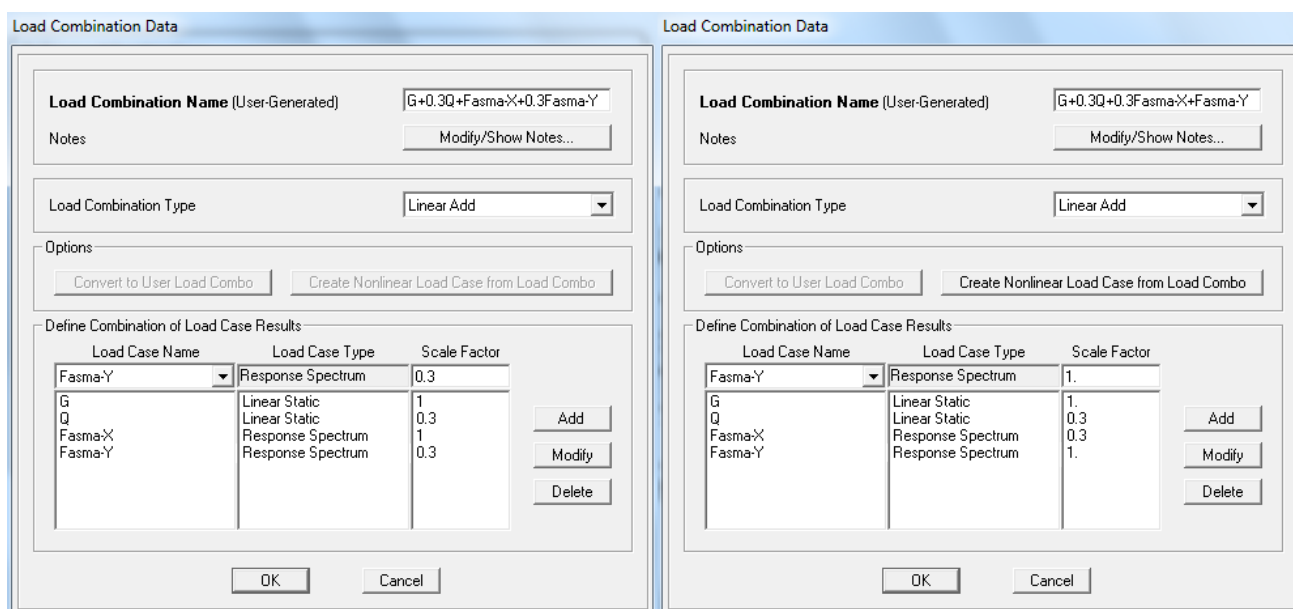
Σύντομη αναφορά στις κανονιστικές προβλέψεις για τους συνδυασμούς δράσεων των κατακόρυφων και των σεισμικών φορτίων έχει γίνει στο παρόν στα Κεφάλαια 3 και 5 αντίστοιχα. Ειδικότερα για τη χωρική επαλληλία σεισμικών δράσεων στην περίπτωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν και στην περίπτωση της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (*EC8 §4.3.3.5*), οδηγώντας τελικά στους παρακάτω συνδυασμούς:

$$G + 0.30 \cdot Q \pm Fasma_x \pm 0.3 \cdot Fasma_y \quad (9.29)$$

$$G + 0.30 \cdot Q \pm 0.3 \cdot Fasma_x \pm Fasma_y \quad (9.30)$$

Η αντικατάσταση των συμβόλων E_x , E_y στις παραπάνω σχέσεις, έγινε για να μην υπάρξει σύγχυση στη συγκεκριμένη εφαρμογή με τις φορτιστικές καταστάσεις που αφορούν τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης με τα στατικά επιβαλλόμενα φορτία. Υπενθυμίζεται ότι οι καταστάσεις E_x και E_y δεν ανταποκρίνονται πλέον στα δεδομένα του νέου φορέα, καθώς η προσθήκη των τοιχωμάτων έχει τροποποιήσει το φάσμα σχεδιασμού βάσει του οποίου είχαν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5.

Ο καθορισμός των συνδυασμών δράσεων γίνεται από το *Define* → *Load Combinations* με *Add New Combo* (Σχήμα 9.24). Σημειώνεται πως παρόλη την επιλογή *Linear Add* (αλγεβρικό άθροισμα) στον τύπο του συνδυασμού που επιλέγεται, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται φορτιστικές καταστάσεις τύπου φάσματος απόκρισης το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τον χαρακτήρα της φόρτισης και λαμβάνει αυτόματα υπόψη το \pm πρόσημο. Συνεπώς αρκούν οι δύο συνδυασμοί που φαίνονται στο Σχήμα 9.24, ενώ υπενθυμίζεται πως στην περίπτωση της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (στατική επιβολή φορτίων) είχε απαιτηθεί ο ορισμός 8 διαφορετικών συνδυασμών.



Σχήμα 9.24 Χωρική επαλληλία δυναμικών φασματικών αναλύσεων και συνδυασμός με κατακόρυφα φορτία.

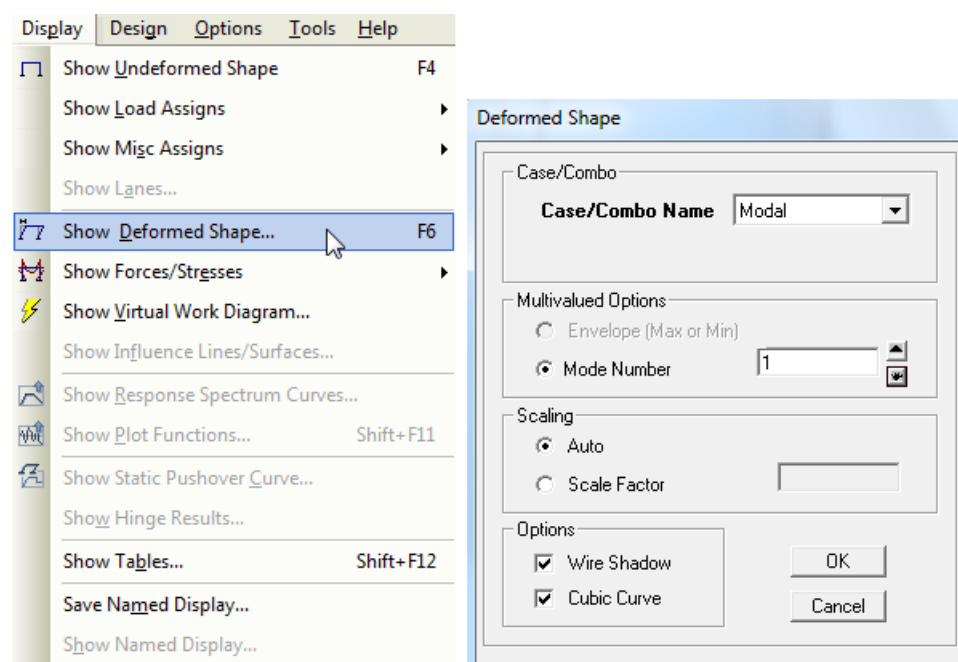
9.7. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*. Κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων, συνήθως ελέγχεται πρώτα η ιδιομορφική απόκριση του φορέα, όπου είναι ευκολότερο να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα προσομοίωσης.

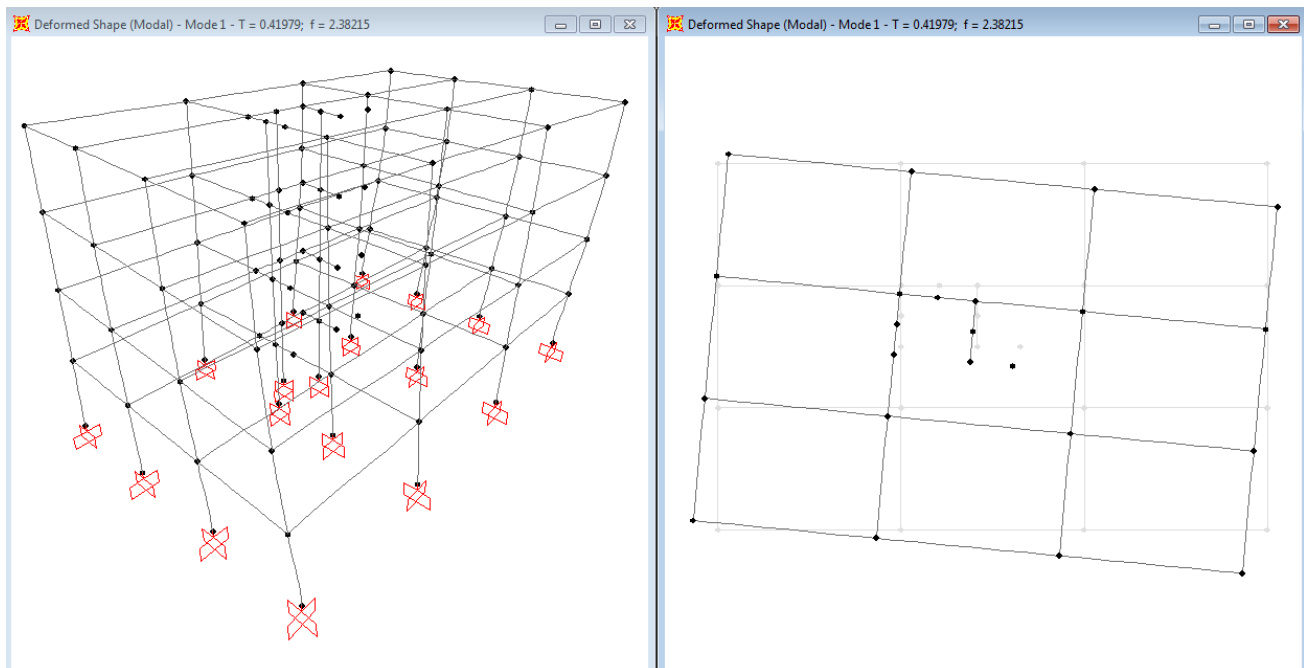
9.7.1. Ιδιομορφική απόκριση του φορέα

Η εμφάνιση των ιδιομορφών του φορέα προσφέρει μια ολοκληρωμένη πρώτη εικόνα της δυναμικής του συμπεριφοράς. Οι ιδιομορφές εμφανίζονται από την ίδια εντολή που δίνει την παραμορφωμένη εικόνα του φορέα, με *Display* → *Show Deformed Shape*, όπου επιλέγεται η φορτιστική κατάσταση *Modal* και σημειώνεται η επιθυμητή ιδιομορφή. Η επιλογή *Wire Shadow* εμφανίζει και την απαραμόρφωτη εικόνα του φορέα για καλύτερο εποπτικό έλεγχο της μετατόπισης κατά την ιδιομορφή, ενώ η μεγέθυνση της μετακίνησης του παραμορφωμένου φορέα μπορεί να τροποποιηθεί από το *Scale Factor*. Η 1η ιδιομορφή του φορέα απεικονίζεται σε τρισδιάστατη όψη και σε κάτοψη (τελευταίου ορόφου) στο Σχήμα 9.26. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 9.27, απεικονίζονται σε κάτοψη η 2η και 3η ιδιομορφή του φορέα. Παρόλο που κατά τον ορισμό της ιδιομορφικής ανάλυσης ζητήθηκαν 20 ιδιομορφές, παρατηρείται πως εμφανίζονται μόνο 12, όπως άλλωστε αναμενόταν από τις δυνατότητες μετακίνησης των στοιχείων μάζας που ορίστηκαν στον φορέα.

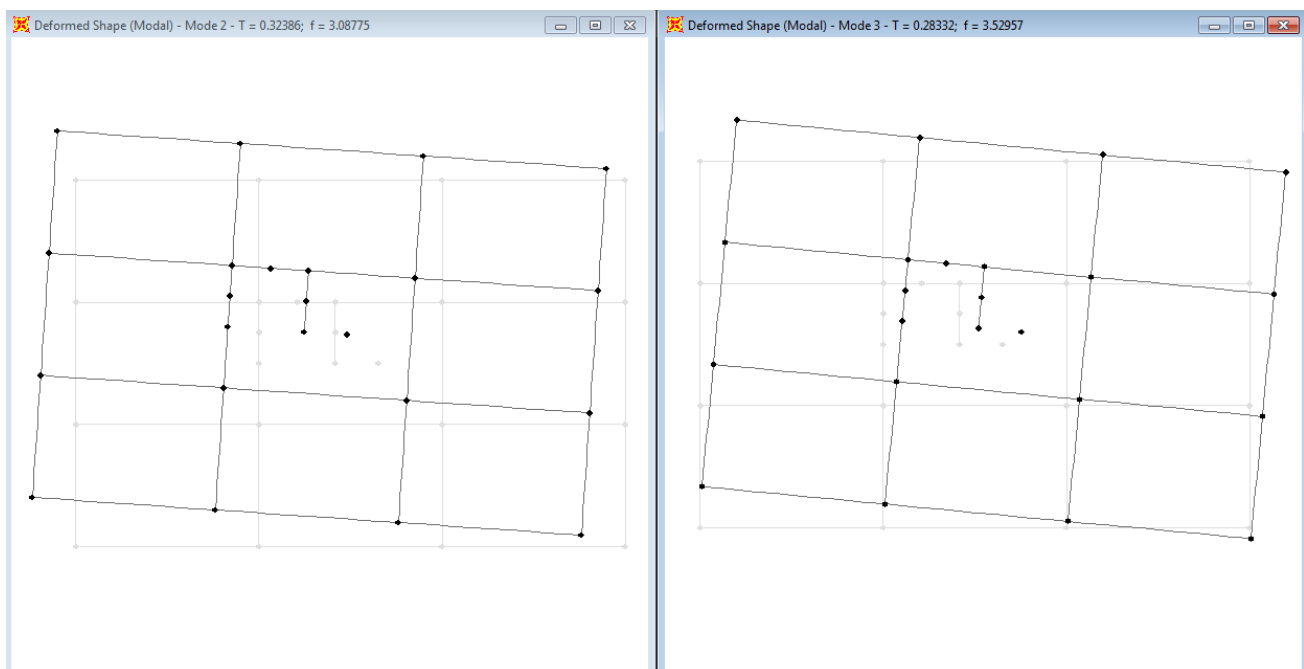
Από την εικόνα της κάθε ιδιομορφής σε κάτοψη, σε συνδυασμό με την επιλογή *Start Animation*, διευκολύνεται σημαντικά ο προσδιορισμός του τύπου της ιδιομορφής, αν δηλαδή είναι καθαρά μεταφορική ή στρεπτική ή συνδυασμός των δυο. Διαπιστώνεται ως πρώτη εικόνα ότι και στις 3 ιδιομορφές υπάρχει το στοιχείο της στρέψης, λόγω της ύπαρξης του πυρήνα. Η 1^η ιδιομορφή εμφανίζει στρέψη και μεταφορική κίνηση κατά *Y*, η 2^η ιδιομορφή συνδυασμό μεταφορικής κίνησης και προς τις δυο κατευθύνσεις με μικρότερη συμμετοχή της στρέψης, ενώ η 3^η ιδιομορφή στρέψη και μεταφορική κίνηση κατά *X*. Παρόλο που η μετατοπισμένη εικόνα της κάτοψης μοιάζει αρκετά μεταξύ της 2^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής (Σχήμα 9.27), η πραγματική κατάσταση είναι διαφορετική, όπως επιβεβαιώνεται από την ενεργοποίηση της ταλάντωσης του κτιρίου.



Σχήμα 9.25 Εντολή εμφάνισης ιδιομορφών στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.



Σχήμα 9.26 Εικόνα του φορέα κατά την πρώτη ιδιομορφή ($T_1=0.420s$).



Σχήμα 9.27 Εικόνα του φορέα κατά τη δεύτερη και τρίτη ιδιομορφή ($T_2=0.324s$, $T_3=0.283s$).

Πολυμεσικό Αντικείμενο 9.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την τρισδιάστατη εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 1^η ιδιομορφή. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της στρέψης στην ιδιομορφή.</p>	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 9.2	Video
Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 1 ^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της στρέψης στην ιδιομορφή, όπως και η μικρότερη συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης στη διεύθυνση Y.	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 9.3	Video
Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 2 ^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Είναι εμφανής ο μεταφορικός χαρακτήρας της ιδιομορφής με συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης και στις δυο οριζόντιες διευθύνσεις.	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 9.4	Video
Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 3 ^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της στρέψης στην ιδιομορφή, όπως και η συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης στις διευθύνσεις X και Y σε μικρότερο βαθμό.	

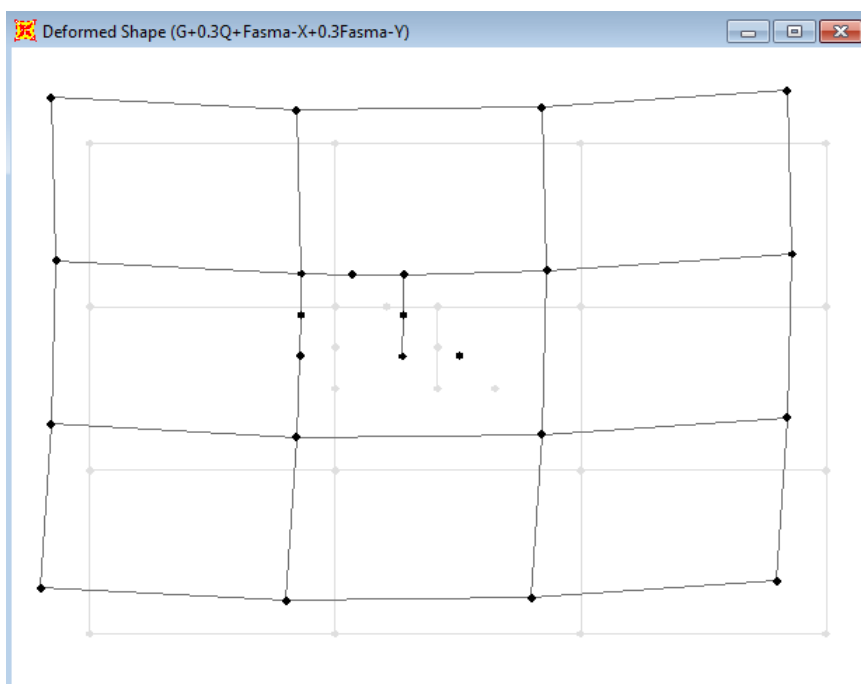
9.7.2. Μετακινήσεις φορέα κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση

Με την εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής στην περίπτωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, ενδεικτικά για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$, εμφανίζεται ο φορέας σε παραμορφωμένη κατάσταση στο Σχήμα 9.28. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι μετακινήσεις που εμφανίζονται δεν είναι ταυτόχρονες για όλους τους κόμβους του κτιρίου, λόγω της φύσης της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ως συνδυασμού ιδιομορφών, αλλά οι μέγιστες που αναπτύσσονται σε κάθε κόμβο. Έτσι, η εικόνα της κάτοψης του παραμορφωμένου φορέα για τον παραπάνω συνδυασμό (Σχήμα 9.28) δεν είναι μια «πραγματική» κατάσταση μετακίνησης κάποια στιγμή της απόκρισης, αλλά μια οπτική απεικόνιση των μέγιστων τιμών μετατόπισης του συνδυασμού για τον κάθε κόμβο. Για τον λόγο αυτόν και δεν εμφανίζεται ενιαία σχετική μετακίνηση όλων των κόμβων, κάτι που οπτικά θα μπορούσε να παρερμηνευτεί ως απώλεια της διαφραγματικής λειτουργίας κατά την απόκριση.

Παράλληλα, η τιμή μετατόπισης ενός κόμβου από τον συγκεκριμένο συνδυασμό δεν έχει άμεση φυσική σημασία. Πράγματι, λόγω της αναμενόμενης ανελαστικής συμπεριφοράς κατά το σεισμό σχεδιασμού, ο φορέας αναμένεται να εμφανίσει μεγαλύτερες μετακινήσεις από αυτές που υπολογίζονται κατά την ελαστική ανάλυση με τα απομειωμένα (δια τον συντελεστή συμπεριφοράς q) σεισμικά φορτία. Το σημείο αυτό επισημαίνεται **EC8 §4.3.4(1)P**, ενώ αναπτύχθηκε εν συντομία στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 5 (§5.8.1). Εδώ σημειώνεται επιπροσθέτως, ότι απαιτείται ξεχωριστή ανάγνωση των μετακινήσεων κατά X και κατά Y , λόγω του διαφορετικού συντελεστή συμπεριφοράς ανά διεύθυνση δυναμικής φασματικής

ανάλυσης ($q=3.6$ και 3.0 αντίστοιχα). Έτσι, η μέγιστη πραγματική μετακίνηση κατά X του κόμβου 401 για τον συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$ υπολογίζεται ως εξής:

$$-0.0001439 - 0.30 \cdot 0.00004516 \pm 3.6 \cdot 0.00405 \pm 3.0 \cdot 0.3 \cdot 0.00603 = -0.0202m \quad (9.31)$$

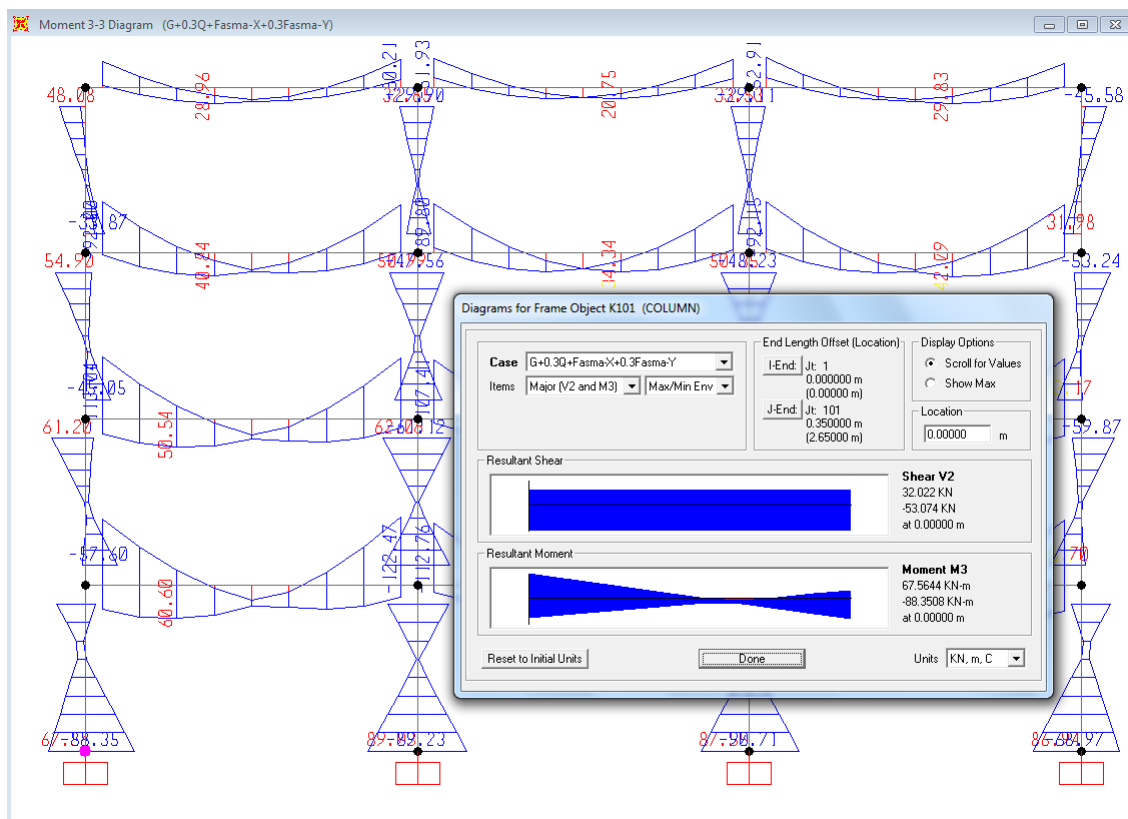


Σχήμα 9.28 Παραμορφωμένη εικόνα του φορέα κατά τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$ (η εμφάνιση που παραπέμπει σε έλλειψη διαφραγματικής λειτουργίας είναι παραπλανητική και οφείλεται στην αποτύπωση των μέγιστων και όχι των ταυτόχρονων μετακινήσεων των κόμβων).

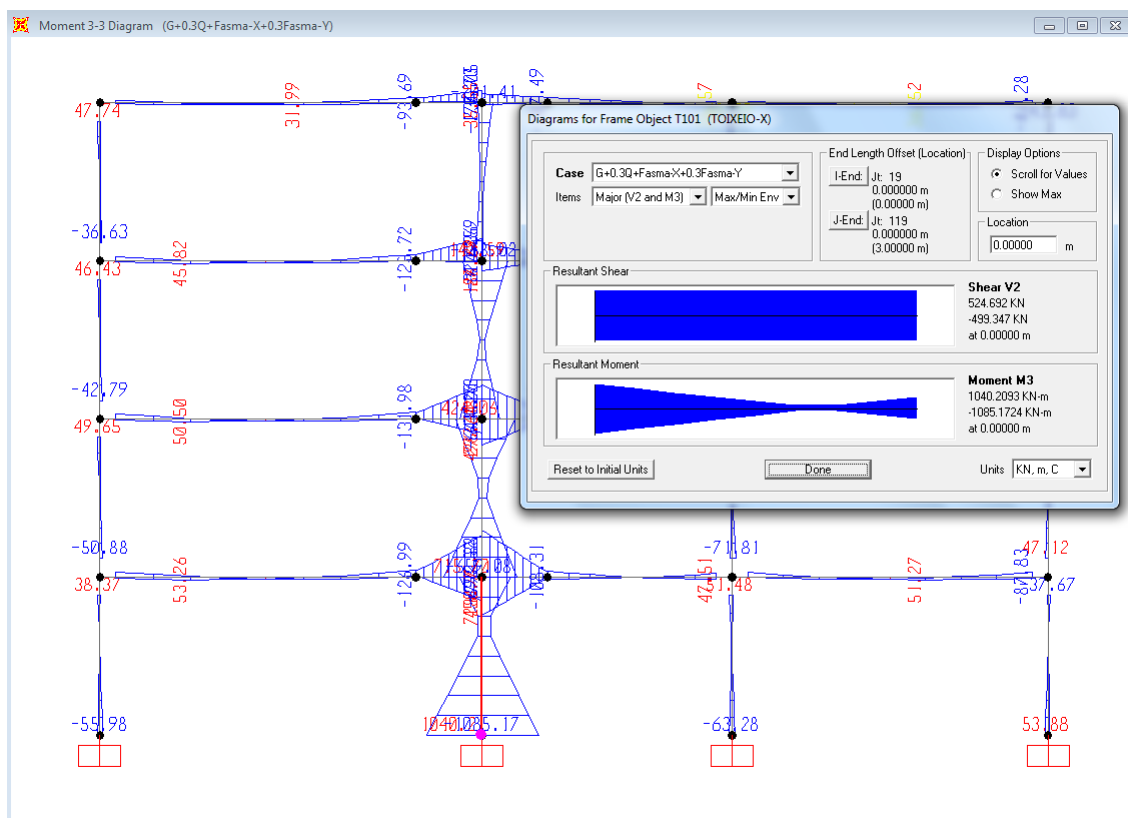
9.7.3. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Στο Σχήμα 9.29 εμφανίζονται τα διαγράμματα καμπτικών ροπών σε πλαίσιο στο επίπεδο xz ($Y=-6$) για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$. Παρατηρείται η συνύπαρξη θετικών και αρνητικών τιμών ροπής στο ίδιο διάγραμμα, καθώς λαμβάνεται αυτόματα υπόψη η εναλλαγή προσήμου του σεισμικού φορτίου που δρα και προς τις δυο κατευθύνσεις. Στη λεπτομέρεια που εμφανίζεται με δεξιά *click* στο υποστύλωμα $K101$, σημειώνονται η μέγιστη θετική και αρνητική τιμή ροπής και τέμνουσας στη θέση αυτή για τον εν λόγω συνδυασμό.

Στο Σχήμα 9.30 εμφανίζονται τα διαγράμματα καμπτικών ροπών στο πλαίσιο xz ($Y=2$) που περιλαμβάνει το τοίχωμα πλάτης του πυρήνα. Διαπιστώνεται η σημαντική τιμή ροπής που παραλαμβάνεται από το τοίχωμα ($1085.17kNm$ στη μέγιστη τιμή) σε σχέση με τα υπόλοιπα κατακόρυφα στοιχεία.



Σχήμα 9.29 Διάγραμμα ροπών κάμψης M33 για σεισμικό συνδυασμό φόρτισης που περιλαμβάνει δυναμική φασματική ανάλυση (λεπτομέρεια στη βάση του στύλου K101).



Σχήμα 9.30 Διάγραμμα ροπών κάμψης M33 για σεισμικό συνδυασμό φόρτισης που περιλαμβάνει δυναμική φασματική ανάλυση (λεπτομέρεια στη βάση του τοιχώματος T101).

9.7.4. Ανάγνωση αποτελεσμάτων από πίνακες τιμών

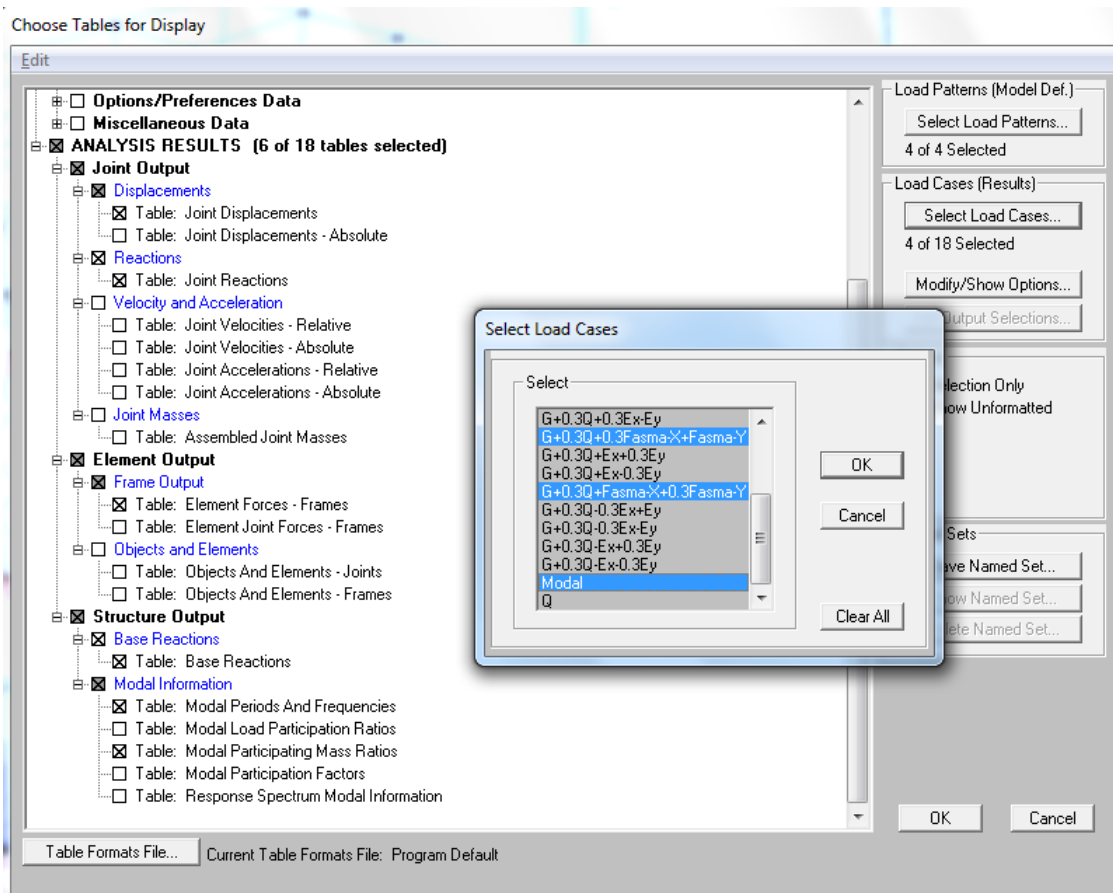
Παρόλο που το γραφικό περιβάλλον είναι περισσότερο εποπτικό για την παρατήρηση των αποτελεσμάτων, δεν είναι το καταλληλότερο εφόσον απαιτείται η ανάγνωση τους σε πολλές θέσεις, για πολλούς συνδυασμούς φόρτισης, αλλά και η περαιτέρω επεξεργασία τους. Θα πρέπει συνεπώς η ανάγνωση αποτελεσμάτων, είτε σε όλο τον φορέα είτε μόνο στα στοιχεία που ενδιαφέρουν, να γίνεται με πινακοποιημένη μορφή, δυνατότητα που συνήθως παρέχεται στα διάφορα προγράμματα ανάλυσης.

Έστω, ενδεικτικά, ότι επιλέγεται ο στύλος *K101*, το τοίχωμα *T101*, η δοκός *D101* και ο κόμβος *401*. Από το *Display* → *Show Tables* επιλέγονται ενδεικτικά τα μεγέθη του *ANALYSIS RESULTS* που φαίνονται στο Σχήμα 9.31. Τα σημαντικότερα από αυτά αφορούν:

- *Joint Output* → *Displacements* – *Table Joint Displacements*: μετακινήσεις κόμβων.
- *Joint Output* → *Reactions* – *Table Joint Reactions*: αντιδράσεις κόμβων.
- *Element Output* → *Frame Output* – *Table Element Forces-Frames*: εντατικά μεγέθη στα γραμμικά δομικά στοιχεία.
- *Structure Output* → *Base Reactions* – *Table Base Reactions*: αντιδράσεις στήριξης όλου του φορέα.
- *Structure Output* → *Modal Information* – *Table Modal Periods and Frequencies*: ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.
- *Structure Output* → *Modal Information* – *Table Modal Participating Mass Ratios*: ποσοστά συμμετοχής της μάζας σε κάθε ιδιομορφή (δίνει περισσότερες πληροφορίες για το αν η ιδιομορφή είναι μεταφορική και κατά ποια διεύθυνση).

Μπορεί να ζητηθεί η εμφάνιση αποτελεσμάτων μόνο για τα επιλεγμένα στοιχεία (*Options* → *Selection Only*). Παράλληλα, από την εντολή *Select Load Cases*, μπορούν να επιλεγούν οι φορτιστικές καταστάσεις και οι συνδυασμοί φόρτισης για τους οποίους ζητείται η εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Εφόσον ζητούνται αποτελέσματα ιδιομορφών, θα πρέπει να επιλεγεί οπωσδήποτε το *Modal* (εδώ επιλέγονται και οι δυο σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης με τη δυναμική φασματική ανάλυση). Με *OK* και στα 2 παράθυρα εμφανίζεται τελικά η εικόνα του Σχήματος 9.32, όπου τα αποτελέσματα που ζητήθηκαν παρατίθενται σε μια σειρά από πίνακες. Ενδεικτικά, στον πίνακα *Base Reactions* (συνολικές αντιδράσεις στις στηρίξεις του φορέα), διακρίνονται στις τελευταίες σειρές οι συνολικές σεισμικές δυνάμεις κατά *X* και *Y* (τέμνουσες βάσης) στους αντίστοιχους συνδυασμούς φόρτισης. Στην επόμενη ακριβώς στήλη εμφανίζεται το σύνολο των κατακόρυφων φορτίων του φορέα για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς (αντιστοιχούν σε κατακόρυφες δράσεις *G+0.3Q*).

Για την εύκολη επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι δυνατή η εξαγωγή όλων των πινάκων που εμφανίζονται σε πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων, με χρήση της εντολής *File* → *Export All Tables* → *To Excel*. Στο Σχήμα 9.33 φαίνεται ενδεικτικά η καρτέλα με τις τιμές των ιδιοπεριόδων και του ποσοστού μάζας που ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή (στήλες με έντονη γραφή). Παρατηρείται πως η 1^η ιδιομορφή εμφανίζει στρέψη (51.69%) και μεταφορική κίνηση κατά *Y* (39.10%), η 2^η ιδιομορφή συνδυασμό μεταφορικής κίνησης και προς τις δυο κατευθύνσεις (43.33% κατά *X* και 30.17% κατά *Y*) με ελάχιστη συμμετοχή της στρέψης (5.05%), ενώ η 3^η ιδιομορφή στρέψη (30.89%) και μεταφορική κίνηση κατά *X* (34.03%). Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν το αρχικό συμπέρασμα που προέκυψε από την προσεκτική επισκόπηση των ιδιομορφών στο γραφικό περιβάλλον, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 9.31 Ενδεικτική επιλογή για την εμφάνιση πινακοποιημένων αποτελεσμάτων.

Base Reactions

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

	OutputCase Text	CaseType	StepType	Num	GlobalFX KN	GlobalFY KN			
	Modal	LinModal	Mode	1	1737.218	4260.57			
	Modal	LinModal	Mode	2	7535.327	-6287.889			
	Modal	LinModal	Mode	3	-8726.646	-5262.545	000000007191	46840.1909	-75246.6809 52987.2153
	Modal	LinModal	Mode	4	-5808.723	-15392.941	000000004965	-323.7368	9062.1416 -94521.2652
	Modal	LinModal	Mode	5	-31495.232	26794.332	000000002324	-4679.3519	18045.3661 -35587.9522
	Modal	LinModal	Mode	6	29050.152	23863.524	1.00000001521	1990.2215	-21106.7016 -195924.944
	Modal	LinModal	Mode	7	-14015.611	-24859.4	000000003991	32743.758	-20790.9 -121008.123
	Modal	LinModal	Mode	8	3713.296	13643.013	000000001923	2706.5107	-8131.7935 146113.4007
	Modal	LinModal	Mode	9	51906.358	-38492.02	000000001501	61683.2729	94535.0621 41412.7869
	Modal	LinModal	Mode	10	-40732.682	-51119.347	000000006419	80410.6209	-72813.8193 249606.0744
	Modal	LinModal	Mode	11	45787.981	-28112.494	000000007058	3403.392	-5729.9865 32081.1054
	Modal	LinModal	Mode	12	32902.598	39775.401	000000007829	-7702.2545	-4676.2961 -203952.309
	Q+Fasma-X+0.3Fa	ombinatic	Max		959.662	700.63	9372	6033.5677	8114.2854 4151.5151
	Q+Fasma-X+0.3Fa	ombinatic	Min		-959.662	-700.63	9372	-6033.5677	-8114.2854 -4151.5151
	Q+0.3Fasma-X+Fa	ombinatic	Max		778.083	972.335	9372	8310.9677	6571.429 5474.0995
	Q+0.3Fasma-X+Fa	ombinatic	Min		-778.083	-972.335	9372	-8310.9677	-6571.429 -5474.0995

Record: 1 of 16

Add Tables... Done

Σχήμα 9.32 Πινακοποιημένα αποτελέσματα ανάλυσης για επιλεγμένες φορτίσεις (εμφανίζεται ενδεικτικά ο πίνακας με τις συνολικές αντιδράσεις στις στηρίξεις του φορέα).

TABLE: Modal Participating Mass Ratios	Output	Category	Type	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Title	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
Modal	Mode	1	0.419788	0.065	0.39099	0	0.065	0.39099	0	0	0.46181	0.07422	0.51692	0.46181	0.07422	0.51692
Modal	Mode	2	0.32386	0.43326	0.30168	0	0.49826	0.69267	0	0	0.37791	0.51328	0.0505	0.83972	0.5875	0.56742
Modal	Mode	3	0.283321	0.34034	0.12377	0	0.8386	0.81644	0	0	0.15877	0.40973	0.30891	0.99849	0.99723	0.87633
Modal	Mode	4	0.135951	0.00799	0.05614	0	0.8466	0.87259	0	0	4.021E-07	0.00032	0.05212	0.99849	0.99755	0.92844
Modal	Mode	5	0.101401	0.07274	0.05265	0	0.91934	0.92523	0	0	0.000026	0.00039	0.00229	0.99851	0.99793	0.93073
Modal	Mode	6	0.090743	0.03969	0.02678	0	0.95903	0.95201	0	0	0.000003016	0.00034	0.04444	0.99852	0.99827	0.97517
Modal	Mode	7	0.080066	0.0056	0.01761	0	0.96463	0.96963	0	0	0.00049	0.0002	0.01028	0.99901	0.99847	0.98545
Modal	Mode	8	0.060268	0.00013	0.0017	0	0.96475	0.97133	0	0	0.000001085	0.000009798	0.00481	0.99901	0.99848	0.99026
Modal	Mode	9	0.057325	0.02018	0.0111	0	0.98493	0.98243	0	0	0.00046	0.00108	0.00032	0.99947	0.99957	0.99057
Modal	Mode	10	0.051863	0.00833	0.01311	0	0.99326	0.99554	0	0	0.00053	0.00043	0.0077	1	1	0.99827
Modal	Mode	11	0.043006	0.00497	0.00188	0	0.99823	0.99742	0	0	0.000000445	0.000001261	0.00006012	1	1	0.99833
Modal	Mode	12	0.039163	0.00177	0.00258	0	1	1	0	0	0.000001567	5.777E-07	0.00167	1	1	1

Σχήμα 9.33 Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο Excel (εμφανίζεται ενδεικτικά η καρτέλα με το ποσοστό μάζας που ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 9^{ου} Κεφαλαίου

- Asteris, P. G., & Cotsovos, D. M. (2012). Numerical investigation of the effect of infill walls on the structural response of RC frames *The Open Construction and Building Technology Journal*, 6, 164-181. doi: 10.2174/1874836801206010164
- Bouckovalas, G., Papadimitriou, A., & Karamitros, D. (2006). *Compatibility of EC-8 ground types and site effects with 1-D wave propagation theory*. Paper presented at the ETC12 Workshop: Geotechnical Evaluation and Application of the Seismic Eurocode EC8 2003-2006, Athens.
- Calvi, G. M., & Bolognini, D. A. (2001). Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(2), 153-185. doi: 10.1142/S136324690100039X
- CEN (2002). *EN 1990: Eurocode: Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2002). *EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-1: General actions -Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Fardis, M. N., & Panagiotakos, T. B. (1997). Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete buildings. Part II: Infilled structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(3), 475-503. doi: 10.1142/S1363246997000180
- Kakaletsis, D. J., & Karayannis, C. G. (2009). Experimental investigation of infilled R/C frames with openings. *ACI Structural Journal*, 106(2), 132-141.
- Kappos, A., Stylianidis, K., & Michailidis, C. (1998). Analytical models for brick masonry infilled R/C frames under lateral loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(1), 59-87. doi: 10.1142/S1363246998000046

- Pitilakis, K., Riga, E., & Anastasiadis, A. (2013). New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(4), 925-966. doi: 10.1007/s10518-013-9429-4
- Αβραμίδης, Ι. Ε. (2001). *Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις μεθόδους προσομοίωσης κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Μορφίδης, Κ., Μπαμπούκας, Ε., & Αβραμίδης, Ι. (2008). *Προσομοίωση και έλεγχος αντοχής σε κάμψη πυρήνων με το πρόγραμμα στατικής ανάλυσης κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ*. Άρθρο που παρουσιάστηκε στο 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα.
- Ξενίδης, Χ., Αβραμίδης, Ι., & Τριαματάκη, Μ. (1998). Συγκριτική αξιολόγηση απλοποιημένων προσομοιωμάτων για πυρήνες κτιρίων Ο/Σ υπό στατική και δυναμική φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του ΤΕΕ*, 1,18(3), 9-25.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
- Φαρδής, Μ. (2011). *Εφαρμογή Ευρωκώδικα 8 στο σχεδιασμό και την αποτίμηση έργων Πολιτικού Μηχανικού: Σχεδιασμός πολυώροφου κτιρίου με δυο υπόγεια*. Αθήνα: ΤΕΕ, ΕΤΑΜ.
- Φαρδής, Μ., Κόλιας, Β., Παναγιωτάκος, Τ., & Κανιτάκη, Ε. (2009). *Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1998-1: 2004 Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών - Μέρος 1. Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις, κανόνες για κτίρια*. Αθήνα: ΤΕΕ, ΣΠΜΕ, ΥΠΕΧΩΔΕ.

Δυναμική φασματική ανάλυση κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 10 παρουσιάζεται η προσομοίωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης του φορέα που αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, λαμβάνοντας όμως υπόψη την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: ενδοσιμότητα εδάφους θεμελίωσης, δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, υπολογισμός ελατηριακών σταθερών με χρήση του μέτρου εδαφικής αντίδρασης, υπολογισμός ελατηριακών σταθερών βάσει δυναμικών χαρακτηριστικών εδάφους, υπολογισμός διαστάσεων θεμελίου, αξιολόγηση επιρροής ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης στην απόκριση φορέα σπλισμένου σκυροδέματος.

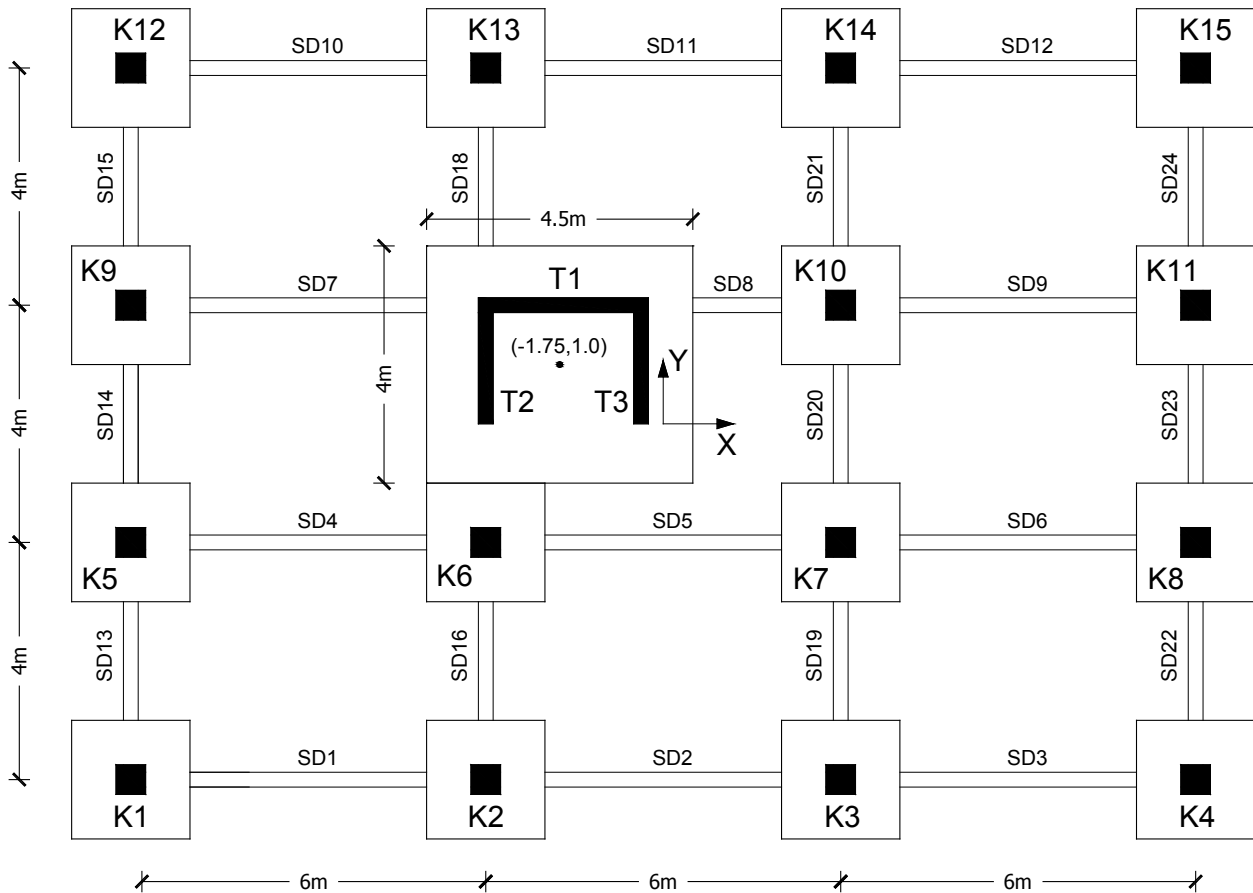
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού και δυναμικής των κατασκευών και ικανότητα ανάγνωσης αντίστοιχων κανονιστικών κειμένων, εφαρμογή του παραδείγματος που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 9, όπως και πλήρης κατανόηση των αντικειμένων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

10.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η δυναμική φασματική ανάλυση βάσει του EC8 για τον φορέα του Κεφαλαίου 9, λαμβάνοντας υπόψη την ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης, με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Αμμώδες έδαφος με δείκτη εδάφους $K_s=70000\text{kN/m}^3$ (τιμή από μετρήσεις με τετράγωνη δοκιμαστική πλάκα πλευράς $1\text{ft}=0.305\text{m}$).
- Θεμελίωση υποστυλωμάτων σε μεμονωμένα πέδιλα διαστάσεων $2.0\times 2.0\text{m}$ και πυρήνα σε ενιαίο πέδιλο διαστάσεων $4.5\times 4.0\text{m}$ (Σχήμα 10.1 όπου αποτυπώνονται και οι συντεταγμένες στο κέντρο βάρους του πεδிலου του πυρήνα). Δίνεται ύψος πεδிலών 60cm και στάθμη θεμελίωσης -0.60m .
- Συνδετήριες δοκοί διαστάσεων $25\times 60\text{cm}$ (να θεωρηθεί πως δεν υπάρχει επαρκής επαφή με το υπέδαφος).



Σχήμα 10.1 Κάτοψη φορέα στη στάθμη θεμελίωσης με σκαρίφημα των πεδίων.

10.2. Ενδοσιμότητα εδάφους θεμελίωσης

Η θεμελίωση των κατακόρυφων στοιχείων ενός κτιρίου γίνεται με τρόπο και σε συνθήκες εδάφους που δεν μπορούν να θεωρηθούν ως πλήρης πάκτωση. Εκτός από ειδικές περιπτώσεις θεμελίωσης σε βραχώδη εδάφη ή με χρήση δύσκαμπτων διατάξεων (κοιτοστρώσεις, συστήματα πασσάλων), το θεμέλιο αναμένεται να εμφανίσει κάποιες μετακινήσεις ή/και στροφές, λόγω της ενδοσιμότητας του εδάφους στο οποίο εδράζεται.

Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα παραμόρφωσης του εδάφους στο επίπεδο της θεμελίωσης κατά την αριθμητική προσομοίωση ενός φορέα είναι με την παραδοχή ελαστικής έδρασης των δομικών στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος. Για τον λόγο αυτόν υιοθετείται συνήθως το απλοποιημένο μοντέλο Winkler (1867), που περιλαμβάνει τη θεώρηση ελατηρίων στις θέσεις επαφής των δομικών στοιχείων με το έδαφος. Η χρήση ελατηριακών σταθερών για την αναπαραγωγή της ενδόσιμης στήριξης έχει αποδειχθεί πως δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, συγκρινόμενη με πιο σύνθετα προσομοιώματα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, τόσο σε επίπεδο αποτελεσμάτων εντατικών μεγεθών όσο και μεταβολής της ιδιοπεριόδου της κατασκευής (Avramidis & Morfidis, 2006· Kirtas, Trevelopoulos, Rovithis, & Pitilakis, 2007).

Η απλή θεώρηση της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης, με χρήση ελατηριακών σταθερών στη βάση των κατακόρυφων στοιχείων, δεν θα πρέπει να συγχέεται με το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Κατά τη δυναμική αλληλεπίδραση, πέρα από τη δυνατότητα μετακίνησης ή/και στροφής στα θεμέλια, συμπεριλαμβάνεται και η τροποποίηση της προσπίπτουσας σεισμικής κίνησης στη βάση του κτιρίου λόγω κινηματικής και αδρανειακής αλληλεπίδρασης.

Ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης στους Κανονισμούς

Η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης και η επιρροή της στην απόκριση των κατασκευών αναγνωρίζεται πλήρως στους Κανονισμούς (*EC8 §4.3.1(9)P*, *EAK 2000 §3.2.1[4]*). Παρ' όλα αυτά, δεν επιβάλλεται πάντα ο συνυπολογισμός της, καθώς μια συνήθης γενίκευση της επιρροής της στην απόκριση των κατασκευών αναφέρει αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου που συνεπάγεται μείωση των σεισμικών φορτίων (ενδεικτικά *EC8-Part 5 Annex D §D.2* και *EAK 2000 §3.2.1[4]*). Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι πάντα ακριβές, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις δυσμενέστερης απόκρισης, ενώ αναμένεται και ανακατανομή των εντατικών μεγεθών στον φορέα σε σχέση με τη θεώρηση πακτωμένης βάσης των κατακόρυφων στοιχείων. Ο *EC8* προβλέπει αυτές τις περιπτώσεις, αναφέροντας πως η ενδοσιμότητα (παραμορφωσιμότητα) του εδάφους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν αναμένεται δυσμενής επιρροή στη συνολική απόκριση της κατασκευής (*EC8 §4.3.1(9)P* με περιγραφή σχετικών περιπτώσεων στον *EC8-Part 5 §6(1)P*), ενώ επιτρέπει (δίχως να επιβάλει) τον συνυπολογισμό της ακόμη και όταν οδηγεί σε ευνοϊκότερη απόκριση.

Αντίστοιχες, κανονιστικού χαρακτήρα, οδηγίες των αμερικανικών κανονισμών, σημειώνουν πως η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση σε όρους τόσο μεγέθους εντατικών μεγεθών όσο και ανακατανομής τους στα δομικά στοιχεία (*FEMA 450 §5.6*, *FEMA P750 §C-A.7.2.3*). Στις συγκεκριμένες διατάξεις προτείνεται και συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση για τον υπολογισμό της επιρροής της αλληλεπίδρασης στη σεισμική απόκριση της κατασκευής.

Δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής

Η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής αναφέρεται στο σύνθετο φαινόμενο της απόκρισης μιας κατασκευής θεμελιωμένης σε ενδόσιμο έδαφος υπό προσπίπτοντα σεισμικό κραδασμό. Η τρέχουσα μεθοδολογία, όπως εφαρμόζεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων, λαμβάνει υπόψη ένα σεισμικό φορτίο που έχει προκύψει με τη θεώρηση συνθηκών «ελεύθερου πεδίου» στην επιφάνεια του εδάφους. Με τον όρο «ελεύθερο πεδίο» χαρακτηρίζεται μια θέση αναφοράς της σεισμικής κίνησης, η οποία είναι αρκούτως απομακρυσμένη από οποιαδήποτε κατασκευή ώστε η καταγραφή της να μπορεί να θεωρηθεί ανεπηρέαστη.

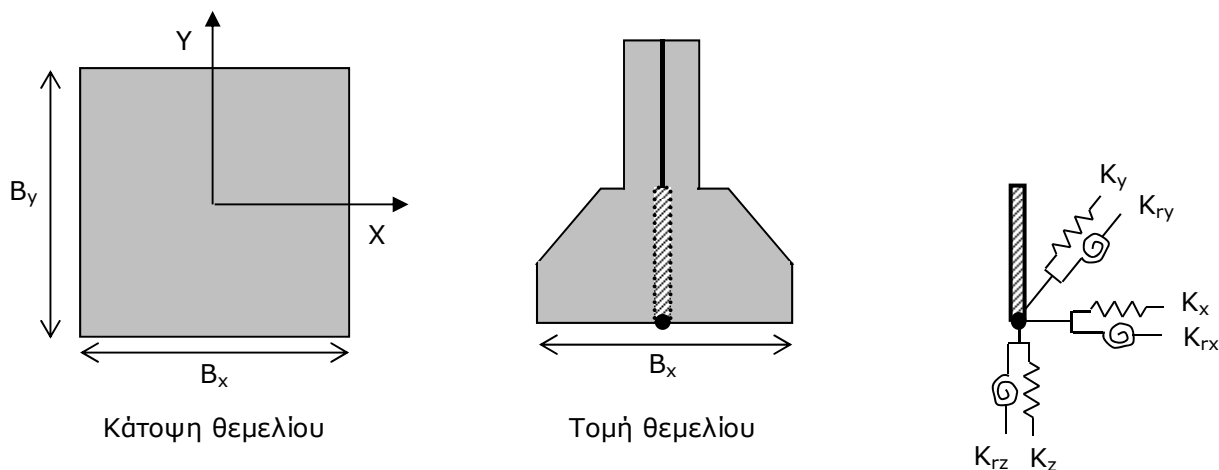
Στην πραγματικότητα όμως, η κίνηση ελεύθερου πεδίου μεταβάλλεται με την παρουσία μιας κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους. Πράγματι, το έδαφος τείνει να παραμορφωθεί με τρόπο διαφορετικό από αυτόν που δύναται να παρακολουθήσει η θεμελίωση μιας κατασκευής, λόγω της διαφορετικής της δυσκαμψίας (κινηματική αλληλεπίδραση). Η ταλάντωση της κατασκευής, αντίστοιχα, επιβάλλει πρόσθετες μετακινήσεις στο έδαφος που εδράζεται, μέσω της μετακίνησης/στροφής των θεμελίων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ιδιοπερίοδος απόκρισης του φορέα (αδρανειακή αλληλεπίδραση). Το συνολικό φαινόμενο, που έχει έντονη συχνοτική εξάρτηση, αποδίδεται περιληπτικά με τον όρο δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής (*dynamic soil-structure interaction*). Η μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου έχει απασχολήσει πλήθος ερευνητών, με χαρακτηριστική τη συμβολή των Gazetas (1987), Lucio and Westmann (1971), Veletsos and Wei (1971), και έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά και αριθμητικά (Kirtas, Rovithis, & Pitilakis, 2009). Ενδεικτική παρουσίαση της δυναμικής αλληλεπίδρασης σε σύστημα μονοβάθμιου ταλαντωτή που εδράζεται σε ελαστικό έδαφος γίνεται από τον Wolf (1985), ενώ μια εκτεταμένη βιβλιογραφία στο συγκεκριμένο θέμα μπορεί να αναζητηθεί στους Κίρτα (2007), Πιτιλάκη και συνεργάτες (1999).

Κατά τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών με τη δυναμική φασματική μέθοδο ανάλυσης (πόσο μάλλον με τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης), δεν είναι δυνατός ο συνυπολογισμός του πλήρους φαινομένου της δυναμικής αλληλεπίδρασης, ιδίως όσον αφορά το κινηματικό του μέρος. Η αναλυτική μελέτη του φαινομένου εμφανίζει κυρίως ερευνητικό ενδιαφέρον και βρίσκεται εκτός του αντικειμένου του συγκεκριμένου συγγραμματος.

10.2.1. Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών

Οι δυνατότητες κίνησης του κόμβου που προσομοιώνει τη στήριξη ενός κατακόρυφου στοιχείου είναι συνολικά 6, τρεις μεταφορικές και τρεις στροφικές (Σχήμα 10.2). Από τις έξι δυνατότητες παραμόρφωσης

του εδάφους, αυτές που πρακτικά σχετίζονται με τη συμπεριφορά της θεμελίωσης κτιριακών κατασκευών και συνήθως λαμβάνονται υπόψη είναι τρεις: η δυνατότητα κατακόρυφης μετακίνησης (κατακόρυφο ελατήριο K_z) και οι δυο στροφές γύρω από τους δυο οριζόντιους άξονες (στροφικά ελατήρια K_{rx} και K_{ry}). Οι παραμορφώσεις στις υπολειπόμενες τρεις δυνατότητες κίνησης είναι αμελητέες και μπορεί να θεωρηθεί πλήρης στήριξη κατά τη διεύθυνσή τους.



Σχήμα 10.2 Σκαρίφημα θεμελίου και ελατηρίων προσομοίωσης της ενδόσιμης έδρασης (σχετικές λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στους Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013). Λεπτομερέστερη προσέγγιση προσομοίωσης που αφορά κόμβο έδρασης στη θέση του θεωρητικού σημείου πάκτωσης, στα 2/3 του ύψους του πεδύλου, μπορεί να βρεθεί στους Μορφίδη, Μπαμπούκα και Αβραμίδη (2008).

Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών με χρήση του μέτρου εδαφικής αντίδρασης ή δείκτη εδάφους

Η χρήση του δείκτη εδάφους ή μέτρου εδαφικής αντίδρασης K_s για τον υπολογισμό ελατηριακών σταθερών που προσομοιώνουν την ενδοσιμότητα του εδάφους κάτω από θεμέλιο, ενσωματώνεται στη διαδικασία που προτάθηκε από τον Terzaghi (1955). Ο δείκτης εδάφους εκφράζει την απαιτούμενη πίεση για να υποχωρήσει το πέδιλο κατά μια μονάδα μήκους και έχει διαστάσεις δύναμης ανά μονάδα όγκου (kN/m^3). Οι τιμές του δείκτη εδάφους εξαρτώνται όχι μόνον από τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά και από το σχήμα και τη δυσκαμψία του στοιχείου θεμελίωσης, όπως και τη στάθμη της επιβαλλόμενης φόρτισης. Συνεπώς ο δείκτης εδάφους δεν είναι μία καθαρά εδαφική ιδιότητα.

Καθώς τα πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού του δείκτη εδάφους αναφέρονται σε δοκιμαστικές φορτίσεις πλάκας συγκεκριμένων διαστάσεων (ενδεικτικές βασικές τιμές για αμμώδη και αργιλικά εδάφη δίνονται στους Πίνακες 10.1 και 10.2), απαιτείται μια σειρά διορθωτικών συντελεστών για τον υπολογισμό της τελικής τιμής του K_s . Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις (Αβραμίδη, Αθανατοπούλου, Μορφίδη, & Σέξτος, 2011· Αναγνωστόπουλος, Χατζηγάγος, Αναστασιάδης, & Πιτιλάκης, 2012· Τεχνικός Οίκος Λογισμικού, 2009):

Συντελεστής διαστάσεων θεμελίου:

$$n_s = \begin{cases} \left(\frac{B+B_p}{2 \cdot B} \right)^2 & \text{για αμμώδη εδάφη} \\ \frac{B_p}{B} & \text{για αργιλικά εδάφη} \end{cases} \quad (10.1)$$

Συντελεστής σχήματος θεμελίου (όλα τα εδάφη):

$$n_{sx} = \frac{1}{3} \cdot \left(2 + \frac{B}{L} \right) \quad (10.2)$$

Συντελεστής βάθους θεμελίου D:

$$n_{\theta} = \begin{cases} 1 + 2 \cdot \frac{D}{B} & \text{για αμμώδη εδάφη} \\ 1.0 & \text{για αργιλικά εδάφη} \end{cases} \quad (10.3)$$

Στις παραπάνω σχέσεις B και L είναι το πλάτος και το μήκος του θεμελίου, ενώ B_p η διάσταση της πρότυπης πλάκας πειραματικού προσδιορισμού του K_s, η οποία συνήθως ισούται με 0.305m (1ft). Η τελική τιμή του δείκτη εδάφους προκύπτει από τη σχέση:

$$K_{s, \text{τελ}} = n_{\delta} \cdot n_{\sigma\chi} \cdot n_{\theta} \cdot K_s \quad (10.4)$$

Τύπος αμμώδους εδάφους	Όρια K _s (MN/m ³)	Μέση τιμή K _s (MN/m ³)
Χαλαρή (N _{SPT} <10)	6.4-19.2	12.9
Μέση (10<N _{SPT} <30)	19.2-96.2	41.7
Πυκνή (30<N _{SPT})	96.2-321.0	161.0

Πίνακας 10.1 Τιμές του δείκτη εδάφους σε αμμώδη εδάφη για φόρτιση δοκιμαστικής τετράγωνης πλάκας 0.305m (λεπτομέρειες από Terzaghi (1955), όπως αναδημοσιεύτηκαν από Αναγνωστόπουλο και συνεργάτες (2012)).

Τύπος αργιλικού εδάφους	Όρια K _s (MN/m ³)	Μέση τιμή K _s (MN/m ³)
Στιφρή (100kPa<c _u <200kPa)	16.2-32.1	24.1
Πολύ Στιφρή (200kPa<c _u <400kPa)	32.1-64.2	48.2
Σκληρή (400kPa<c _u)	>96.0	96.4

Πίνακας 10.2 Τιμές του δείκτη εδάφους σε αργιλικά εδάφη για φόρτιση δοκιμαστικής τετράγωνης πλάκας 0.305m (λεπτομέρειες από Terzaghi (1955), όπως αναδημοσιεύτηκαν από Αναγνωστόπουλο και συνεργάτες (2012)).

Με βάση την τελική τιμή του δείκτη εδάφους που προκύπτει, ο υπολογισμός των ελατηριακών σταθερών γίνεται από τις σχέσεις (Αβραμίδης, 2001):

$$K_z = K_{s, \text{τελ}} \cdot L \cdot B \quad (10.5)$$

$$K_{rL} = K_{s, \text{τελ}} \cdot \frac{L \cdot B^3}{12} \quad (10.6)$$

$$K_{rB} = K_{s, \text{τελ}} \cdot \frac{L^3 \cdot B}{12} \quad (10.7)$$

Διαδραστικό Αντικείμενο 10.1	Εφαρμογή
Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Με τη συγκεκριμένη διαδραστική εφαρμογή μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των ελατηριακών σταθερών έδρασης ορθογωνικού θεμελίου με χρήση του μέτρου εδαφικής αντίδρασης ή δείκτη εδάφους (Terzaghi, 1955). Η διόρθωση της βασικής τιμής του δείκτη εδάφους λόγω των διαστάσεων και του σχήματος θεμελίου, αλλά και του βάθους θεμελίωσης, γίνεται αυτόματα μέσω υπολογισμού κατάλληλων συντελεστών.	

Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών βάσει δυναμικών χαρακτηριστικών εδάφους

Η μελέτη του φαινομένου της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης, οδήγησε στον προσδιορισμό σχέσεων που περιγράφουν τη σύνθετη δυναμική δυσκαμψία σε θεμέλια λόγω της ενδοσιμότητας του εδάφους. Οι σχέσεις αυτές συναντώνται με τη γενική ονομασία «δείκτες εμπέδησης». Εκτός της κλασσικής σταθεράς ελατηρίου που αναφέρεται στην αντίσταση του εδάφους, εμπεριέχουν την απόσβεση εδαφικού υλικού και ακτινοβολίας στο υπέδαφος, αλλά και τη συχνοτική εξάρτηση των παραπάνω παραμέτρων (Πιτιλάκης και συνεργάτες, 1999).

Οι δείκτες εμπέδησης για τις συνήθεις περιπτώσεις έδρασης θεμελίων σε ομοιογενή ημίχωρο έχουν μελετηθεί αναλυτικά, ενώ περιλαμβάνονται σε μεγάλο αριθμό εργασιών και δημοσιεύσεων (ενδεικτικά Dobry & Gazetas, 1986· Gazetas, 1991· Lucio & Westmann, 1971· Veletsos & Wei, 1971). Για τον υπολογισμό της σταθεράς των δεικτών εμπέδησης που αφορά τη στατική δυσκαμψία σε θεμέλιο συγκεκριμένων διαστάσεων, απαιτείται η γνώση του μέτρου διάτμησης του εδάφους G και του δείκτη Poisson του εδάφους ν . Ενδεικτικά, για τους βαθμούς ελευθερίας που ενδιαφέρουν περισσότερο στα επιφανειακά θεμέλια κτιριακών έργων, δίνονται οι παρακάτω εξισώσεις υπολογισμού της στατικής δυσκαμψίας του εδάφους και του αντιστοιχού δυναμικού πολλαπλασιαστή (Dobry & Gazetas, 1986· Gazetas, 1991· Mylonakis, Nikolaou, & Gazetas, 2006), τροποποιημένες ώστε να αντιστοιχούν σε ορθογωνικά θεμέλια διαστάσεων $B \times L$ (L η μεγάλη διάσταση του θεμελίου):

$$K_z = \frac{G \cdot L}{1-\nu} \cdot \left[0.73 + 1.54 \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right], \quad k_z \text{ από διάγραμμα (10.8)}$$

$$K_{rL} = \frac{G \cdot L \cdot B^2}{12^{0.75} \cdot (1-\nu)} \cdot \left(2.4 + 0.5 \cdot \frac{B}{L} \right), \quad k_{rL} \cong 1 - 0.20 \cdot \alpha_0 \quad (10.9)$$

$$K_{rB} = \frac{3 \cdot G \cdot L^{2.4} \cdot B^{0.6}}{12^{0.75} \cdot (1-\nu)}, \quad k_{rB} \cong \begin{cases} 1 - 0.30 \cdot \alpha_0 & \text{για } \nu < 0.45 \\ 1 - 0.25 \cdot \alpha_0 \cdot \left(\frac{L}{B} \right)^{0.30} & \text{για } \nu \cong 0.50 \end{cases} \quad (10.10)$$

$$\alpha_0 = \frac{\omega \cdot B}{2 \cdot V_s} \quad (10.11)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10.12)$$

Στις παραπάνω σχέσεις ω είναι η κυκλική συχνότητα της διέγερσης, V_s η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων στο έδαφος και ρ η πυκνότητα του εδάφους (σε t/m^3 εφόσον το μέτρο διάτμησης τίθεται σε kPa). Η τιμή του δυναμικού συντελεστή k_z δίνεται συναρτήσει της αδιάστατης συχνότητας α_0 από σχετικό διάγραμμα, με την τιμή του να κυμαίνεται μεταξύ 0.6-1.0 για τις συνήθεις περιπτώσεις ορθογωνικών θεμελίων και μεταξύ 0.8-1.35 για θεμέλια μεγάλου μήκους (Gazetas, 1991). Στην περίπτωση τετραγωνικού θεμελίου χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις 10.8 για την κατακόρυφη διεύθυνση και 10.9 για τη στρωφική (λικνιστική) γύρω από τους δυο οριζόντιους άξονες. Σημειώνεται πως η συνήθης μορφή των παραπάνω σχέσεων υπολογισμού των δεικτών εμπέδησης χρησιμοποιεί το ήμισυ των διαστάσεων του θεμελίου στις σχέσεις υπολογισμού. Στο παρόν οι εξισώσεις έχουν τροποποιηθεί, ώστε τα σύμβολα B και L να αφορούν το συνολικό πλάτος και μήκος του θεμελίου, για την επίτευξη ενιαίας παρουσίας με την εναλλακτική μέθοδο υπολογισμού και την αποφυγή δημιουργίας σύγχυσης στον αναγνώστη.

Η τιμή του μέτρου διάτμησης, η οποία που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των σταθερών των δεικτών εμπέδησης, θα πρέπει να αντιστοιχεί στην αναπτυσσόμενη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού. Είναι άλλωστε γνωστό πως το έδαφος συμπεριφέρεται έντονα μη-γραμμικά, με το μέτρο διάτμησης να απομεινώνεται σημαντικά με τη διατμητική παραμόρφωση βάσει καμπυλών $G-\gamma$, όπως έχει αποδειχτεί τόσο για αμμώδη (Seed, Wong, Idriss, & Tokimatsu, 1986) όσο και για

αργιλικά εδάφη (Vucetic & Dobry, 1991). Σχετικές προδιαγραφές για απομείωση του μέτρου διάτμησης, όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για την αναπτυσσόμενη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους, δίνονται από τη **FEMA 450 §5.6.2.1.1**.

Οι τιμές της στατικής δυσκαμψίας, πολλαπλασιαζόμενες με τους αντίστοιχους δυναμικούς συντελεστές για τις διάφορες δυνατότητες κίνησης του θεμελίου που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά της μεθόδου υπολογισμού ελατηριακών σταθερών βάσει του δείκτη εδάφους που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι τιμές αυτές σχετίζονται με το αδρανειακό μέρος του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, ενώ υπενθυμίζεται πως στην πλήρη μορφή τους θα έπρεπε να συνοδεύονται και από τον συνυπολογισμό της απόσβεσης του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης, όσον αφορά την εκτίμηση της τροποποιημένης ιδιοπεριόδου μονοβάθμιων ταλαντωτών, έχει επιβεβαιωθεί μετά από συγκρίσεις με πιο σύνθετες προσομοιώσεις όπου έγινε χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (Kirtas et al., 2007).

Διαδραστικό Αντικείμενο 10.2	Εφαρμογή
Στη θέση αυτή εμφανίζεται διαδραστικό αντικείμενο (εφαρμογή) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.	
Με τη συγκεκριμένη διαδραστική εφαρμογή μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του στατικού μέρους της δυσκαμψίας επιφανειακού ορθογωνικού θεμελίου υπό δυναμική φόρτιση, βάσει των δυναμικών χαρακτηριστικών του εδάφους (Dobry & Gazetas, 1986· Gazetas, 1991· Mylonakis, Nikolaou, & Gazetas, 2006). Σημειώνεται πως οι τιμές των L και B που εισάγονται στα δεδομένα, αφορούν το συνολικό μήκος και πλάτος του θεμελίου, ενώ θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η χρησιμοποιούμενη τιμή του μέτρου διάτμησης του εδάφους να αντιστοιχεί στο αναμενόμενο επίπεδο διατμητικής του παραμόρφωσης.	

Για την περίπτωση των θεμελίων του παραδείγματος, θα υπολογιστούν οι ελατηριακές σταθερές με χρήση της τιμής του δείκτη εδάφους K_s σύμφωνα με τη διαδικασία που προτάθηκε από τον Terzaghi (1955). Δίνεται αμμώδες έδαφος με δείκτη εδάφους $K_s=70000\text{kN/m}^3$ που αντιστοιχεί σε μέση πυκνότητας προς πυκνή άμμο με βάση τις τιμές του Πίνακα 10.1. Η εφαρμογή των Εξισώσεων 10.1-10.7 κατά τους υπολογισμούς, βάσει της συγκεκριμένης προσέγγισης, δίνει για τα θεμέλια των υποστυλωμάτων και για το θεμέλιο του πυρήνα τα αποτελέσματα του Πίνακα 10.3.

	Θεμέλια υποστυλωμάτων	Θεμέλιο πυρήνα
Διαστάσεις θεμελίου (LxB)	2.0x2.0m	4.5x4.0m
Βάθος θεμελίου (D)	0.6m	0.6m
Βασική τιμή K_s	70000 kN/m ³	70000 kN/m ³
Συντελεστής διαστάσεων θεμελίου	0.332	0.290
Συντελεστής σχήματος θεμελίου	1.000	0.963
Συντελεστής βάθους θεμελίου	1.600	1.300
Τελική τιμή K_s	37191.18 kN/m ³	25375.66 kN/m ³
Κατακόρυφο ελατήριο K_z	148764.70 kN/m	456761.85 kN/m
Στροφικό ελατήριο K_{rL}	49588.23 kNm/rad	609015.79 kNm/rad
Στροφικό ελατήριο K_{rB}	49588.23 kNm/rad	770785.61 kNm/rad

Πίνακας 10.3 Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών βάσει του δείκτη εδάφους.

Υπολογισμός διαστάσεων θεμελίου

Είναι σαφές πως για τον υπολογισμό των ελατηριακών σταθερών στα θεμέλια θα πρέπει να είναι γνωστές οι διαστάσεις των θεμελίων. Για τον υπολογισμό των διαστάσεων των θεμελίων, ο κρίσιμος έλεγχος αφορά συνήθως τη φέρουσα ικανότητα εδάφους, άρα είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί η ανάλυση του φορέα ώστε να είναι γνωστά τα εντατικά μεγέθη στη βάση των κατακόρυφων στοιχείων. Καθώς μάλιστα τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν κατά την ανάλυση εξαρτώνται από τις τιμές των ελατηριακών σταθερών που συμμετέχουν στο προσομοίωμα, απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού των τελικών διαστάσεων θεμελίων του φορέα (Κίρτας & Παναγόπουλος, 2013). Στη συνέχεια, εφόσον προσδιοριστούν τα τελικά εντατικά μεγέθη στη βάση των θεμελίων, ο προσδιορισμός των τάσεων εδάφους γίνεται συνήθως με την προσέγγιση του ομοιόμορφου στερεού των τάσεων (Meyerhof, 1953). Η περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού μπορεί να βρεθεί στους Αναγνωστόπουλο και συνεργάτες (2012) και Κίρτα (2011).

Στο τρέχον παράδειγμα, για λόγους οικονομίας χρόνου, οι διαστάσεις των θεμελίων υποστυλωμάτων και πυρήνα δίνονται από την εκφώνηση και μάλιστα με ενιαίες τιμές (1m εκατέρωθεν του κάθε κατακόρυφου στοιχείου), ώστε να βοηθήσουν στη γρήγορη ολοκλήρωση της διαδικασίας προσομοίωσης. Για τους ίδιους λόγους, και ενώ η ακριβής προσομοίωση των στηρίξεων απαιτεί τη θεώρηση επιπέδου $Z=-0.60\text{m}$ (βάθος θεμελίωσης) όπως και την αναπαραγωγή του κατακόρυφου άκαμπτου τμήματος του θεμελίου (Σχήμα 10.2), στο παρόν ακολουθείται μια απλούστερη προσέγγιση, με τις ελατηριακές σταθερές να τίθενται ακριβώς στη βάση των κατακόρυφων στοιχείων του φορέα, στη στάθμη $Z=0.0\text{m}$.

10.2.2. Προσομοίωση ενδόσιμων στηρίξεων στο πρόγραμμα

Για την προσομοίωση του φορέα με την ενδόσιμη θεμελίωση γίνεται αποθήκευση του αρχείου του Κεφαλαίου 9 με διαφορετικό όνομα, ως [Chapter 10.SDB](#).

Η θέση τοποθέτησης των ελατηρίων στη βάση του προσομοιώματος ορίζεται στο κέντρο βάρους του κάθε πεδύλου. Θα πρέπει συνεπώς να δημιουργηθεί ένας κόμβος έδρασης για τον πυρήνα, στο κέντρο του ενιαίου πεδύλου που αποτελεί τη θεμελίωσή του. Με δεδομένο πως η αρχή των αξόνων βρίσκεται σε συντεταγμένες (0,0), υπολογίζονται οι συντεταγμένες στο κέντρο του πεδύλου του πυρήνα (-1.75,1.00), όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 10.1. Ο κόμβος αυτός δημιουργείται σε κάτοψη xy ($Z=0$), σε μια τυχαία θέση, με την εντολή [Draw](#) → [Draw Special Joint](#) (ακολουθεί [escape](#) για έξοδο από το εργαλείο προσθήκης κόμβων). Η σωστή θέση του κόμβου ορίζεται με δεξί [click](#) στον κόμβο και διπλό [click](#) πάνω στις συντεταγμένες της καρτέλας [Location](#) (Σχήμα 10.3). Αφού δοθούν οι σωστές τιμές συντεταγμένων (δεξί μέρος του Σχήματος 10.3), με συνεχή [OK](#) γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας, όπου ο κόμβος πλέον έχει μετακινηθεί στην σωστή του θέση.

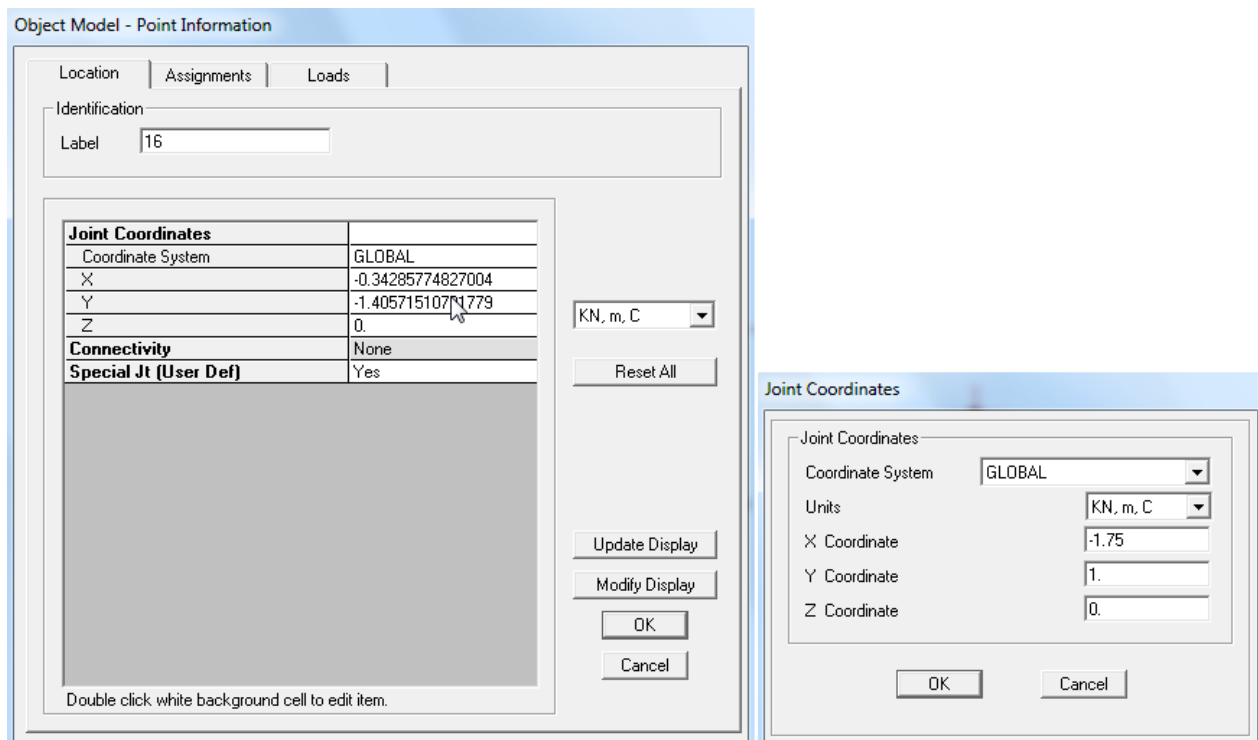
Καθώς η στήριξη του πυρήνα καθορίζεται πλέον από τις ελευθερίες κίνησης του νέου κόμβου που ορίστηκε, αφαιρούνται οι δεσμεύσεις από τους τρεις κόμβους στις βάσεις των ισοδύναμων στύλων που προσομοιώνουν τον κορμό των επιμέρους τοιχωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή των τριών κόμβων και την εντολή [Assign](#) → [Joint](#) → [Restrains](#), όπου αποεπιλέγονται όλες οι δεσμεύσεις των βαθμών ελευθερίας.

Η εφαρμογή των ελατηριακών σταθερών στο [SAP 2000](#) γίνεται αφού πρώτα αλλάξει ο τρόπος στήριξης των κατακόρυφων στοιχείων στη βάση. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, για τις στηρίξεις των κατακόρυφων στοιχείων πλέον θα ισχύουν τα εξής:

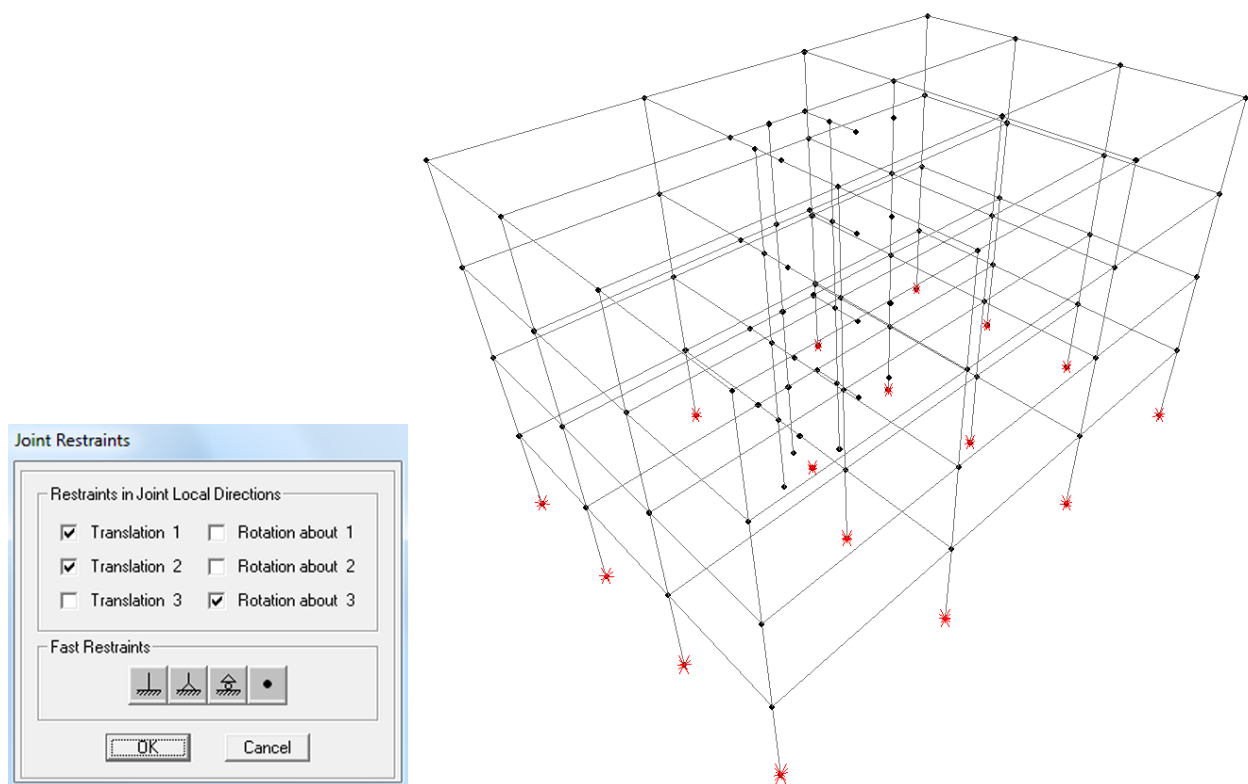
- Για τους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας κατά τους άξονες X και Y και τη στροφή γύρω από τον Z τίθενται ακλόνητες στηρίξεις (αμελητέα συμμετοχή της ενδοσιμότητας του εδάφους σε θεμέλια συνήθων κτιριακών έργων).
- Για το μεταφορικό βαθμό ελευθερίας κατά τον Z και τη στροφή γύρω από άξονες X και Y τίθενται ελατηριακές στηρίξεις.

Επιλέγονται συνεπώς οι κόμβοι της βάσης, εκτός των 3 κόμβων στη βάση των τοιχωμάτων (συνολικά 16 κόμβοι), και με την εντολή [Assign](#) → [Joint](#) → [Restrains](#) δεσμεύονται οι βαθμοί ελευθερίας κατά X και Y και

η στροφή γύρω από τον Z (*Translation 1*, *Translation 2* και *Rotation about 3*). Ο τρόπος εμφάνισης της νέας μορφής στήριξης στη βάση εμφανίζεται στο δεξί μέρος του Σχήματος 10.4.

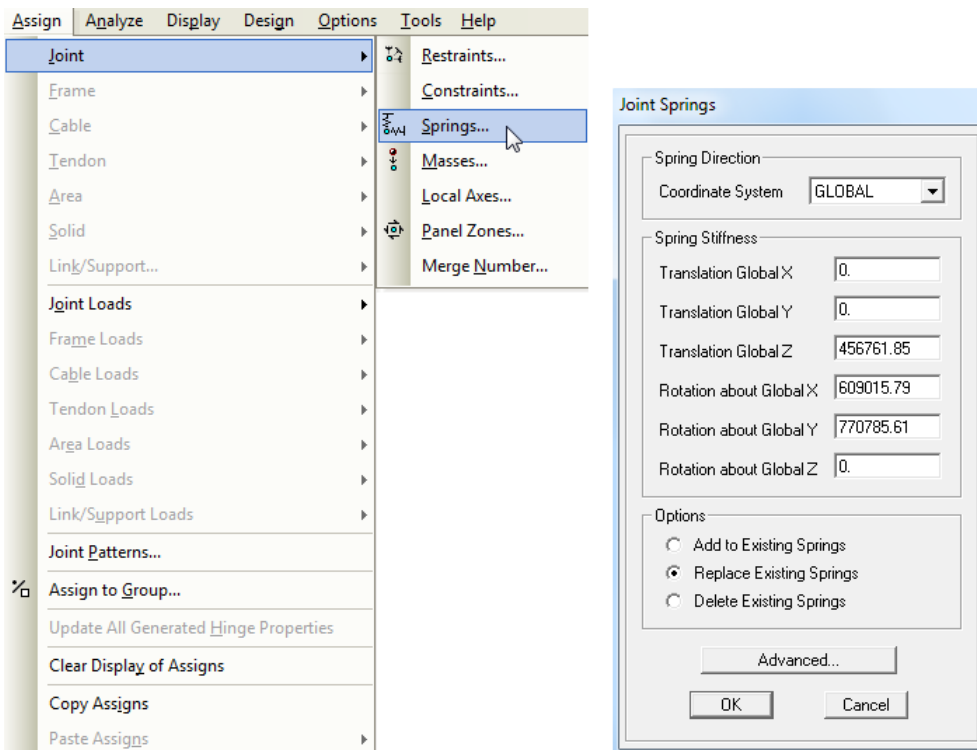


Σχήμα 10.3 Διαδικασία μετακίνησης κόμβου όταν είναι γνωστές οι τελικές του συντεταγμένες (τυχαία θέση κόμβου στο αριστερά μέρος του σχήματος και καθορισμός τελικών τιμών συντεταγμένων στο δεξιά παράθυρο).

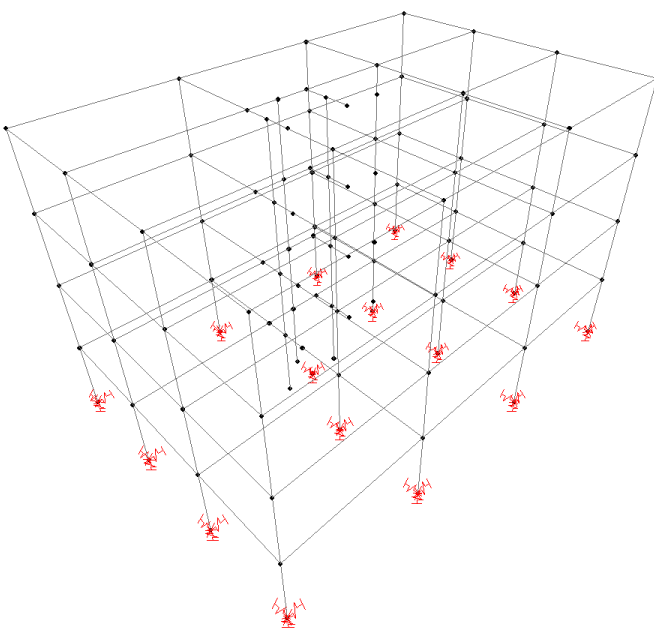


Σχήμα 10.4 Τροποποίηση των δεσμεύσεων των ελευθεριών κίνησης στις θέσεις στήριξης των κατακόρυφων στοιχείων στο πλαίσιο της εισαγωγής ελατηριακών στηρίξεων.

Ακολουθεί η εισαγωγή των ελατηριακών σταθερών. Αρχικά επιλέγεται ο κόμβος στο κέντρο του θεμελίου του πυρήνα, και με την εντολή *Assign* → *Joint* → *Springs* ορίζονται οι τιμές των ελατηριακών σταθερών (Σχήμα 10.5) που έχουν υπολογιστεί στον Πίνακα 10.3. Η επιλογή *GLOBAL* στο σύστημα συντεταγμένων διευκολύνει τον προσανατολισμό του χρήστη αναφορικά με τις ελευθερίες κίνησης που πρέπει να τεθούν. Δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην αντιστοίχιση των τιμών των στροφικών ελατηρίων, όπου η επιμήκης διεύθυνση του θεμελίου L αφορά τη X διεύθυνση προσανατολισμού στην κάτοψη του φορέα. Με αντίστοιχο τρόπο τοποθετούνται οι κατάλληλες τιμές ελατηριακών σταθερών (Πίνακας 10.3) και στους κόμβους βάσης των υποστυλωμάτων, οπότε τα ελατήρια εμφανίζονται στην όψη του φορέα (Σχήμα 10.6).

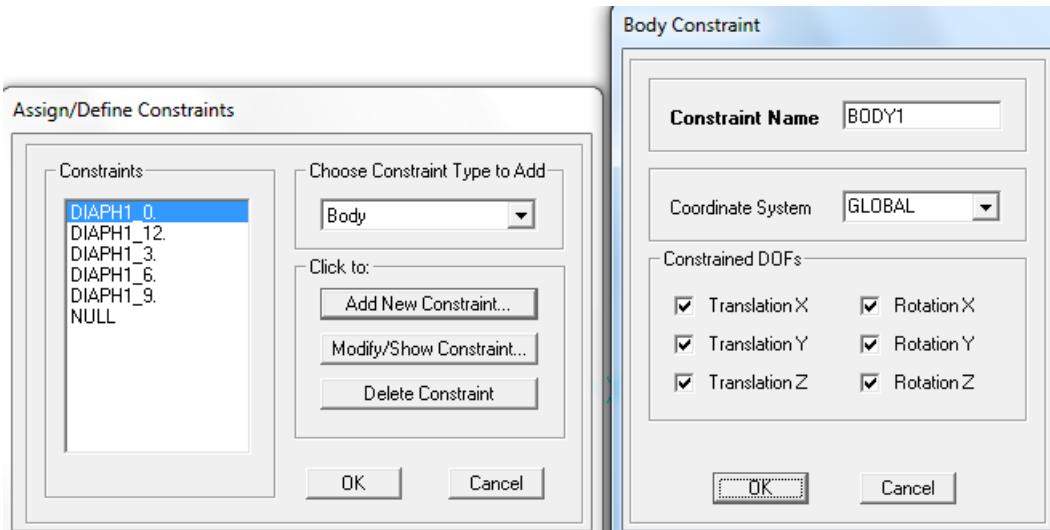


Σχήμα 10.5 Ανάθεση ελατηριακών σταθερών στον κόμβο που αντιστοιχεί στο ενιαίο πέδιλο του πυρήνα.



Σχήμα 10.6 Εμφάνιση ελατηριακών στηρίξεων στη βάση του φορέα.

Καθώς η στήριξη των τοιχωμάτων του πυρήνα γίνεται πλέον σε ενιαίο πέδιλο, θα πρέπει να δοθεί μια μορφή σύνδεσης των 3 κόμβων στη βάση των τοιχωμάτων με τον κόμβο στο κέντρο του πεδίου. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με χρήση κάποιων γραμμικών στοιχείων τύπου στερεού βραχίονα που συνδέει τους κόμβους μεταξύ τους, είτε με επιλογή των τεσσάρων κόμβων και ανάθεση δέσμευσης της μεταξύ τους κίνησης (*Assign* → *Joint* → *Constraints*), με τύπο δέσμευσης που θα εξασφαλίζει κίνηση στερεού σώματος (*Body*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.7.

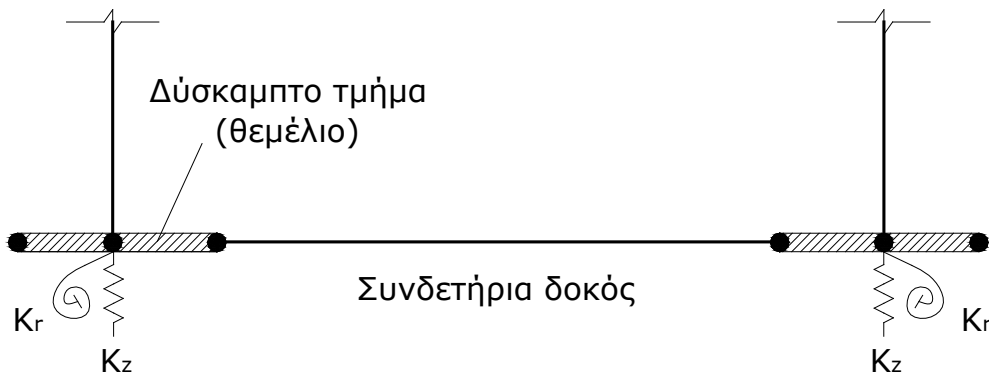


Σχήμα 10.7 Ανάθεση κίνησης στερεού σώματος μεταξύ των κόμβων στη βάση του θεμελίου του πυρήνα.

10.2.3. Προσομοίωση συνδετήριων δοκών

Το τελευταίο βήμα της προσομοίωσης της ενδόσιμης θεμελίωσης αποτελεί η εισαγωγή των συνδετήριων δοκών. Η λειτουργία των συνδετήριων δοκών συνδέεται άρρηκτα με τη θεώρηση παραμορφώσιμου εδάφους, καθώς στην περίπτωση της πάκτωσης στους κόμβους βάσης των κατακόρυφων στοιχείων (φορέας Κεφαλαίου 9) δεν θα υπήρχε παραλαβή φορτίων και ανάπτυξη εντατικών μεγεθών στις συνδετήριες δοκούς.

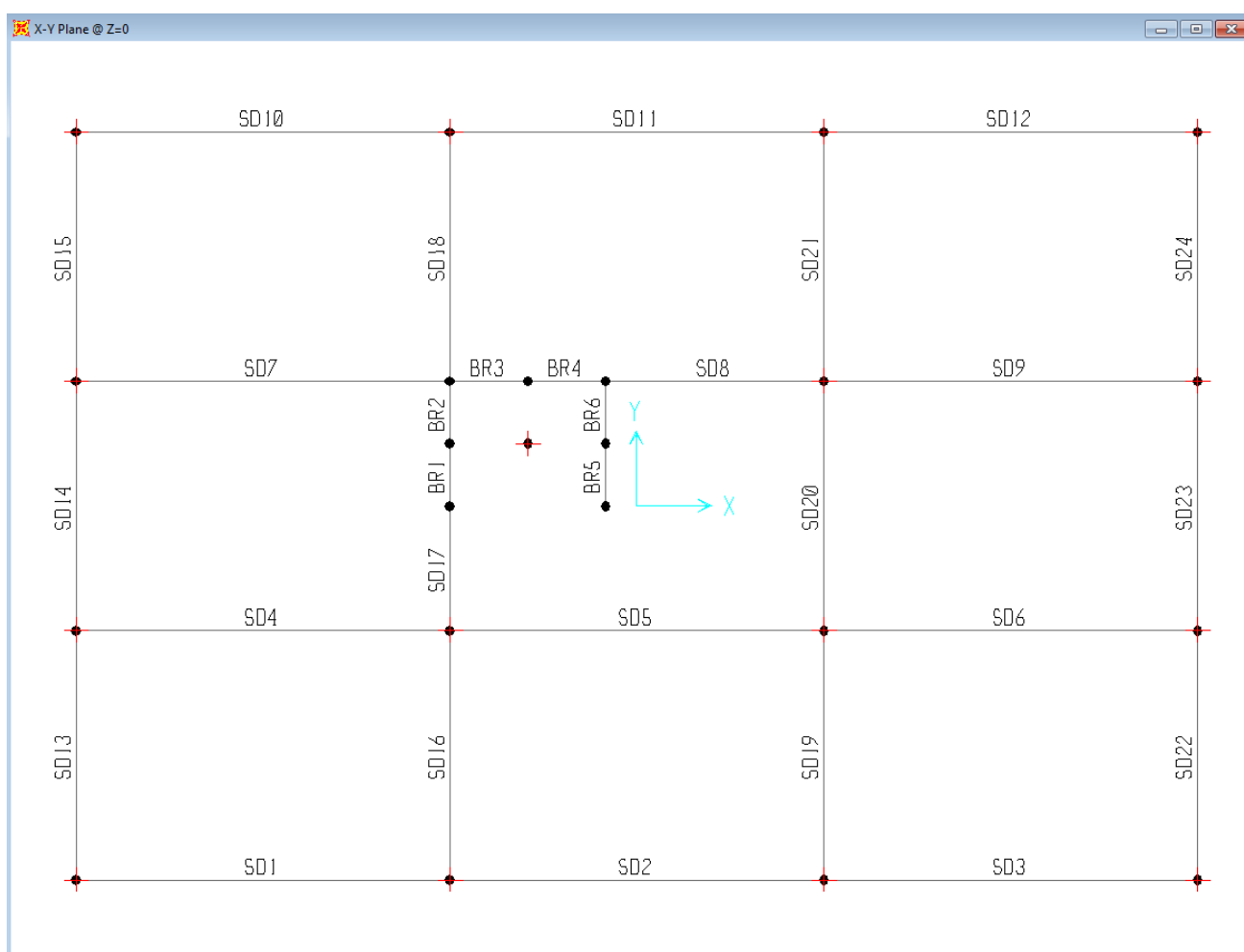
Για την προσομοίωση της δοκού στο συγκεκριμένο παράδειγμα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο τρόπος που φαίνεται στο Σχήμα 10.8. Η συγκεκριμένη όμως προσέγγιση, απαιτεί τη διακριτοποίηση της κάθε συνδετήριας δοκού σε τρία γραμμικά στοιχεία: ένα κεντρικό με διαστάσεις διατομής συνδετήριας δοκού και δύο στα άκρα με περισσότερο δύσκαμπτα χαρακτηριστικά, καθώς προσομοιώνουν το σώμα του θεμελίου. Στο παρόν επιλέγεται μια ευκολότερη προσέγγιση, όπου το μήκος της συνδετήριας δοκού από άξονα σε άξονα υποστυλώματος θα αποτελείται μόνο από ένα γραμμικό στοιχείο, στο οποίο όμως θα δοθούν μέσω ειδικής εντολής δύσκαμπτα άκρα μήκους 1m εκατέρωθεν.



Σχήμα 10.8 Προσομοίωση συνδετήριας δοκού και γραμμικών στοιχείων σύνδεσης με τα υποστυλώματα.

Αρχικά σε επίπεδο xy και σε ύψος $Z=3m$ επιλέγονται όλες οι δοκοί του φορέα, συμπεριλαμβανομένων και των τμημάτων βραχίονα στον πυρήνα (συνολικά **30 Frames**). Είναι σκόπιμο να μην επιλεγούν κόμβοι ώστε να μην γίνει αντιγραφή μη επιθυμητών χαρακτηριστικών στη βάση και αλλοίωση των στηρίξεων που τέθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Στη συνέχεια, γίνεται αναπαραγωγή των δοκών στη βάση του φορέα με την εντολή **Edit → Replicate**. Κατά τον καθορισμό των παραμέτρων της εντολής, αποεπιλέγεται στην καρτέλα **LOADS AND DESIGN** το **Distributed**, ώστε οι δοκοί που θα προκύψουν στη στάθμη θεμελίωσης να μην φέρουν κάποια φόρτιση. Τίθεται αναπαραγωγή κατά $dz=-3.0m$ (**Number=1**) και με **OK** επιτυγχάνεται η γρήγορη δημιουργία γραμμικών στοιχείων δοκού και στη βάση του φορέα. Παρόλο που στην πραγματικότητα οι συνδετήριες δοκοί δέχονται τη φόρτιση των τοιχοπληρώσεων, εδώ επιλέγεται σκοπίμως να παραμείνουν αφόρτιστες, ώστε να μην μεταβληθούν οι συνολικές κατακόρυφες δυνάμεις και ο φορέας που θα προκύψει να είναι άμεσα συγκρίσιμος με τον πακτωμένο φορέα του προηγούμενου Κεφαλαίου.

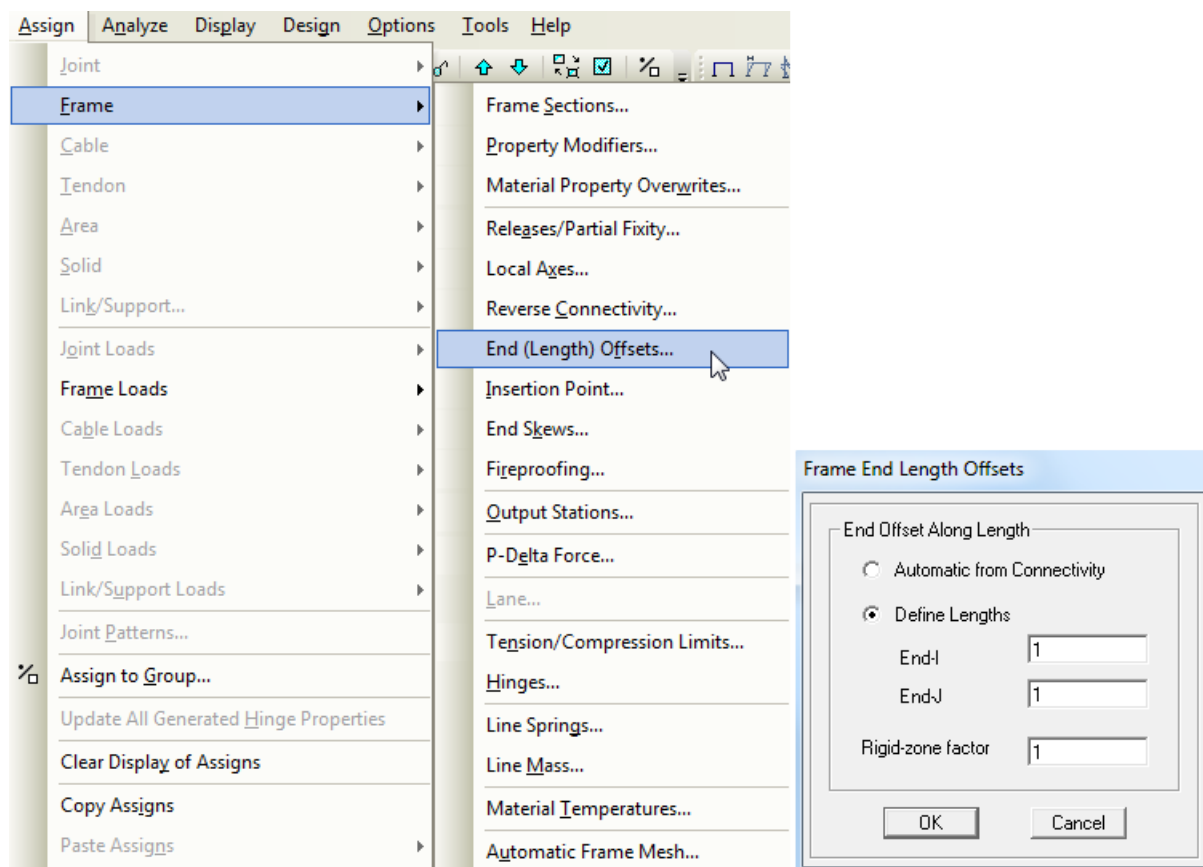
Ακολουθεί η μετονομασία των συνδετήριων δοκών που δημιουργήθηκαν, με την εντολή **Edit → Change Labels** που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 9, ώστε τα ονόματα να αντιστοιχούν σε αυτά που εμφανίζονται στην κάτοψη του Σχήματος 10.1, αποτελώντας συνέχεια της αρίθμησης των ανώτερων ορόφων. Η τελική ονομασία των συνδετήριων δοκών, όπου φαίνεται και η ονομασία των τμημάτων στερεού βραχίονα, εμφανίζεται στο Σχήμα 10.9.



Σχήμα 10.9 Εικόνα κάτοψης της θεμελίωσης μετά τη μετονομασία των συνδετήριων δοκών.

Σε κάθε άκρο των γραμμικών στοιχείων συνδετήριας δοκού θα πρέπει να ανατεθεί δύσκαμπτο τμήμα μήκους 1m, ίσο με το μισό μήκους πεδύλου στην κάθε πλευρά των κατακόρυφων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή δεν αφορά τους βραχίονες του τοιχώματος που ήδη έχουν ιδιότητες δύσκαμπτης διατομής.

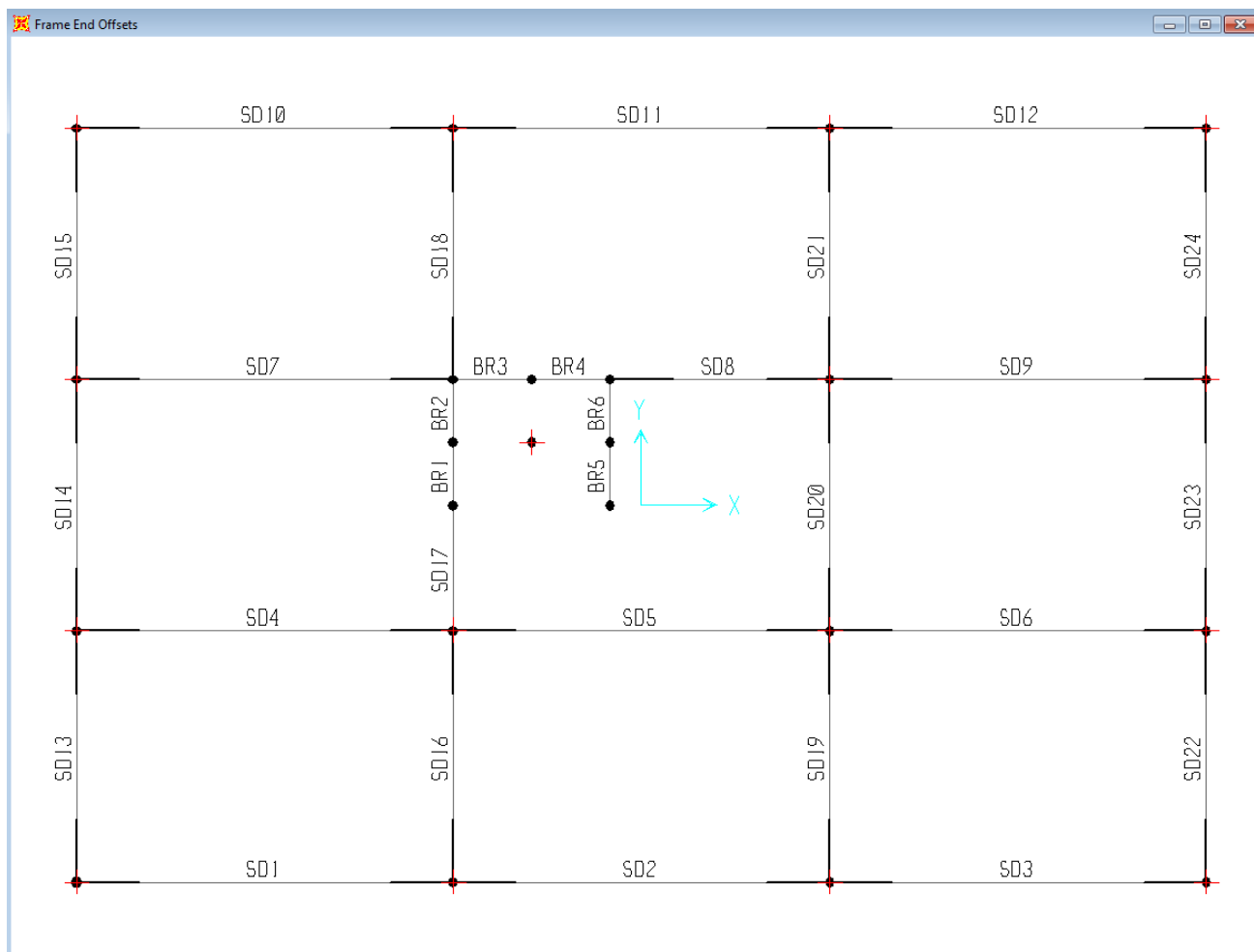
Επιλέγονται συνεπώς όλες οι συνδετήριες δοκοί εκτός των τμημάτων βραχίονα (συνολικά *24 Frames*), και με την εντολή *Assign → Frame → End (Length) Offsets*, ορίζεται 1m δύσκαμπτου μήκους σε κάθε άκρο (Σχήμα 10.10).



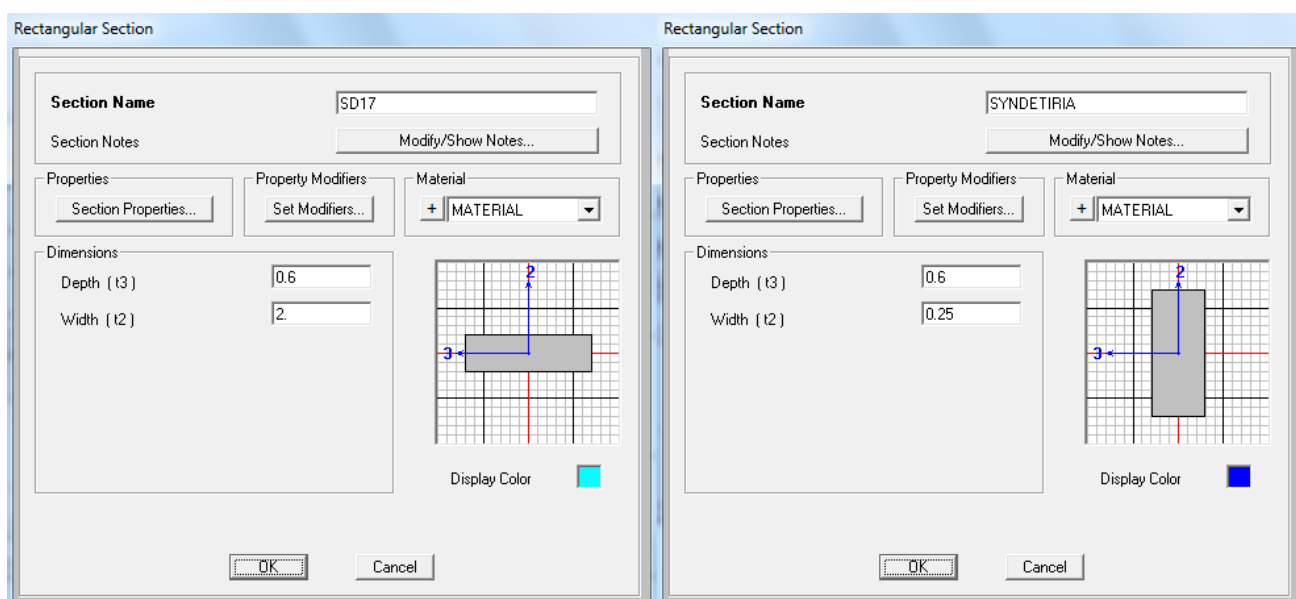
Σχήμα 10.10 Ανάθεση δύσκαμπτων τμημάτων στα άκρα των συνδετήριων δοκών για την προσομοίωση των πεδίων.

Στην εικόνα που εμφανίζεται σε κάτοψη μετά την συγκεκριμένη εντολή (Σχήμα 10.11), παρατηρείται πως η ανάθεση δεν είχε επιτυχία στη δοκό *SD17*, καθώς τυχόν ανάθεση δύσκαμπτων άκρων 1m εκατέρωθεν θα είχε ως αποτέλεσμα μια πλήρως δύσκαμπτη δοκό σε όλο της το μήκος, κάτι που δεν δέχεται το πρόγραμμα. Αυτό γίνεται αντιληπτό και στην κάτοψη του Σχήματος 10.1, όπου το θεμέλιο του υποστυλώματος *K6* φαίνεται πως βρίσκεται σε επαφή με το θεμέλιο του πυρήνα. Για τον λόγο αυτόν θα δημιουργηθεί και θα ανατεθεί στη δοκό *SD17* μια ορθογωνική διατομή διαστάσεων 2.00x0.6m (πλάτος επί ύψος), που προσομοιώνει προσεγγιστικά τις διαστάσεις του πεδίου.

Για όλες τις υπόλοιπες συνδετήριες δοκούς, πλην των τμημάτων βραχίονα, δημιουργείται και ανατίθεται ορθογωνική διατομή διαστάσεων 0.25x0.60m σύμφωνα με τα δεδομένα του φορέα. Η δημιουργία των διατομών γίνεται από την εντολή *Define → Section Properties → Frame Sections* (Σχήμα 10.12) και στη συνέχεια η ανάθεση από το *Assign → Frame → Frame Sections*, στα κατάλληλα γραμμικά στοιχεία κάθε φορά. Σημειώνεται πως οι διαστάσεις που δόθηκαν στην εκφώνηση είναι οι ελάχιστες απαιτούμενες για κτίριο άνω των 3 ορόφων (*Εθνικό Προσάρτημα του EC8 §5.8.2(3)*). Παράλληλα, τίθενται κανονικά οι συντελεστές απομείωσης γεωμετρικών ιδιοτήτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του *EC8 §4.3.1(7)*, όπως εμφανίζονται στο Παράρτημα Β.

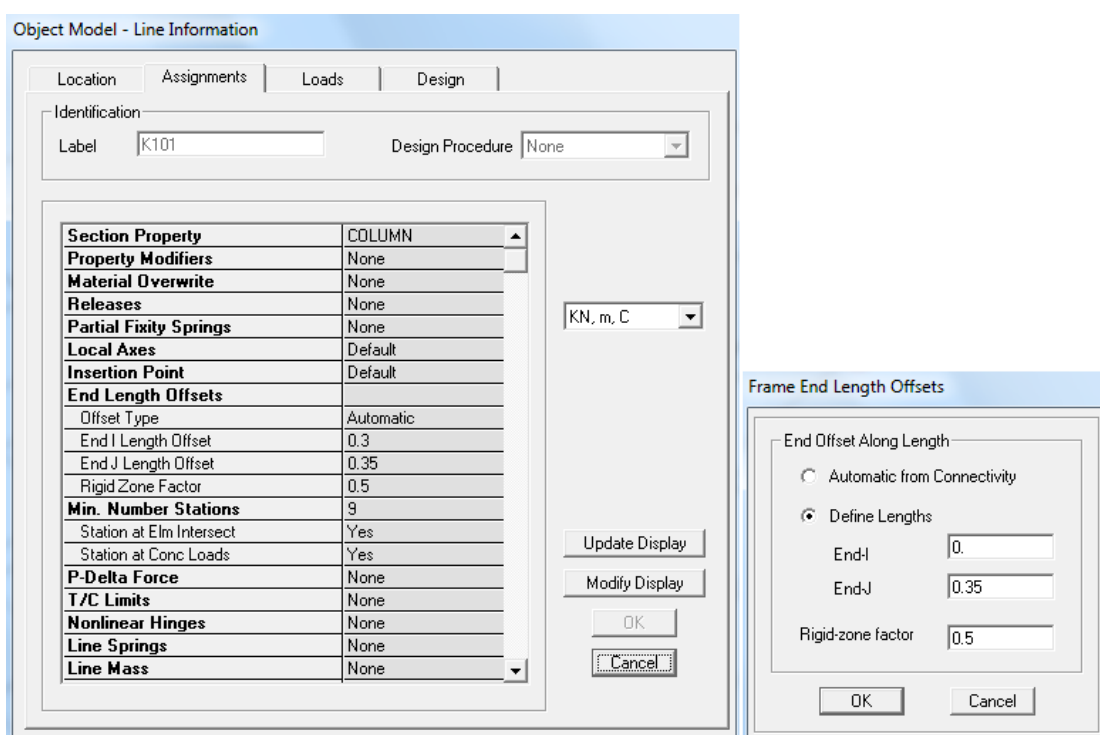


Σχήμα 10.11 Εικόνα κάτοψης της θεμελίωσης μετά την ανάθεση δύσκαμπτων τμημάτων στα άκρα των συνδετήριων δοκών.



Σχήμα 10.12 Δημιουργία διατομών για τις συνδετήριες δοκούς και το γραμμικό στοιχείο SD17 που αποτελεί τμήμα θεμελίου.

Πριν την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του φορέα, γίνεται πάντα ένας προσεκτικός έλεγχος των δεδομένων και των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων. Με δεξί *click* στα γραμμικά στοιχεία των υποστυλωμάτων του ισογείου, παρατηρείται πως η αυτόματη εντολή ανάθεσης άκαμπτων άκρων του προηγούμενου φορέα έχει ενεργοποιηθεί και για τη βάση του υποστυλώματος (*End I Length Offset* στο Σχήμα 10.13 αριστερά), απομειώνοντας το ενεργό του μήκος κατά το ήμισυ του ύψους της συνδετήριας δοκού. Η συγκεκριμένη θεώρηση είναι λανθασμένη, καθώς στο συγκεκριμένο παράδειγμα η συνδετήρια δοκός ξεκινά κάτω από τη στάθμη του κόμβου βάσης του υποστυλώματος. Για τη διόρθωσή της, θα επανακαθοριστεί το άκαμπτο μήκος στα άκρα των υποστυλωμάτων ισογείου (*K101-K115*), επιλέγοντας τα συγκεκριμένα υποστυλώματα (*Select* → *Select* → *Labels* όπου επιλέγεται *Frame* και *Multiple Objects*) και χρησιμοποιώντας την εντολή *Assign* → *Frame* → *End (Length) Offsets*, σύμφωνα με το δεξί μέρος του Σχήματος 10.13. Πλέον το άκαμπτο μήκος στη βάση των υποστυλωμάτων ισογείου έχει αναιρεθεί, όπως μπορεί να διαπιστωθεί με δεξί *click* σε κάποιο στοιχείο, ενώ διατηρείται μόνο το άκαμπτο τμήμα της κορυφής που ορίστηκε με τη συγκεκριμένη εντολή.



Σχήμα 10.13 Επισκόπηση λανθασμένης τιμής άκαμπτου άκρου στη βάση του υποστυλώματος *End I* (αριστερά) και ανάθεση άκαμπτου άκρου μόνο για την περιοχή της κορυφής των υποστυλωμάτων ισογείου (δεξιά).

10.3. Τροποποίηση παραμέτρων φόρτισης

Με τη θεώρηση της ενδόσιμης θεμελίωσης αναμένεται διαφοροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του φορέα, αλλά και ανακατανομή των εντατικών μεγεθών κατά τη σεισμική του απόκριση. Αυτό θα έχει ως πιθανό αποτέλεσμα τη μεταβολή της αναλογίας παραλαβής σεισμικών δυνάμεων από τα τοιχώματα του πυρήνα, με αποτέλεσμα την κατηγοριοποίηση του φορέα σε άλλο τύπο στατικού συστήματος (πλαισιακό, τοιχωματικό ή ισοδύναμο) και την τροποποίηση του συντελεστή συμπεριφοράς η βάσει του οποίου υπολογίστηκε το φάσμα σχεδιασμού σε κάθε διεύθυνση.

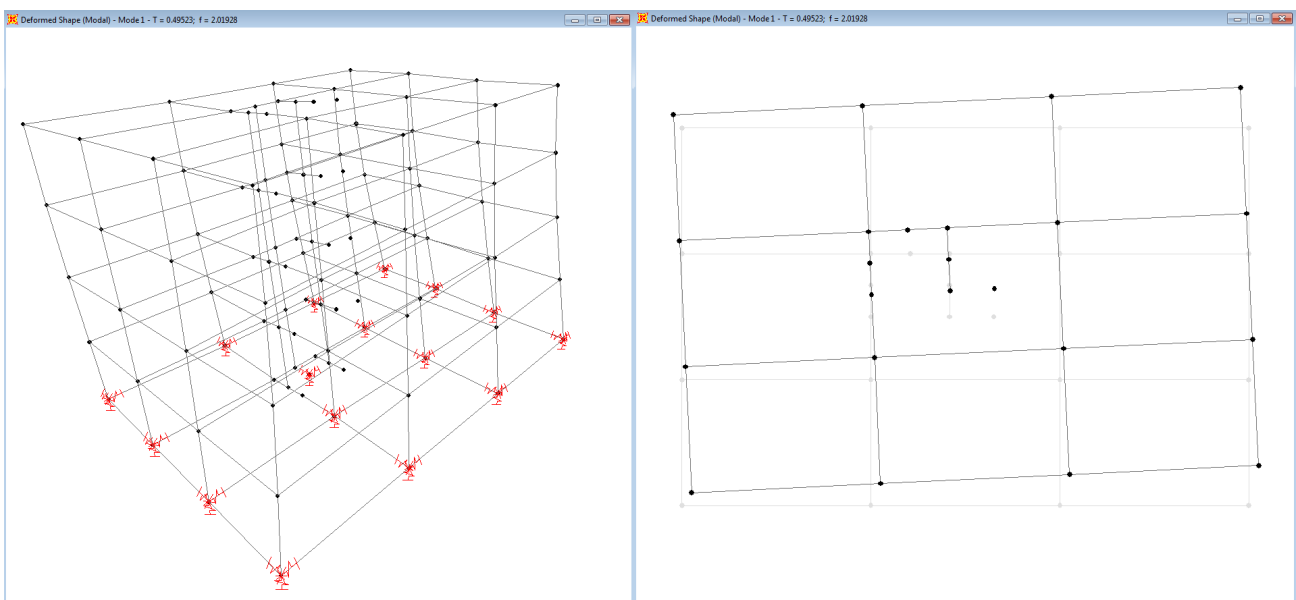
Η παραπάνω διαδικασία θα έπρεπε να ακολουθηθεί κατά την ορθή εφαρμογή των κανονιστικών διατάξεων. Καθώς όμως στόχος του Κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση της επιρροής της ενδοσιμότητας του εδάφους σε σύγκριση με τον πακτωμένο φορέα, κρίνεται πως δεν είναι σκόπιμη η μεταβολή και άλλων παραμέτρων πέραν των συνθηκών στήριξης και των συνδετήριων δοκών που προσομοιώθηκαν.

10.4. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων

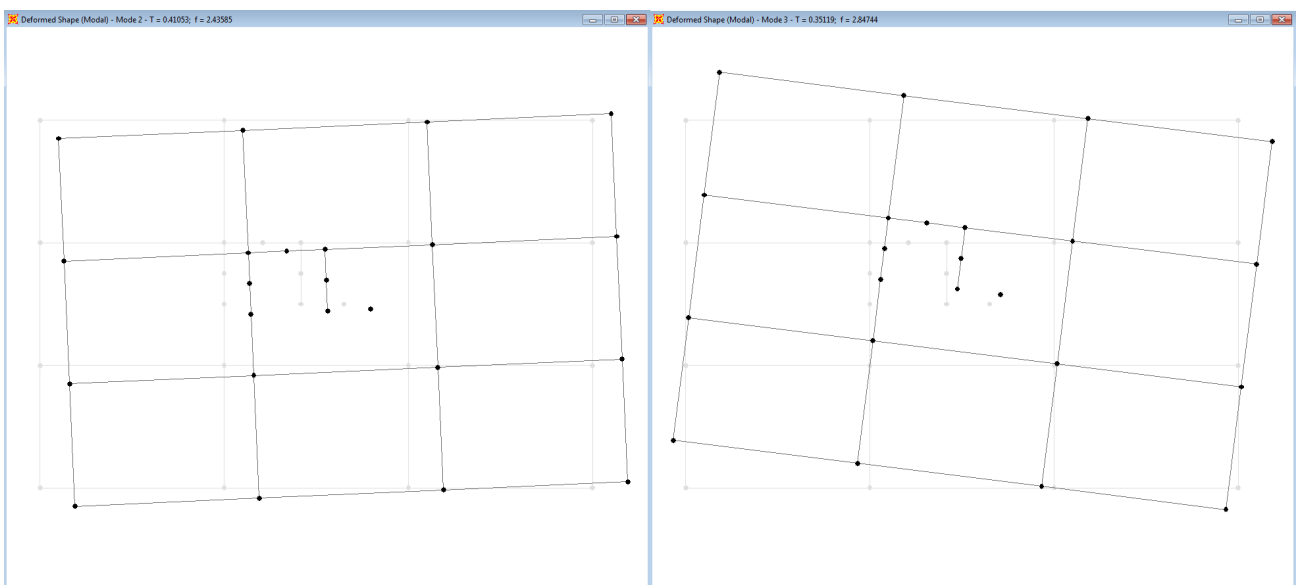
Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*. Κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων ελέγχεται πρώτα η ιδιομορφική απόκριση του φορέα, όπου είναι ευκολότερο να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα προσομοίωσης.

10.4.1. Ιδιομορφική απόκριση του φορέα

Η εμφάνιση των ιδιομορφών (*Display* → *Show Deformed Shape* όπου επιλέγεται η κατάσταση *Modal*) απεικονίζεται σε τρισδιάστατη όψη και σε κάτοψη (τελευταίου ορόφου) στο Σχήμα 10.14. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 10.15, απεικονίζονται σε κάτοψη η 2η και 3η ιδιομορφή του φορέα. Παρατηρείται μια σαφής αύξηση της τιμής των ιδιοπεριόδων σε σχέση με τον πακτωμένο φορέα, ενώ με τη βοήθεια του *Start Animation* φαίνεται πιο καθαρός ο μεταφορικός χαρακτήρας στις δυο πρώτες ιδιομορφές και ο στρεπτικός στην 3^η ιδιομορφή.



Σχήμα 10.14 Εικόνα του φορέα κατά την πρώτη ιδιομορφή ($T_1=0.495s$).



Σχήμα 10.15 Εικόνα του φορέα κατά τη δεύτερη και τρίτη ιδιομορφή ($T_2=0.411s$, $T_3=0.351s$).

Πολυμεσικό Αντικείμενο 10.1	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την τρισδιάστατη εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 1^η ιδιομορφή, για την περίπτωση ενδόσιμου εδάφους θεμελίωσης. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης στη διεύθυνση Y, με μικρή μόνο συμμετοχή της στρέψης, σε αντίθεση με την αντίστοιχη ιδιομορφή του πακτωμένου φορέα του Κεφαλαίου 9. Παρατηρείται ταυτόχρονα η επιρροή της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης, με δυνατότητα κατακόρυφης μετακίνησης και στροφής γύρω από οριζόντιους άξονες στη βάση των κατακόρυφων στοιχείων.</p>	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 10.2	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 1^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου, για την περίπτωση ενδόσιμου εδάφους θεμελίωσης. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης στη διεύθυνση Y, με μικρή ταυτόχρονη συμμετοχή στρέψης, παρουσιάζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με την αντίστοιχη ιδιομορφή του πακτωμένου φορέα του Κεφαλαίου 9.</p>	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 10.3	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 2^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου, για την περίπτωση ενδόσιμου εδάφους θεμελίωσης. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Είναι εμφανής η έντονη συμμετοχή της μεταφορικής κίνησης στη διεύθυνση X, με μικρή ταυτόχρονη συμμετοχή στρέψης, παρουσιάζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με την αντίστοιχη ιδιομορφή του πακτωμένου φορέα του Κεφαλαίου 9.</p>	

Πολυμεσικό Αντικείμενο 10.4	Video
<p>Στη θέση αυτή εμφανίζεται πολυμεσικό αντικείμενο (video-animation) το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ηλεκτρονική έκδοση του συγγράμματος. Η περιγραφή του αντικειμένου δίνεται παρακάτω.</p>	
<p>Το συγκεκριμένο πολυμεσικό αντικείμενο εμφανίζει σε video την εικόνα της μετακίνησης του φορέα κατά την 3^η ιδιομορφή, σε κάτοψη του τελευταίου ορόφου, για την περίπτωση ενδόσιμου εδάφους θεμελίωσης. Η συγκεκριμένη μορφή εμφάνισης διευκολύνει σημαντικά στην ταυτοποίηση του μεταφορικού ή/και στρεπτικού χαρακτήρα της ιδιομορφής. Η ιδιομορφή εμφανίζεται σχεδόν αποκλειστικά στρεπτική, παρουσιάζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με την αντίστοιχη ιδιομορφή του πακτωμένου φορέα του Κεφαλαίου 9.</p>	

10.4.2. Μετακινήσεις φορέα κατά τη δυναμική φασματική ανάλυση

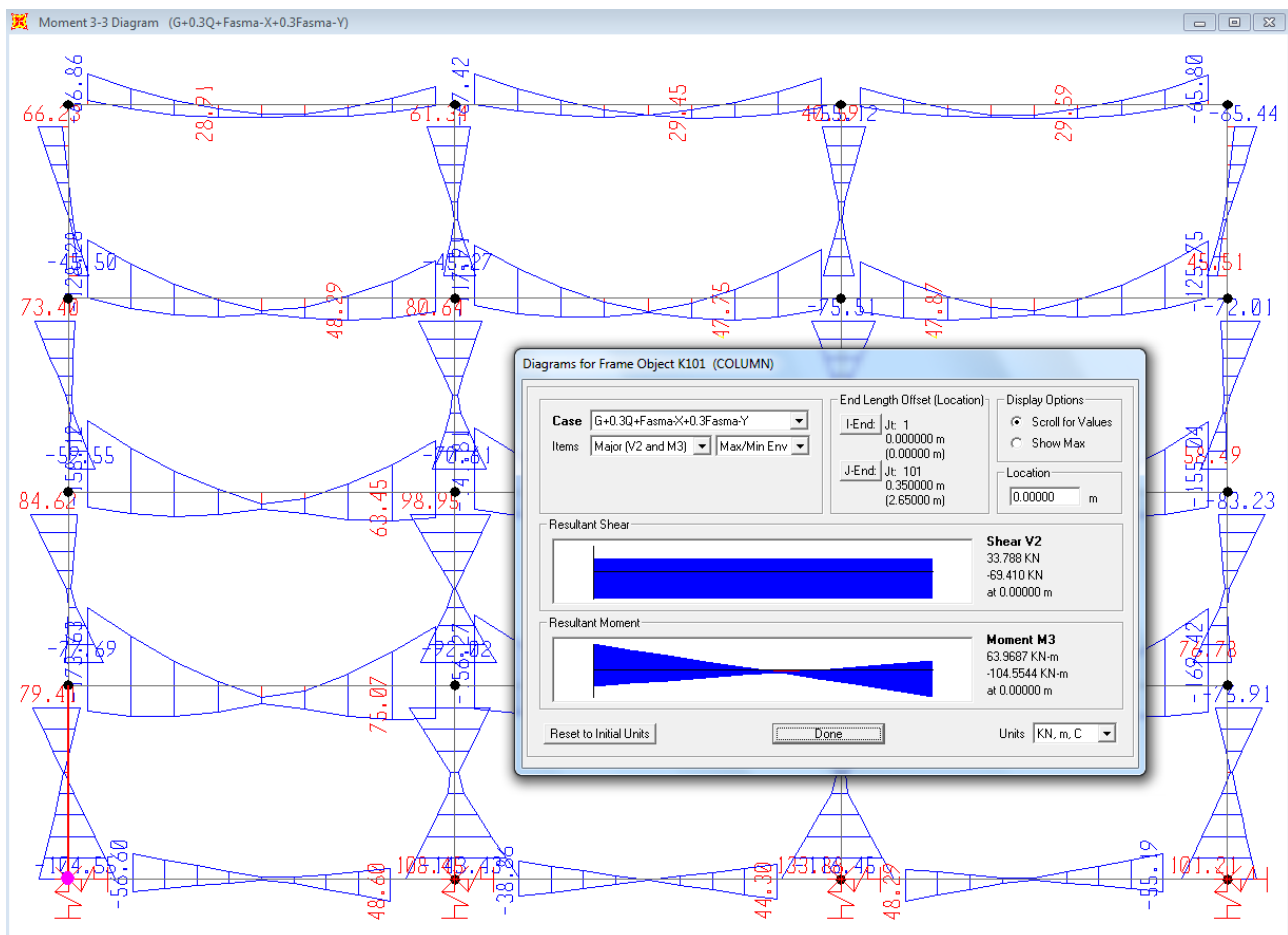
Με την εμφάνιση της παραμορφωμένης γραμμής στην περίπτωση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$, εμφανίζεται ο φορέας σε παραμορφωμένη κατάσταση. Η μέγιστη πραγματική μετακίνηση κατά X του κόμβου 401 για τον συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$, υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές συμπεριφοράς ανά διεύθυνση φόρτισης, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 9, ως εξής:

$$-0.0002157 - 0.30 \cdot 0.00006662 \pm 3.6 \cdot 0.00824 \pm 3.0 \cdot 0.3 \cdot 0.00408 = -0.0336m \quad (10.13)$$

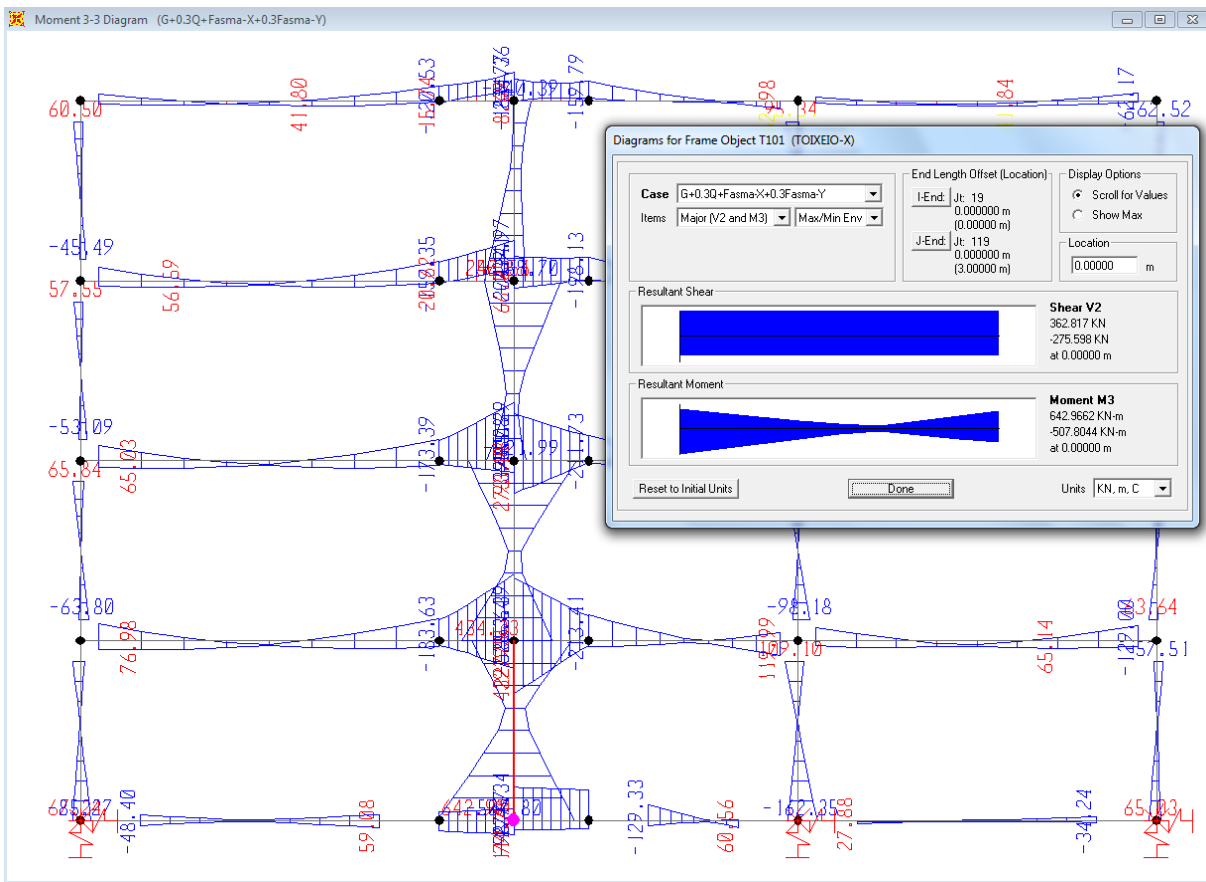
10.4.3. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Στο Σχήμα 10.16 εμφανίζονται τα διαγράμματα καμπτικών ροπών σε πλαίσιο στο επίπεδο xz ($Y=-6$) για τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$. Παρατηρείται η αύξηση των τιμών ροπής στη βάση των υποστυλωμάτων σε σχέση με τον πακτωμένο φορέα (στη λεπτομέρεια εμφανίζεται το υποστύλωμα $K101$).

Στο Σχήμα 10.17 εμφανίζονται τα διαγράμματα καμπτικών ροπών στο πλαίσιο xz ($Y=2$) που περιλαμβάνει το τοίχωμα πλάτης του πυρήνα ($T101$). Διαπιστώνεται η σημαντική μείωση της τιμής ροπής που παραλαμβάνεται από το τοίχωμα σε σχέση με τα τον πακτωμένο φορέα, κάτι που συνδέεται με την επιβάρυνση των υποστυλωμάτων που παρατηρήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 10.16 Διάγραμμα ροπών κάμψης $M33$ για σεισμικό συνδυασμό φόρτισης που περιλαμβάνει δυναμική φασματική ανάλυση (λεπτομέρεια στη βάση του στύλου $K101$).



Σχήμα 10.17 Διάγραμμα ροπών κάμψης M33 για σεισμικό συνδυασμό φόρτισης που περιλαμβάνει δυναμική φασματική ανάλυση (λεπτομέρεια στη βάση του τοιχώματος T101).

10.4.4. Ανάγνωση αποτελεσμάτων από πίνακες τιμών

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 9, μπορούν να εμφανιστούν αποτελέσματα της ανάλυσης σε πινακοποιημένη μορφή. Στο Σχήμα 10.18 φαίνεται η καρτέλα με τις τιμές των ιδιοπεριόδων και του ποσοστού μάζας που ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή (στήλες με έντονη γραφή). Παρατηρείται πως η 1^η ιδιομορφή εμφανίζει μικρή στρέψη (19.63%) και κυρίως μεταφορική κίνηση κατά Y (75.67%), η 2^η ιδιομορφή μεταφορική κίνηση κατά X (75.16%) με ελάχιστη συμμετοχή της στρέψης (8.27%), ενώ η 3^η ιδιομορφή στρέψη (60.62%) και ελάχιστη μεταφορική κίνηση κατά X και Y (10.86% και 7.90% αντίστοιχα).

TABLE: Modal Participating Mass Ratios	itputCatepTyp:pNi	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	title	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
4	Modal Mode	1	0.495225	0.00079	0.7567	0	0.00079	0.7567	0	0.879	0.00083	0.19632	0.879	0.00083
5	Modal Mode	2	0.410534	0.7516	0.01799	0	0.75239	0.77469	0	0.02221	0.86711	0.08265	0.90121	0.86793
6	Modal Mode	3	0.351193	0.1086	0.07903	0	0.86099	0.85372	0	0.09681	0.12845	0.60619	0.99802	0.99638
7	Modal Mode	4	0.140127	0.00712	0.05152	0	0.86811	0.90524	0	0.00084	0.00055	0.05038	0.99886	0.99693
8	Modal Mode	5	0.106173	0.05553	0.04686	0	0.92364	0.9521	0	0.00063	0.00144	0.00511	0.99949	0.99837
9	Modal Mode	6	0.093782	0.04696	0.01635	0	0.9706	0.96845	0	0.00025	0.00107	0.03839	0.99974	0.99944
10	Modal Mode	7	0.081377	0.00389	0.01142	0	0.97449	0.97987	0	0.00008791	0.00007697	0.00991	0.99982	0.99951
11	Modal Mode	8	0.06056	0.00014	0.00102	0	0.97463	0.98089	0	0.000008987	0.000009548	0.00388	0.99983	0.99952
12	Modal Mode	9	0.058535	0.0141	0.00756	0	0.98873	0.98845	0	0.00007323	0.00032	0.00018	0.99991	0.99984
13	Modal Mode	10	0.052851	0.00631	0.00838	0	0.99504	0.99682	0	0.00008847	0.00013	0.00571	0.99999	0.99997
14	Modal Mode	11	0.043229	0.00363	0.00131	0	0.99867	0.99813	0	0.000003226	0.00002078	0.00003216	1	0.99999
15	Modal Mode	12	0.039314	0.00133	0.00187	0	1	1	0	0.000002259	0.000005811	0.00124	1	1

Σχήμα 10.18 Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο Excel (εμφανίζεται ενδεικτικά η καρτέλα με το ποσοστό μάζας που ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή).

10.4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον πακτωμένο φορέα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ πακτωμένου φορέα και φορέα σε ενδόσιμο έδαφος φαίνεται για επιλεγμένα αποτελέσματα στον Πίνακα 10.4. Για τα διάφορα εντατικά μεγέθη του Πίνακα, χρησιμοποιείται ενδεικτικά ο σεισμικός συνδυασμός $G+0.3Q+Fasma-X+0.3Fasma-Y$, ενώ παρουσιάζονται οι μέγιστες απόλυτες τιμές. Θετικό πρόσημο στη διαφορά σημαίνει αύξηση της απόλυτης τιμής του αντίστοιχου μεγέθους ενώ αρνητικό μείωση, σε σχέση πάντα με τον πακτωμένο φορέα.

Κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων, η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του φορέα σε ενδόσιμο έδαφος, αν και αυξημένη, παραμένει οριακά στο πλατώ του φάσματος σχεδιασμού που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πως το κύριο αίτιο των διαφορετικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν δεν είναι η διαφορετική συνολική σεισμική φόρτιση του φορέα, λόγω της μεταβολής της ιδιοπεριόδου του, αλλά ο συνολικά διαφορετικός τρόπος φόρτισης και απόκρισης και η ανακατανομή των εντατικών μεγεθών στα επιμέρους δομικά στοιχεία, λόγω του ενδόσιμου εδάφους θεμελίωσης.

Από την κριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Πίνακα, διαπιστώνεται αρχικά ο έντονα διαφορετικός τρόπος απόκρισης, όπως προκύπτει από τον μεταφορικό ή στρεπτικό χαρακτήρα των πρώτων τριών ιδιομορφών. Είναι εμφανές πως ο φορέας στο ενδόσιμο έδαφος έχει μεγαλύτερη συμμετοχή μεταφορικής συνιστώσας στις δυο πρώτες ιδιομορφές, ενώ στρεπτική είναι η 3^η ιδιομορφή. Η αύξηση της 1^{ης} ιδιοπεριόδου οριακά δεν οδήγησε σε τιμές φασματικής απόκρισης από τον 3^ο κλάδο του φάσματος σχεδιασμού (όριο $T_c=0.50s$).

Η μετακίνηση στον κόμβο της οροφής του κτιρίου παρουσιάζει μια σημαντική αύξηση της τάξης του 66%, ενώ σημαντικά αυξημένη είναι και η ροπή στη βάση και κυρίως στην κορυφή του υποστυλώματος ισογείου K101. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αδυναμία του τοιχώματος να παραλάβει τις ίδιες ροπές με την περίπτωση της πάκτωσης, καθώς διαπιστώνεται μείωση αναπτυσσόμενης ροπής της τάξης του 40% στην ανάλυση του φορέα με την ενδόσιμη θεμελίωση.

Από την επισκόπηση των ενδεικτικών αποτελεσμάτων που παρατίθενται στον Πίνακα 10.4, γίνεται σαφές πως η θεώρηση ενδόσιμου εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη σε μια κατασκευή και θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά στο στάδιο της προσομοίωσης και της ανάλυσης.

Μέγεθος	Πακτωμένος φορέας	Φορέας σε ενδόσιμο έδαφος	Διαφορά
Τέμνουσα βάσης κατά X	959.66 kN	743.34 kN	-22.54%
Τέμνουσα βάσης κατά Y	700.63 kN	334.67 kN	-52.23%
1η ιδιοπερίοδος	0.420s (RZ:52%, Y:39%)	0.495s (Y:76%, RZ:20%)	17.86%
2η ιδιοπερίοδος	0.324s (X:43%, Y:30%)	0.411s (X:75%, RZ:8%)	26.85%
3η ιδιοπερίοδος	0.283s (X:34%, RZ:31%)	0.351s (RZ:61%)	24.03%
Κόμβος 401 Ux	0.0202m	0.0336m	66.34%
Ροπή βάσης στύλου K101	88.35 kNm	104.55 kNm	18.34%
Ροπή κορυφής στύλου K101	52.37 kNm	79.41 kNm	51.63%
Τέμνουσα βάσης στύλου K101	53.07 kN	69.41 kN	30.79%
Ροπή βάσης τοιχώματος T101	1085.17 kNm	642.97 kNm	-40.75%
Ροπή κορυφής τοιχώματος T101	544.16 kNm	479.71 kNm	-11.84%
Τέμνουσα βάσης τοιχώματος T101	524.69 kN	362.82 kN	-30.85%

Πίνακας 10.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ πακτωμένου φορέα και φορέα σε ενδόσιμη στήριξη.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 10^{ου} Κεφαλαίου

- Avramidis, I., & Morfidis, K. (2006). Bending of beams on three-parameter elastic foundation. *International Journal of Solids and Structures*, 43(2), 357-375. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.033
- BSSC (2003). *FEMA 450 - NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- BSSC (2009). *FEMA P-750 - NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- CEN (2004). *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Dobry, R., & Gazetas, G. (1986). Dynamic response of arbitrarily shaped foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 112(2), 109-135. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:2(109)
- Gazetas, G. (1987). Soil-Dynamics: An overview. In P. Banerjee & R. Butterfield (Eds.), *Dynamic behaviour of foundations and buried structures* (pp. 1-43). London: Elsevier Applied Science.
- Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 117(9), 1363-1381. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1363)
- Kirtas, E., Trevelopoulos, K., Rovithis, E., & Pitilakis, K. (2007). *Discussion on the fundamental period of sdof systems including soil-structure interaction*. Paper presented at the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.
- Kirtas, E., Rovithis, E., & Pitilakis, K. (2009). Subsoil interventions effect on structural seismic response. Part I: Validation of numerical simulations. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(2), 155-169. doi: 10.1080/13632460802347463
- Luco, J. E., & Westmann, R. A. (1971). Dynamic Response of Circular Footing. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 97(5), 1381-1395.
- Meyerhof, G. G. (1953). *The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads*. Paper presented at the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Zurich.
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). Footings Under Seismic Loading: Analysis and Design Issues with Emphasis on Bridge Foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(9), 824-853.
- Seed, H., Wong, R., Idriss, I., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 112(11), 1017-1032. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016)
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, 5(4), 297-326. doi: 10.1680/geot.1955.5.4.297
- Veletsos, A. S., & Wei, Y. T. (1971). Lateral and rocking vibrations of footings. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(9), 1227-1248.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117(1), 89-107. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89)
- Winkler, E. (1867). *Die lehre von der elasticität und festigkeit*. Prague: Dominicus.
- Wolf, J. P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

- Αβραμίδης, Ι. Ε. (2001). *Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών. Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις μεθόδους προσομοίωσης κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Αναγνωστόπουλος, Χ., Χατζηγώγος, Θ., Αναστασιάδης, Α., & Πιτιλάκης, Δ. (2012). *Θεμελιώσεις, αντιστηρίξεις και γεωτεχνικά έργα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβάζη.
- Κίρτας, Ε. (2007). *Αριθμητική διερεύνηση βελτίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών με επεμβάσεις στο υπέδαφος θεμελίωσης*. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Κίρτας, Ε. (2011). *Σημειώσεις θεωρίας: Θεμελιώσεις*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Κίρτας, Ε., & Παναγόπουλος, Γ. (2013). *Σημειώσεις εργαστηρίου: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής (SAP 2000 v.14 και Master-Fespa 10 v.5.4.0.14)*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Μορφίδης, Κ., Μπαμπούκας, Ε., & Αβραμίδης, Ι. (2008). *Αντιμετώπιση προβλημάτων προσομοίωσης θεμελιώσεων σε ενδόσιμο έδαφος με το πρόγραμμα στατικής ανάλυσης κτιριακών κατασκευών ΡΑΦ του ΤΟΛ*. Άρθρο που παρουσιάστηκε στο 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα.
- Πιτιλάκης, Κ., Γεωργιάδης, Μ., Μπαντής, Σ., Χατζηγώγος, Θ., Αναγνωστόπουλος, Χ., & Τίκα, Θ. (1999). *Αντισεισμικός σχεδιασμός θεμελιώσεων, αντιστηρίξεων και γεωκατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΑΣΤΕ.
- Τ.Ο.Λ. (2009). *ΡΑΦ - Στατική και Αντισεισμική Ανάλυση Κτιρίων: Εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης*. Ηράκλειο: Τεχνικός Οίκος Λογισμικού.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

Δυναμική ελαστική ανάλυση με χρονοϊστορία επιταχύνσεων

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 11 παρουσιάζεται η προσομοίωση της δυναμικής ελαστικής ανάλυσης απλού φορέα, με φόρτιση χρονοϊστορία επιταχύνσεων. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: εναλλακτικές δυνατότητες καθορισμού μάζας σε φορέα, μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης, χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και σχετικές βάσεις δεδομένων πραγματικών καταγραφών, απόσβεση τύπου Rayleigh, επιλογή χρονικού βήματος κατά τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο, ανάγνωση αποτελεσμάτων με μορφή χρονοϊστορίας απόκρισης.

Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις δυναμικής των κατασκευών, εφαρμογή του παραδείγματος που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 3, όπως και επιμέρους γνώσεις που διδάχθηκαν στο πλαίσιο των προηγούμενων Κεφαλαίων του συγγράμματος.

11.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η δυναμική ελαστική ανάλυση του φορέα του Κεφαλαίου 3 (Σχήμα 3.1) για τη χρονοϊστορία επιταχύνσεων του σεισμού της Loma Prieta (1989) στο San Francisco (αρχείο oak_whaf-1.th από τη βιβλιοθήκη επιταχυνσιογραφημάτων του προγράμματος).

11.2. Υπολογισμός και ανάθεση μάζας στον φορέα

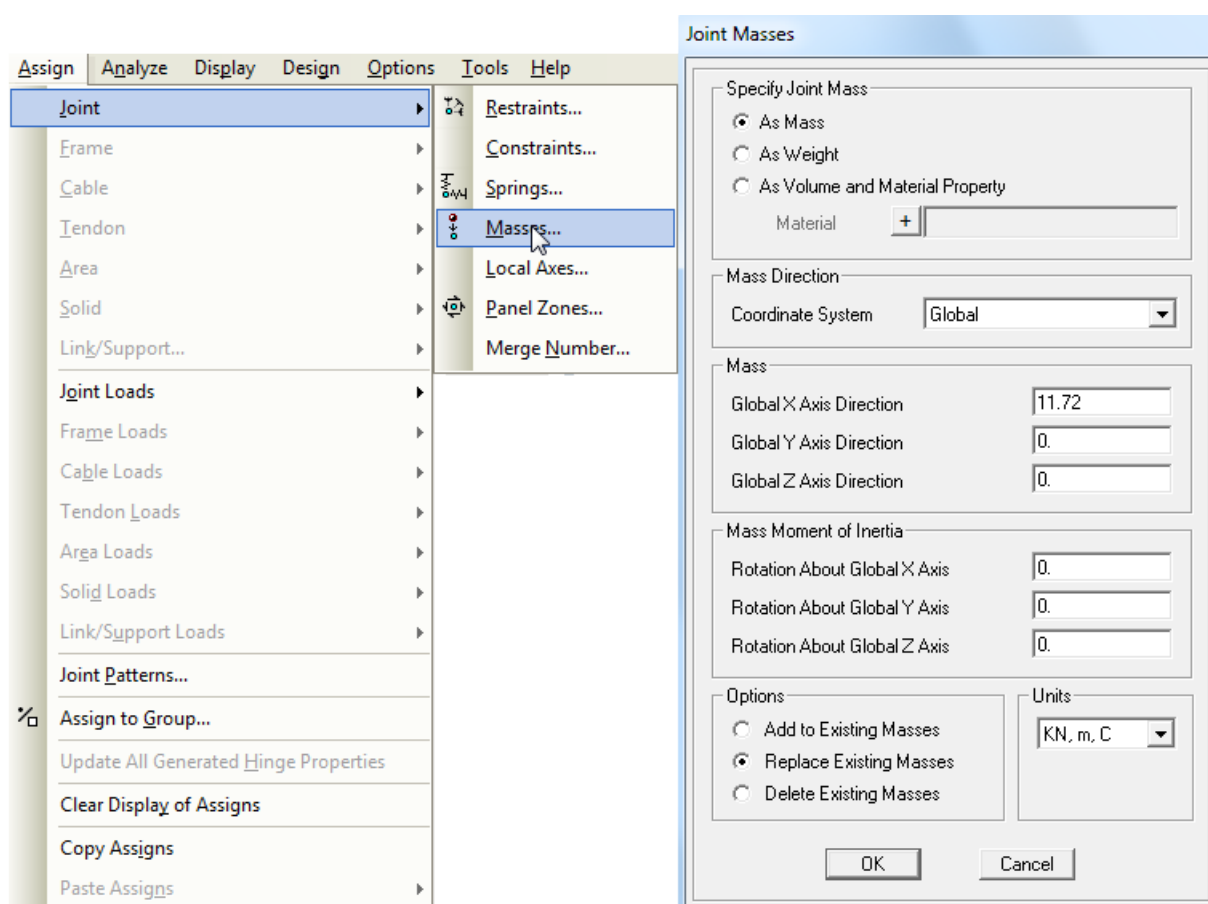
Καθώς ο φορέας της ανάλυσης βασίζεται στο πλαίσιο του Κεφαλαίου 3, αρχικά γίνεται άνοιγμα του συγκεκριμένου αρχείου και αποθήκευσή του ως [Chapter 11.SDB](#).

Όπως έγινε σαφές κατά την ιδιομορφική και τη δυναμική φασματική ανάλυση μιας κατασκευής, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 9, για την εκπόνηση οποιασδήποτε δυναμικής ανάλυσης θα πρέπει να προσδιοριστεί και να ανατεθεί η μάζα στον φορέα. Όπως προέκυψε από τις Εξισώσεις 9.5 και 9.6, ο υπολογισμός των μαζών στην περίπτωση τελευταίου ορόφου κατασκευής (εδώ πρόκειται για μονώροφο φορέα) γίνεται από συνδυασμό των κατακόρυφων φορτίων [G+0.3Q](#).

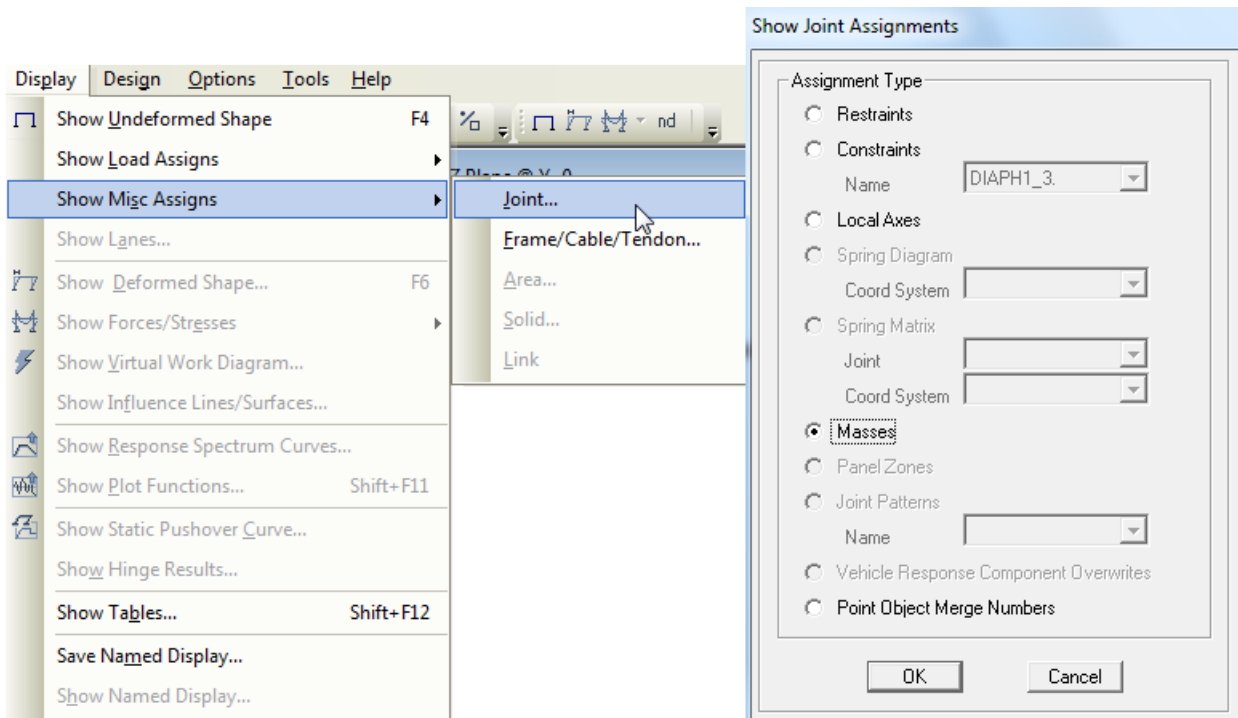
Στον φορέα του παραδείγματος που εξετάζεται, υπολογίζεται το συνολικό φορτίο από το συνδυασμό $G+0.3Q=20+0.3\cdot 10=23\text{kN/m}$. Το συνολικό φορτίο στη δοκό μήκους 5m είναι ίσο με $23\cdot 5=115\text{kN}$ και αντιστοιχεί σε $115/9.81=11.72\text{t}$ μάζας. Η μάζα θεωρείται συγκεντρωμένη στο μέσον της δοκού, καθώς στο επίπεδο του ορόφου υπάρχει πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με εξασφαλισμένη διαφραγματική λειτουργία (EC8 §4.3.1(4)).

Για να ανατεθεί η μάζα στο μέσον της δοκού, θα πρέπει στη συγκεκριμένη θέση να δημιουργηθεί κόμβος. Αυτό γίνεται με επιλογή της δοκού και διαίρεση της σε δυο ίσα τμήματα, με την εντολή *Edit* → *Edit Lines* → *Divide Frames* (*Number of Frames=2*, *Last/First Length Ratio=1*). Υπενθυμίζεται πως για να είναι ορατοί οι κόμβοι στην επιφάνεια εργασίας, θα πρέπει από την εντολή *View* → *Set Display Options* να απενεργοποιηθεί η επιλογή *Joints: Invisible*.

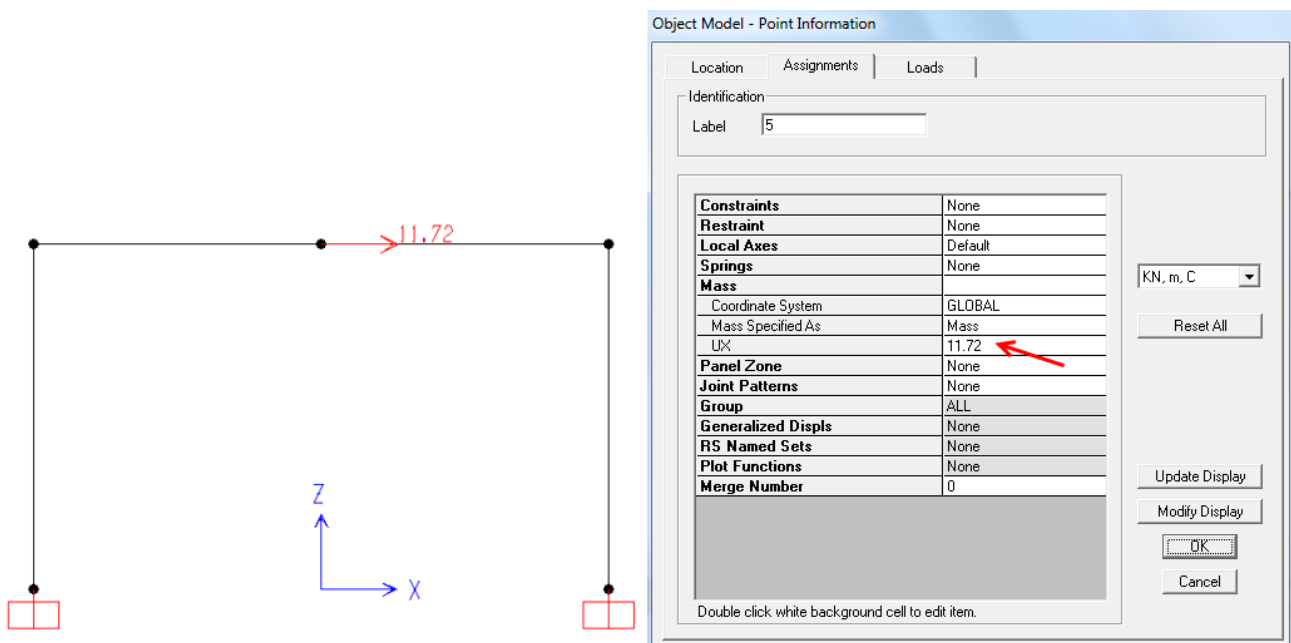
Στη συνέχεια, επιλέγοντας τον κόμβο που δημιουργήθηκε στο μέσον της δοκού, ορίζεται στη διεύθυνση *X* η μάζα 11.72t μέσω της εντολής *Assign* → *Joint* → *Masses* (Σχήμα 11.1). Η μάζα που έχει ανατεθεί στον φορέα μπορεί να εμφανιστεί στην επιφάνεια σχεδίασης ανά πάσα στιγμή, με χρήση της εντολής *Display* → *Show Misc Assigns* → *Joint... (Masses)* (Σχήμα 11.2). Επίσης, ο ορισμός της μάζας σε κάποιο κόμβο μπορεί να εμφανιστεί με δεξί *click* στην καρτέλα *Assignments* του κόμβου (Σχήμα 11.3).



Σχήμα 11.1 Ανάθεση μάζας στον κόμβο στο κέντρο της δοκού.



Σχήμα 11.2 Εντολή εμφάνισης της μάζας στην επιφάνεια σχεδίασης.



Σχήμα 11.3 Εμφάνιση μάζας στην επιφάνεια σχεδίασης (αριστερά) ή στις ιδιότητες του κόμβου (δεξιά).

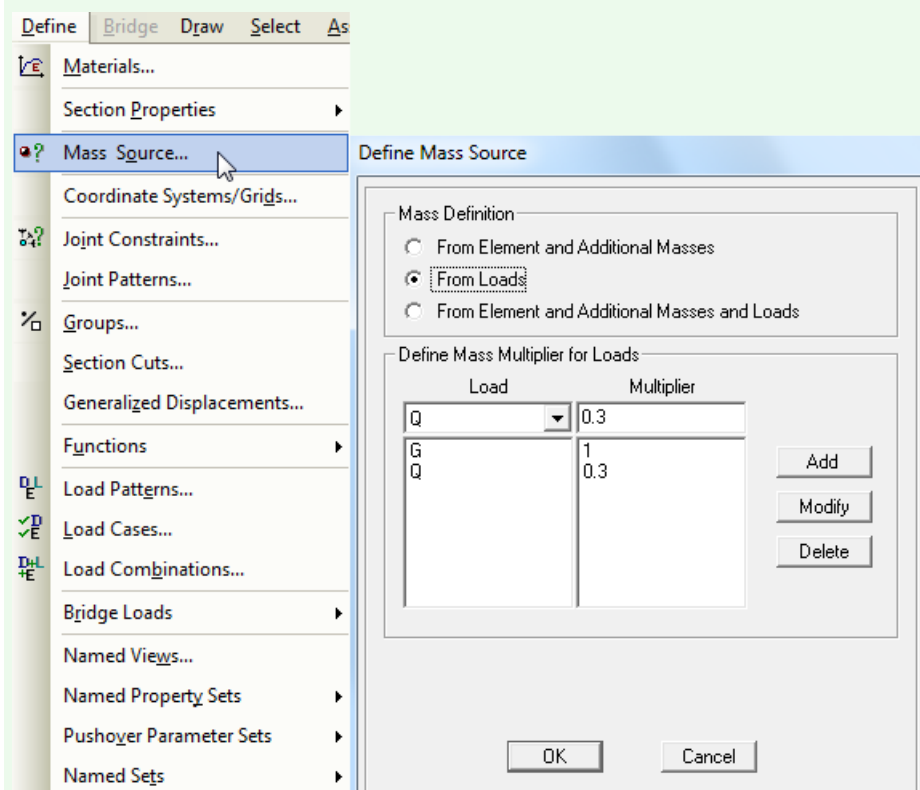
Εναλλακτικές δυνατότητες καθορισμού μάζας σε φορέα

Κατά την προσομοίωση ενός φορέα σε πρόγραμμα στατικής ανάλυσης, υπάρχουν συνήθως αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσδιορισμού της μάζας από τα επιβαλλόμενα κατακόρυφα φορτία και τα ίδια βάρη των δομικών στοιχείων του φορέα. Ενδεικτικά, στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, θα ήταν δυνατός ο καθορισμός της μάζας από την εντολή *Define* → *Mass Source*, όπου εμφανίζονται οι επιλογές:

- *From Element and Additional Masses*: Η μάζα καθορίζεται από τις μάζες των στοιχείων (πυκνότητα) και πρόσθετα επιβαλλόμενες μάζες.

- **From Loads:** Η μάζα καθορίζεται από τα επιβαλλόμενα φορτία (ορίζεται ο συνδυασμός φορτίων που καθορίζει τη μάζα).
- **From Element and Additional Masses and Loads:** Η μάζα καθορίζεται από το άθροισμα των δυο παραπάνω.

Αν, ενδεικτικά, γινόταν η επιλογή που φαίνεται στο Σχήμα 11.4 (δεξιά), τότε η μάζα που θα οριζόταν στον φορέα θα αντιστοιχούσε σε φορτία **G+0.3Q** (δηλαδή οι 11.72t που υπολογίστηκαν προηγουμένως). Η διαφορά με την επιλογή της σημειακής ανάθεσης μάζας που ακολουθήθηκε στο παρόν, είναι πως η μάζα θα οριζόταν όχι σημειακά αλλά κατανεμημένη σε όλο το μήκος της δοκού.



Σχήμα 11.4 Εναλλακτική διαδικασία ορισμού μάζας σε φορέα (Προσοχή: δεν εφαρμόζεται στο τρέχον παράδειγμα).

11.3. Ορισμός δυναμικής ανάλυσης με χρονοϊστορία επιταχύνσεων

Η δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορία επιταχύνσεων αφορά την καταγραφή της απόκρισης ενός φορέα όταν σε αυτόν επιβληθεί ως δύναμη το επιταχυνσιογράφημα ενός σεισμού, η πραγματική δηλαδή σεισμική κίνηση κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Τέτοιας μορφής επιταχυνσιογραφήματα υπάρχουν τόσο από καταγραφές πραγματικών σεισμών όσο και τεχνητά, με κατάλληλα χαρακτηριστικά για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων. Η δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορίες επιταχύνσεων προβλέπεται από τους Κανονισμούς και ως μια συμπληρωματική διαδικασία σχεδιασμού, υπό κατάλληλες πάντα προϋποθέσεις (**Εθνικό Προσάρτημα του EC8 §4.3.3.1(4)**), όπως ίσχυε και στον **EAK 2000 §3.1.2(2)**). Ειδικά στην περίπτωση του **EC8**, η συμπληρωματική χρήση ανάλυσης με επιταχυνσιογραφήματα αφορά τη θεώρηση μη-γραμμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και θα αναλυθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 13.

Σημειώνεται πως, ανάλογα με τη μέθοδο δυναμικής ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, ενδέχεται να απαιτείται ο προσδιορισμός των ιδιομορφών του φορέα πριν τον ορισμό της δυναμικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα. Συνεπώς, στη διαδικασία που ακολουθεί συμπεριλαμβάνεται και ο ορισμός μιας ιδιομορφικής ανάλυσης.

Μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης

Η δυναμική ανάλυση ενός φορέα με χρονοϊστορία τιμών ενός μεγέθους (εδώ της επιτάχυνσης) στο πρόγραμμα *SAP 2000*, μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικές προσεγγίσεις (Clough & Penzien, 1993· Κατσικαδέλης, 2012· Κολιόπουλος & Μανώλης 2005):

- Με επαλληλία ιδιομορφών (*mode superposition method*): Πρόκειται για προσέγγιση που χρησιμοποιεί τη δυνατότητα απεικόνισης της χρονοϊστορίας τιμών σε αρμονικές διαφορετικής περιόδου. Με τον τρόπο αυτόν, η απόκριση του φορέα υπολογίζεται σε κάθε ιδιοπερίοδο, και με τη σύνθεση των επιμέρους αποκρίσεων μπορεί να υπολογιστεί η συνολική απόκριση του φορέα. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει τον προσδιορισμό των ιδιομορφών του φορέα με τον ορισμό μιας ιδιομορφικής ανάλυσης, ενώ στο *SAP 2000* μπορεί να επιλεγεί ως *Modal time-history analysis*.
- Με απευθείας αριθμητική ολοκλήρωση στο πεδίο του χρόνου (*direct integration method*): Πρόκειται για προσέγγιση όπου υπολογίζεται η απόκριση του φορέα σε κάθε χρονικό βήμα, με ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Η μέθοδος αυτή στο *SAP 2000* επιλέγεται ως *Direct integration time-history analysis*.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους κατά την υλοποίησης της κάθε μεθόδου ανάλυσης στο *SAP 2000* δίνονται στη βοήθεια του προγράμματος, Ενδεικτικά, βοήθεια στο πρόγραμμα παρέχεται από το *Help → Contents and Index*, από το *Help → Documentation → Manuals → Analysis Reference Manual*, ενώ σύντομες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν και στο *Basic Analysis Reference*.

Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και σχετικές βάσεις δεδομένων πραγματικών καταγραφών

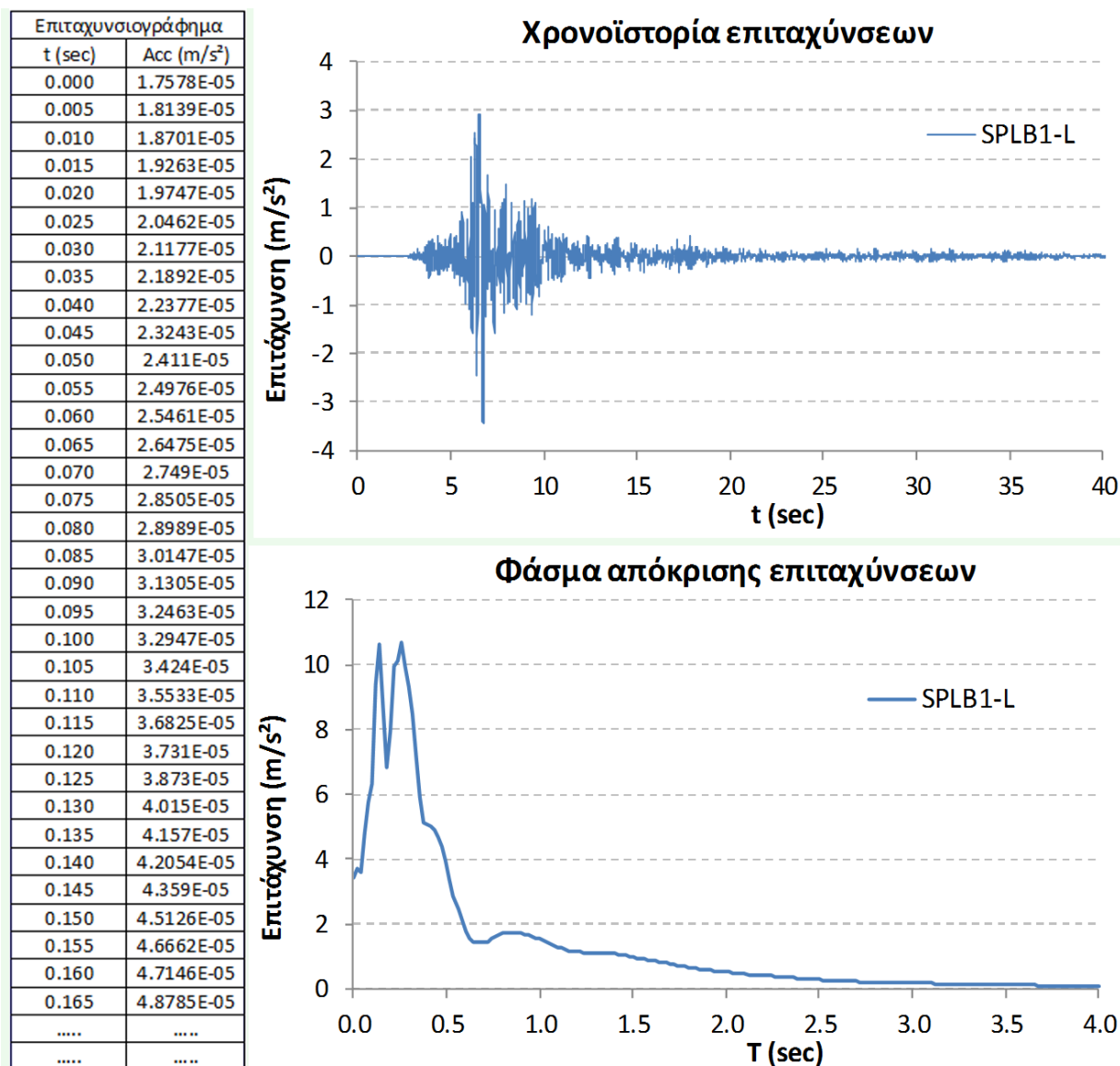
Η αναζήτηση καταγραφών σεισμικών γεγονότων μπορεί να γίνει από ένα μεγάλο αριθμό διαδικτυακών πηγών, όπου εκτός των επιταχυνσιογραφημάτων διατίθενται χρονοϊστορίες ταχυτήτων και μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ περιγράφονται και οι γενικότερες συνθήκες καταγραφής (μέγεθος σεισμού, κατηγορία εδάφους, απόσταση από το ρήγμα κτλ). Ενδεικτικά, καταγραφές σεισμών μπορούν να αναζητηθούν στις παρακάτω βάσεις δεδομένων:

- Βάση καταγραφών ισχυρών σεισμών του ΙΤΣΑΚ – Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (<http://www.itsak.gr>),
- ESD: European Strong Motion Database (<http://www.isesd.hi.is>) (Ambraseys et al., 2004),
- ITACA: Italian ACcelerometric Archive (<http://itaca.mi.ingv.it>),
- PEER Strong Motion Database (<http://peer.berkeley.edu/smcat>),
- Digital Strong-Motion Seismograph Network (<http://www.kik.bosai.go.jp>),
- SHARE: Task 4.1 (<http://www.share-eu.org>) (SHARE, 2010).

Με τον όρο χρονοϊστορία, νοείται ένα σύνολο δεδομένων που δίνουν για κάθε χρονική στιγμή μια συγκεκριμένη τιμή σε κάποιο μέγεθος. Μια συνηθισμένη μορφή που έχει το αρχείο δεδομένων μιας χρονοϊστορίας φαίνεται στο αριστερά μέρος του Σχήματος 11.5. Για την κάθε χρονική στιγμή δίνεται η τιμή που λαμβάνει το μέγεθος της 2ης στήλης, δηλαδή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή της επιτάχυνσης. Καθώς απαιτείται μικρό χρονικό βήμα Δt για να περιγραφεί με ακρίβεια η μεταβολή του μεγέθους στο χρόνο, το αρχείο δεδομένων μπορεί να έχει έναν μεγάλο αριθμό στοιχείων (ενδεχομένως μερικές χιλιάδες ζεύγη τιμών). Εναλλακτικά της παραπάνω μορφής με ζεύγη τιμών, ένα αρχείο χρονοϊστορίας μπορεί να περιλαμβάνει μόνο τις τιμές επιταχύνσεων σε πολλές στήλες (συχνά 6-8 στήλες) ανά συγκεκριμένο προκαθορισμένο χρονικό βήμα.

Η γραφική απεικόνιση της χρονοϊστορίας φαίνεται στο δεξί μέρος του Σχήματος, ενώ κάτω φαίνεται το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων, από το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί το συχνοτικό εύρος των κατασκευών που θα δεχθεί μεγαλύτερη σεισμική δύναμη από το συγκεκριμένο επιταχυνσιογράφημα.

Ο υπολογισμός του φάσματος απόκρισης, αλλά και ο προσδιορισμός διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με μια καταγραφή σεισμού (φάσμα *Fourier*, διάρκεια ισχυρής σεισμικής κίνησης, ένταση *Arias* κτλ), διευκολύνεται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού [ενδεικτικά αναφέρεται το πρόγραμμα *Seismosignal* (Seismosoft, 2013), το οποίο διατίθεται δωρεάν για ακαδημαϊκή χρήση].



Σχήμα 11.5 Τυπική μορφή αρχείου δεδομένων και διαγράμματος χρονοϊστορίας επιταχύνσεων, όπως και διαγράμματος φάσματος απόκρισης (καταγραφή του σεισμού της Αθήνας, 1999).

11.3.1. Εισαγωγή συνάρτησης χρονοϊστορίας

Ο ορισμός της δυναμικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα στο *SAP 2000*, απαιτεί αρχικά τη δημιουργία της χρονοϊστορίας και στη συνέχεια τον καθορισμό του τύπου της φόρτισης που αυτή συνεπάγεται για τον φορέα, σε μια διαδικασία δυο βημάτων.

Για τις ανάγκες του τρέχοντος παραδείγματος, θα χρησιμοποιηθεί μια χρονοϊστορία από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος και συγκεκριμένα το αρχείο *OAK_WHAF-1.TH* (θέση Oakland Outer Harbor Wharf Station) που αποτελεί καταγραφή επιταχύνσεων του σεισμού της Loma Prieta (1989) στο San Francisco (βόρεια Καλιφόρνια), με μέγεθος σεισμού $M_w=6.9$ και μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (*PGA: Peak Ground Acceleration*) ίση με 0.29g. Ο τρόπος με τον οποίο δίνονται οι συγκεκριμένες χρονοϊστορίες είναι σε 8 στήλες τιμών επιτάχυνσης, με σταθερό δεδομένο χρονικό βήμα.

Από το *Define* → *Functions* → *Time History* επιλέγεται στο *Choose Function Type to Add* το *Function from File* (προσθήκη χρονοϊστορίας από αρχείο), όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.6. Επιλέγοντας *Add New Function* και μετά *Browse*, γίνεται αναζήτηση του αρχείου της χρονοϊστορίας από τη θέση εγκατάστασης του προγράμματος στον υπολογιστή (συνήθως σε φάκελο με την ονομασία *Time History Functions*, όπου για να

εμφανιστούν τα αρχεία πρέπει να επιλεγεί το *All files* στον τύπο αρχείου). Επιλέγεται το επιθυμητό αρχείο, με *Open* γίνεται μεταφορά στο παράθυρο εισαγωγής της χρονοϊστορίας, ενώ στη συνέχεια καθορίζονται οι απαιτούμενες παράμετροι ώστε να γίνει η σωστή ανάγνωσή του.

Με την επιλογή *View File* (Σχήμα 11.7) γίνεται άνοιγμα του αρχείου της χρονοϊστορίας και εμφανίζεται η μορφή των δεδομένων (Σχήμα 11.8). Παρατηρείται πως οι δυο πρώτες σειρές του αρχείου περιέχουν πληροφορίες, οι οποίες θα χρησιμεύσουν για το σωστό ορισμό των παραμέτρων εισαγωγής του στο πρόγραμμα.

Στο συγκεκριμένο σημείο απαιτείται προσοχή, καθώς, ανάλογα με το μέγεθος γραμματοσειράς στο πρόγραμμα που γίνεται η επισκόπηση του αρχείου, ενδέχεται να μην είναι ευκρινές ότι οι πληροφορίες εμπεριέχονται σε δυο μόλις σειρές κειμένου. Για να σιγουρευτεί ο χρήστης για τον αριθμό των σειρών που αφορούν οι πληροφορίες, θα πρέπει είτε να χρησιμοποιήσει μια αρκετά μικρή γραμματοσειρά είτε να ζητήσει μορφοποίηση του κειμένου δίχως αναδίπλωση του στο μέγεθος της σελίδας (*No word wrap*).

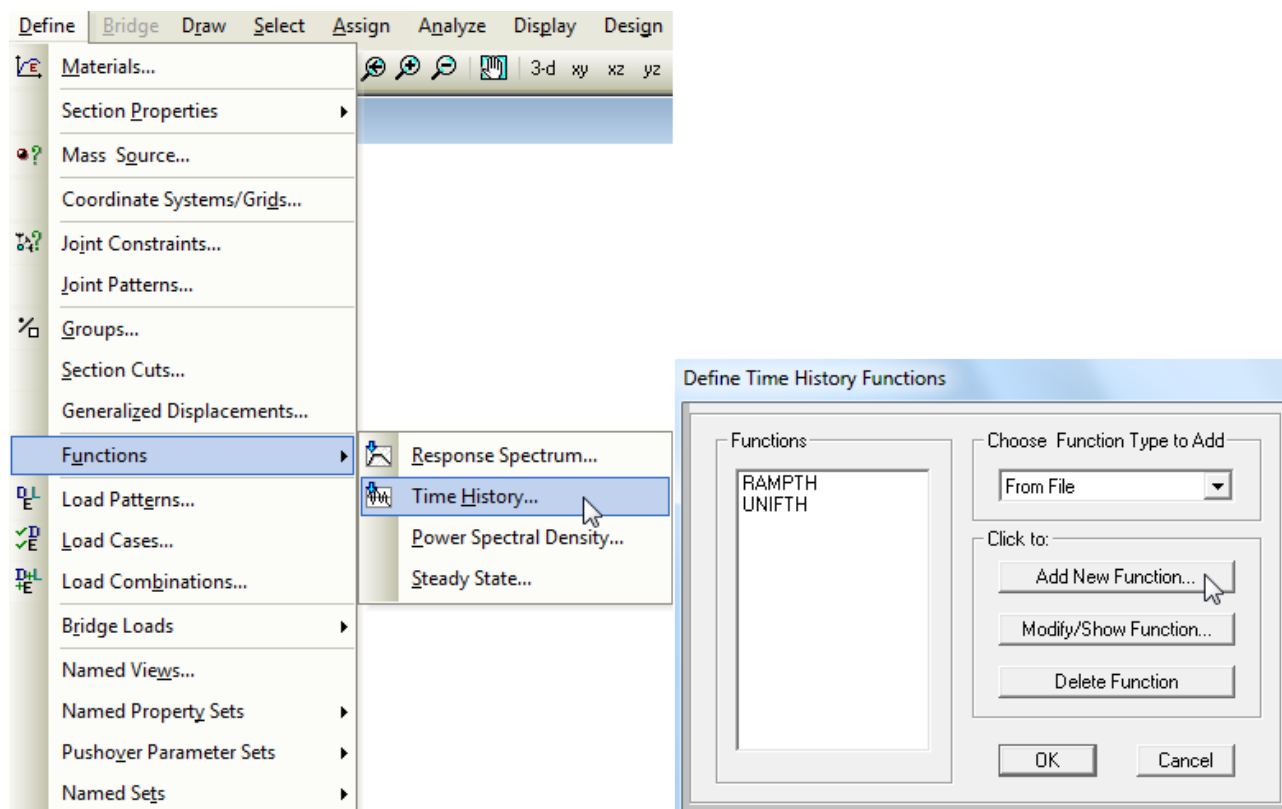
Από τις πληροφορίες που ενσωματώνονται στο αρχείο, ενδιαφέρουν το χρονικό βήμα (εδώ *0.020s*) και οι μονάδες των τιμών επιτάχυνσης (εδώ *cm/s²*). Συνεπώς ο ορισμός των διαφόρων παραμέτρων στο Σχήμα 11.7 γίνεται ως εξής:

- *Header Lines to Skip* (γραμμές αρχείου που δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη): *2* καθώς οι δυο πρώτες γραμμές του αρχείου περιέχουν πληροφορίες για τη χρονοϊστορία και όχι τιμές δεδομένων.
- *Prefix Characters per Line to Skip* (χαρακτήρες-πρόθεμα σε κάθε γραμμή): *0* καθώς δεν υπάρχει κάποιο πρόθεμα.
- *Number of Points per Line* (αριθμός σημείων ανά γραμμή): *8* καθώς κάθε γραμμή έχει 8 τιμές δεδομένων για τη χρονοϊστορία.
- *Values are: Values at Equal Intervals of=0.020s* σύμφωνα με το χρονικό βήμα που ορίζεται στις δυο πρώτες γραμμές του αρχείου (*points of accel data equally spaced at 0.020sec*). Σημειώνεται πως σε περίπτωση χρονοϊστορίας όμοιου τύπου με το Σχήμα 11.5, θα έπρεπε να επιλεγεί *Time and Function Values* (δηλαδή ζεύγη τιμών χρόνου-μεγέθους).
- *Format Type: Free Format* εφόσον η κάθε τιμή στο αρχείο δεν έχει σταθερό αριθμό χαρακτήρων.

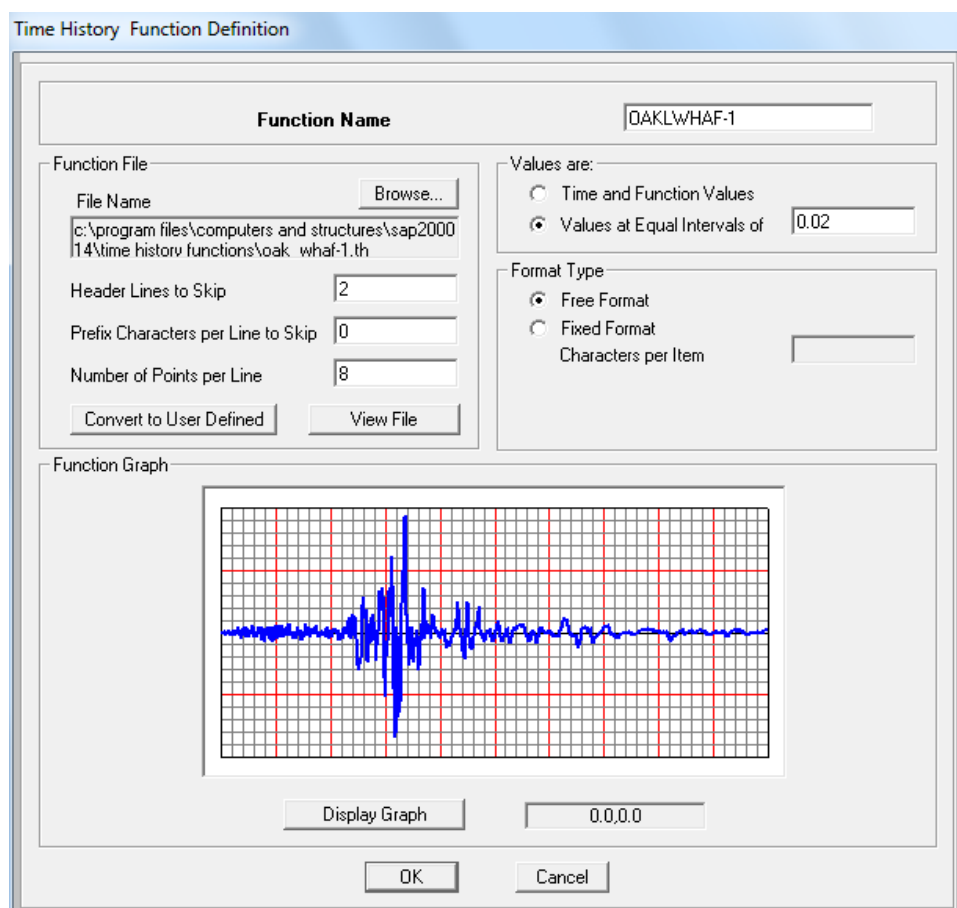
Αφού οριστούν πλήρως τα πεδία που προσδιορίζουν τη μορφή του αρχείου δεδομένων, το διάγραμμα της χρονοϊστορίας μπορεί να εμφανιστεί με την επιλογή *Display Graph*. Τέλος, στο πεδίο *Function Name* ορίζεται το επιθυμητό όνομα για τη χρονοϊστορία. Όλες οι παραπάνω εντολές, όπως και το διάγραμμα που προκύπτει, φαίνονται στο Σχήμα 11.7. Το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων της συγκεκριμένης χρονοϊστορίας, για τιμή απόσβεσης 5%, εμφανίζεται στο Σχήμα 11.9 (υπολογισμός φάσματος με άλλο λογισμικό). Ο υπολογισμός του φάσματος απόκρισης της χρονοϊστορίας που τέθηκε ως φόρτιση μπορεί να γίνει και από το πρόγραμμα *SAP 2000*, μετά το πέρας της ανάλυσης, από την εντολή *Define → Show Response Spectrum Curves* και τη θεώρηση κόμβου στη βάση του πλαισίου.

Θεώρηση χρονοϊστορίας τιμών κατά την προσομοίωση

Στο στάδιο αυτό, η χρονοϊστορία τιμών που ορίστηκε αποτελεί απλώς την καταγραφή της μεταβολής ενός μεγέθους με το χρόνο, δίχως να προσδιορίζεται η φύση του συγκεκριμένου μεγέθους που μπορεί να αφορά επιτάχυνση, μετακίνηση ή δύναμη. Σε επόμενο στάδιο της προσομοίωσης θα καθοριστεί το ακριβές μέγεθος που αποτυπώνεται στη χρονοϊστορία (δηλαδή επιτάχυνση για τη συγκεκριμένη περίπτωση), όπως και μια ακόμη σειρά παραμέτρων για τον πλήρη ορισμό της δυναμικής ανάλυσης.



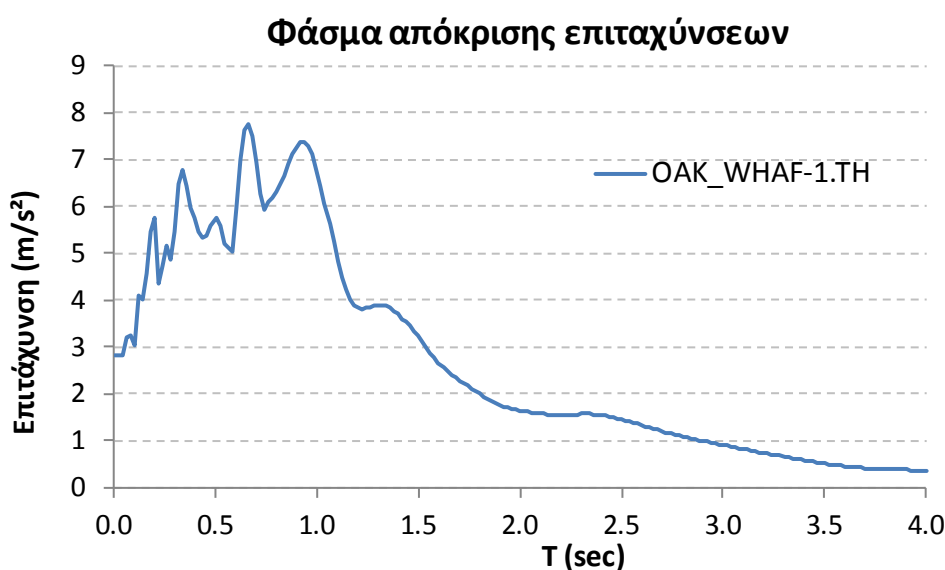
Σχήμα 11.6 Ορισμός χρονοϊστορίας από αρχείο στο SAP 2000 (Time History Function From File).



Σχήμα 11.7 Καθορισμός παραμέτρων για την εισαγωγή του επιταχυνσιογραφήματος από αρχείο δεδομένων.

58472-C0221-89293.05 OAKLAND - OUTER HARBOR WHARF AT 35 DEG							
2000 POINTS OF ACCEL DATA EQUALLY SPACED AT .020 SEC. (UNITS: CM/SEC/SEC)							
-1.489	-1.273	-.036	-.901	-1.000	1.265	.781	.799
2.684	1.841	-1.340	-1.291	-1.618	-4.018	-3.094	-1.154
-1.204	.988	1.897	1.507	-.631	-3.106	-1.554	-1.097
-1.545	.621	1.064	.668	3.148	3.815	-.390	-4.519
-1.535	1.186	-.887	-3.912	-4.848	-3.269	.897	-1.515
-6.490	-5.408	-4.416	-5.118	.387	4.888	-.229	-.644
2.212	-1.112	-3.880	2.435	4.966	2.733	5.458	2.744
-2.298	4.164	11.777	9.528	2.431	.458	.352	1.547
4.462	-1.679	-5.800	-2.225	-.923	-1.400	.940	2.591
-4.719	-13.799	-12.871	-9.000	-1.938	5.546	10.886	7.326
-2.771	-5.840	-3.346	4.139	12.275	12.316	7.113	4.365
2.258	-3.850	-8.060	4.248	11.418	5.331	-1.020	-5.512
-6.725	-6.800	-8.001	-10.850	-9.775	-2.183	1.751	-1.730
-1.092	5.177	4.129	-2.445	1.447	6.256	5.085	12.267
11.429	1.732	4.546	15.297	8.706	-6.140	-6.330	-7.073
-10.861	-3.471	1.998	-6.758	-6.600	2.327	-2.965	-7.764
-5.258	-3.786	-2.356	-1.751	-.633	2.587	7.930	5.250
11.012	11.880	5.832	4.658	9.497	7.932	-1.032	-2.613
.040	4.622	12.390	7.078	-12.276	-16.420	-12.566	-9.746
-1.302	10.073	3.935	-11.378	-19.304	-19.658	-17.727	-7.673
0.010	0.675	6.276	5.001	6.106	1.660	11.0	0.675

Σχήμα 11.8 Εμφάνιση αρχείου δεδομένων της χρονιοστορίας (εδώ εμφανίζεται τμήμα του αρχείου, με τιμές επιτάχυνσης σε 8 στήλες ανά συγκεκριμένο χρονικό βήμα).



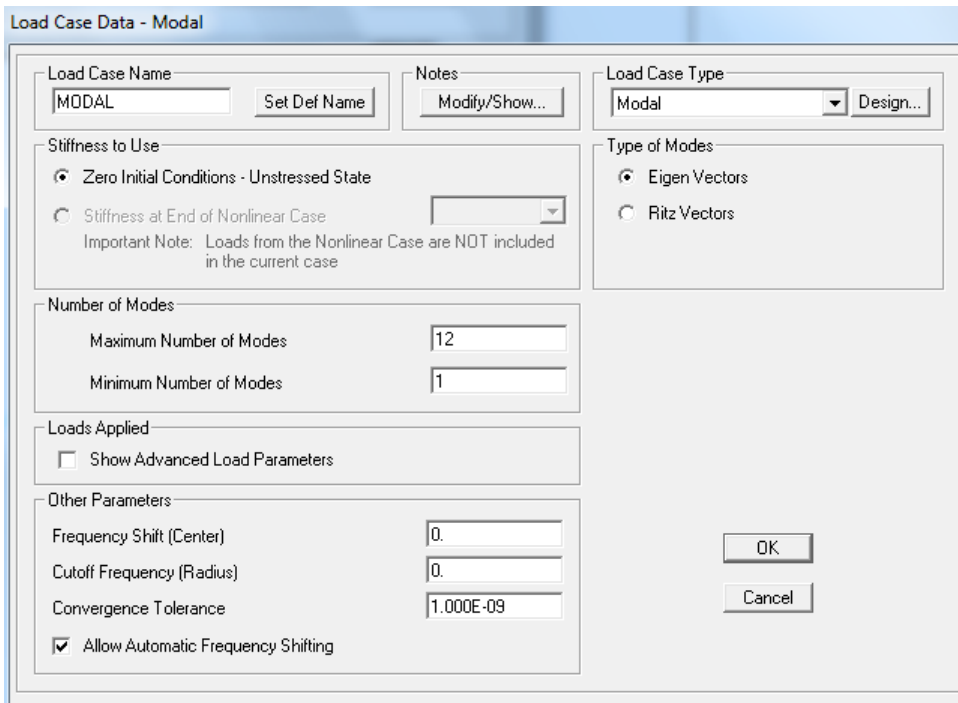
Σχήμα 11.9 Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων επιλεγμένης χρονιοστορίας (ο υπολογισμός του φάσματος έγινε με άλλο λογισμικό).

11.3.2. Ορισμός ιδιομορφικής ανάλυσης

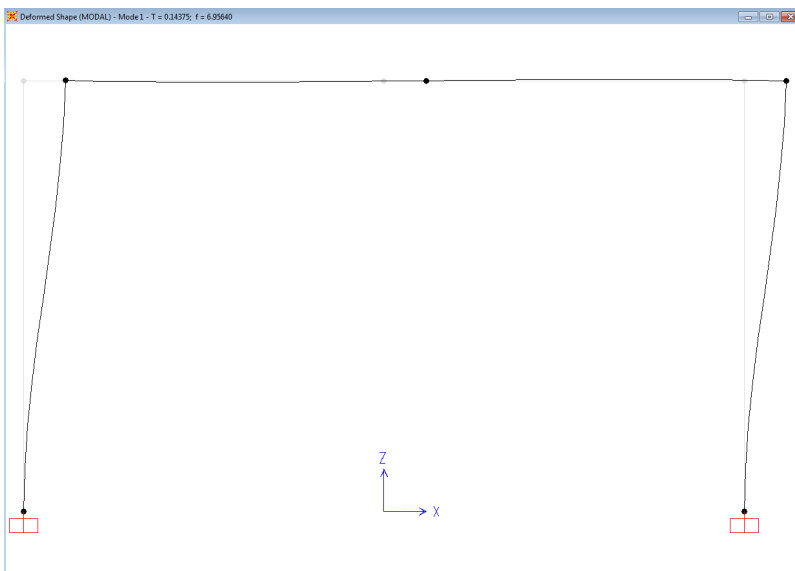
Ο ορισμός της ιδιομορφικής ανάλυσης, η οποία προηγείται της δυναμικής ανάλυσης με χρονιοστορία, μπορεί να γίνει από το *Define* → *Load Cases* με προσθήκη νέας φορτιστικής κατάστασης με την εντολή *Add New Load Case*. Η νέα φορτιστική κατάσταση θα είναι τύπου *Modal (Load Case Type)*, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.10. Υπάρχει η προεπιλεγμένη τιμή 12 για τον αριθμό των ζητούμενων ιδιομορφών, οι οποίες υπέρ-αρκούν για το συγκεκριμένο φορέα, καθώς υπάρχει μόνο ένας δυναμικός βαθμός ελευθερίας (μάζα μόνο σε έναν κόμβο και σε μια διεύθυνση).

Σημειώνεται πως σε κάθε εισαγωγή έτοιμου φορέα από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, υπάρχει ήδη μια προεπιλεγμένη ιδιομορφική ανάλυση με την ονομασία *MODAL*, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τους παραπάνω σκοπούς αν δεν έχει διαγραφεί σε προηγούμενο στάδιο (εδώ αφορά την ενδεχόμενη διαγραφή της ιδιομορφικής ανάλυσης κατά την εφαρμογή του παραδείγματος του Κεφαλαίου 3). Στην περίπτωση ασφαλώς που μια τέτοια ανάλυση περιελάμβανε λιγότερες ιδιομορφές από τους δυναμικούς βαθμούς ελευθερίας του φορέα, τότε θα μπορούσε να τροποποιηθεί με *Modify/Show*.

Η ιδιομορφική ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί πριν την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του φορέα, αρκεί να έχουν οριστεί πλήρως οι μάζες και η δυσκαμψία (διατομές, υλικά) του φορέα. Συνεπώς, ακόμη και σε αυτό το στάδιο, είναι δυνατή μια πρώτη ανάλυση η οποία θα δώσει κάποιες λεπτομέρειες για τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του φορέα που ενδεχομένως χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Από την ανάλυση προκύπτει ιδιοπερίοδος $T=0.14375s$ για τον φορέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.11 (εμφάνιση από το *Display* → *Show Deformed Shape* όπου επιλέγεται το *Modal*). Στη συνέχεια το αρχείο ξεκλειδώνεται (*Options* → *Unlock Model*) προκειμένου να συνεχιστεί ο καθορισμός των υπόλοιπων στοιχείων της προσομοίωσης. Από την επισκόπηση του φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων που ορίστηκε στο Σχήμα 11.9, η συγκεκριμένη τιμή ιδιοπεριόδου αντιστοιχεί σε φασματική επιτάχυνση $4.13m/s^2$ (0.42g) για το πλαίσιο που προσομοιώνεται.



Σχήμα 11.10 Ορισμός ιδιομορφικής ανάλυσης φορέα (αρκεί μια μόνο ζητούμενη ιδιομορφή για το συγκεκριμένο πλαίσιο –εδώ ζητούνται 12).



Σχήμα 11.11 Εμφάνιση θεμελιώδους ιδιομορφής του πλαισίου που αναλύεται ($T=0.14375s$).

11.3.3. Ορισμός δυναμικής ελαστικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα (μέθοδος επαλληλίας ιδιομορφών)

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα για δυναμική ελαστική ανάλυση με χρήση επιταχυνσιογραφήματος, είναι η μέθοδος επαλληλίας των ιδιομορφών. Η νέα φορτιστική κατάσταση ορίζεται από την εντολή *Define* → *Load Cases* με το *Add New Load Case* και τύπο ανάλυσης *Time History (Load Case Type)*. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.12, η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι τύπου *Accel* (επιτάχυνση) κατά *X (U1)*, ενώ χρησιμοποιείται η χρονοϊστορία *OAKLWHAF-1* που ορίστηκε σε προηγούμενο βήμα. Καθώς η συγκεκριμένη χρονοϊστορία ορίστηκε σε μονάδες cm/s^2 , τίθεται συντελεστής *0.01 (Scale factor)* ώστε να γίνει η μετατροπή σε m/s^2 (οι μονάδες της χρονοϊστορίας φαίνονται στις πρώτες σειρές του αρχείου του επιταχυνσιογραφήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.8).

Όπως φαίνεται από τις επιπλέον παραμέτρους καθορισμού της ανάλυσης (*Show Advanced Load Parameters*), υπάρχει δυνατότητα να ξεκινήσει η εφαρμογή της χρονοϊστορίας στον φορέα σε χρονική στιγμή μεταγενέστερη του $t=0$, ενώ η επιβολή της μπορεί να δοθεί υπό γωνία σε σχέση με τους υφιστάμενους άξονες.

Ο τύπος της ανάλυσης που ορίζεται αντιστοιχεί σε γραμμική ελαστική ανάλυση (*Linear*), ενώ στο παρόν επιλέγεται η μέθοδος ανάλυσης με επαλληλία ιδιομορφών (*Modal*), στην οποία δίνεται σταθερή απόσβεση ίση με *5%* από το *Modal Damping-Constant at 0.05* (συνήθης τιμή απόσβεσης για φορείς οπλισμένου σκυροδέματος). Στην ανάλυση δίνεται η ονομασία *OAKLANDM* (το *M* συμβολίζει το *Modal*, ακριβώς λόγω της μεθόδου επαλληλίας ιδιομορφών που υιοθετείται).

Load Case Data - Linear Modal History

Load Case Name: OAKLANDM [Set Def Name] [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Modal History []

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case [MODAL]

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

 Time History Type:

- Modal
- Direct Integration

 Time History Motion Type:

- Transient
- Periodic

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	OAKLWH	0.01	1.	0.	GLOBAL	0.
Accel	U1	OAKLWHAF	0.01	1.	0.	GLOBAL	0.

Show Advanced Load Parameters [Add] [Modify] [Delete]

Time Step Data:

- Number of Output Time Steps: 4000
- Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters:

- Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

 [OK] [Cancel]

Σχήμα 11.12 Καθορισμός παραμέτρων δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας τιμών με τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών.

Η διάρκεια της συγκεκριμένης χρονοϊστορίας είναι **40s**, όπως προκύπτει από τα **2000** σημεία ανά **0.02sec** (Σχήμα 11.8). Στα πεδία **Number of Output Time Steps** και **Output Time Step Size** καθορίζεται η πυκνότητα των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν μέσω της επιλογής του χρονικού βήματος. Το χρονικό αυτό βήμα πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ώστε να περιγράφεται με ακρίβεια το φαινόμενο, όχι όμως περισσότερο από όσο χρειάζεται καθώς ενδέχεται να δημιουργήσει αρχεία αποτελεσμάτων μεγάλου μεγέθους. Συχνά ορίζεται χρονικό βήμα αντίστοιχο με αυτό της χρονοϊστορίας, ενώ τιμή βήματος μεταξύ 0.005-0.01s είναι συνήθως επαρκής, ιδιαίτερα για τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών όπου η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν σχετίζεται άμεσα με το χρονικό βήμα της ανάλυσης. Εδώ τίθενται ενδεικτικά **4000** βήματα με χρονικό βήμα ίσο με **0.01s**. Θα μπορούσαν αντίστοιχα να δοθούν 2000 βήματα ανά 0.02s, ώστε ο συνολικός χρόνος που προκύπτει να ισούται με την διάρκεια της χρονοϊστορίας. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει το χρονικό βήμα που επιλέγεται να είναι πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο του χρονικού βήματος της χρονοϊστορίας, όπως προτείνεται στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

11.3.4. Ορισμός δυναμικής ελαστικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα (μέθοδος απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο)

Εναλλακτικά της προηγούμενης μεθόδου, η δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορία επιταχύνσεων μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση της μεθόδου απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο (*direct integration method*). Η εξέταση της συγκεκριμένης εναλλακτικής μεθόδου στο παρόν, έχει ως στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων. Στην ανάλυση αυτή δίνεται η ονομασία **OAKLANDDI** (το **DI** συμβολίζει το **Direct Integration**, ακριβώς λόγω της μεθόδου που επιλέγεται για τη δεύτερη ανάλυση). Στο Σχήμα 11.13 παρουσιάζονται οι τιμές που τίθενται στα διάφορα πεδία, στο παράθυρο ορισμού της ανάλυσης.

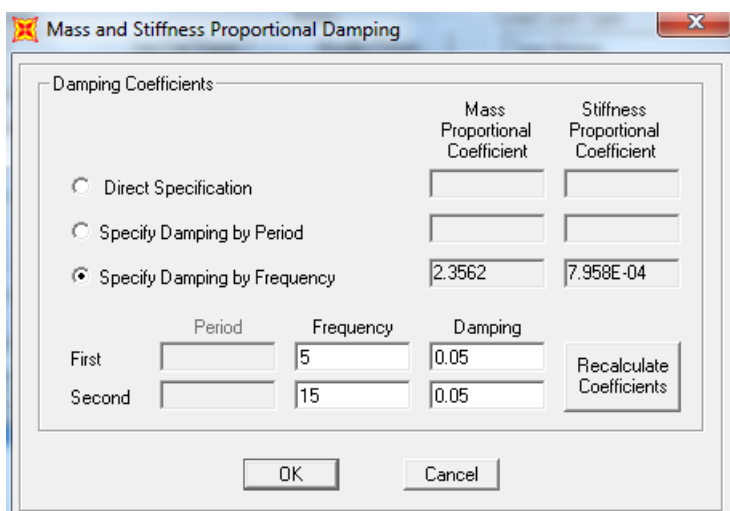
Load Case Data - Linear Direct Integration History

Load Case Name OAKLANDDI	Notes Modify/Show...	Load Case Type Time History	Design...				
Stiffness to Use <input checked="" type="radio"/> Zero Initial Conditions - Unstressed State	<input type="radio"/> Stiffness at End of Nonlinear Case	Analysis Type <input checked="" type="radio"/> Linear	Time History Type <input type="radio"/> Modal				
Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case		<input type="radio"/> Nonlinear	<input checked="" type="radio"/> Direct Integration				
Modal Load Case Use Modes from Case		Time History Motion Type <input checked="" type="radio"/> Transient					
		<input type="radio"/> Periodic					
Loads Applied							
Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	OAKLWH	0.01	1.	0.	GLOBAL	0.
Accel	U1	OAKLWHAF	0.01	1.	0.	GLOBAL	0.
<input checked="" type="checkbox"/> Show Advanced Load Parameters				Add Modify Delete			
Time Step Data							
Number of Output Time Steps				8000			
Output Time Step Size				0.005			
Other Parameters							
Damping	Proportional Damping		Modify/Show...		OK		
Time Integration	Hilber-Hughes-Taylor		Modify/Show...		Cancel		

Σχήμα 11.13 Καθορισμός παραμέτρων δυναμικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα, με τη μέθοδο της απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η ορθότητα προσδιορισμού της απόκρισης κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο εξαρτάται άμεσα από το χρονικό βήμα εκτέλεσης της ανάλυσης. Κατά συνέπεια, τίθεται ένα επαρκώς μικρό βήμα $\Delta t=0.005s$, το οποίο αντιστοιχεί σε 8000 βήματα ανάλυσης για τη χρονοϊστορία συνολικής διάρκειας 40s.

Κατά τον ορισμό της συγκεκριμένης ανάλυσης, παρατηρείται πως δεν υπάρχει απαίτηση να βασιστεί πάνω σε κάποια προϋπάρχουσα ιδιομορφική ανάλυση, σε αντίθεση με την μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών που εξετάστηκε προηγουμένως. Επίσης, διαπιστώνεται πως στις παραμέτρους της ανάλυσης αλλάζει ο τρόπος ορισμού της απόσβεσης (*Damping*). Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται απόσβεση τύπου *Rayleigh*, η οποία ορίζεται με τη χρήση των δυο συντελεστών του Σχήματος 11.14, με τρόπο ώστε να ισοδυναμεί με την απόσβεση 5% που τέθηκε κατά την ανάλυση με επαλληλία ιδιομορφών.



Σχήμα 11.14 Καθορισμός παραμέτρων απόσβεσης τύπου *Rayleigh*.

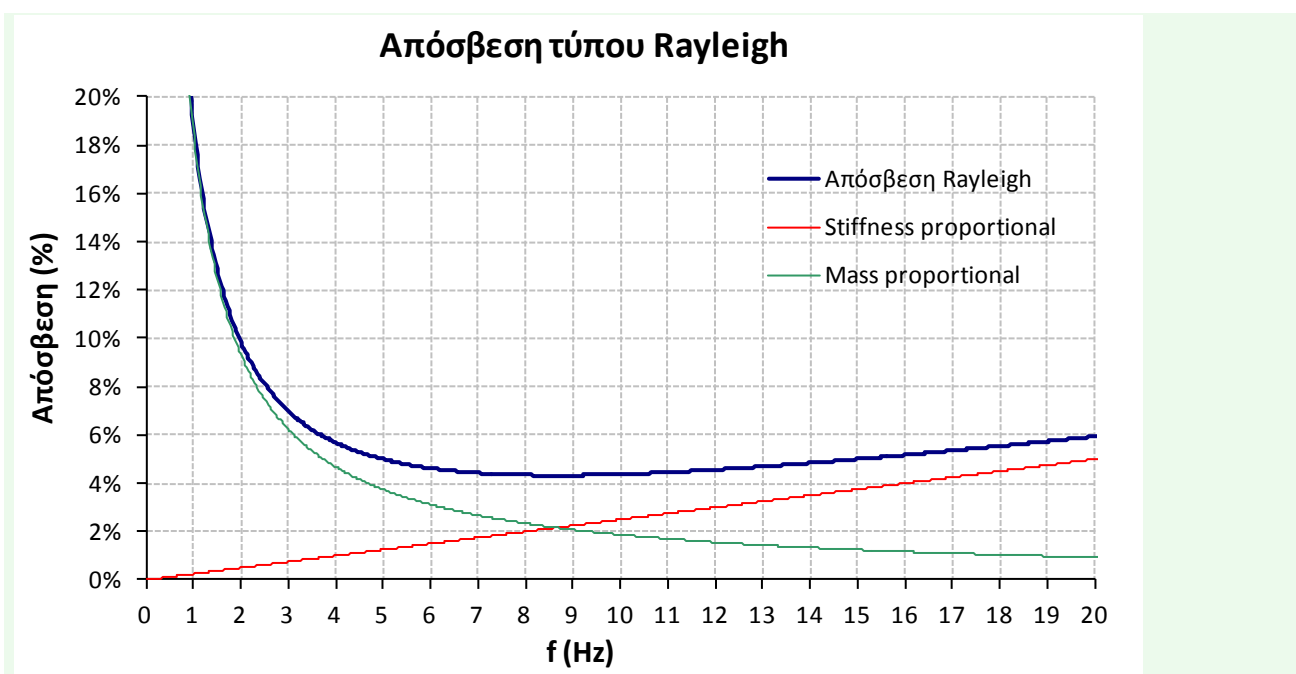
Απόσβεση τύπου *Rayleigh*

Στις αριθμητικές αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου, είναι πολύ συχνή η χρήση της απόσβεσης τύπου *Rayleigh* (*Rayleigh & Lindsay 1945*), όπου το μητρώο απόσβεσης $[C]$ δίνεται ως γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας $[M]$ (*mass proportional*) και δυσκαμψίας $[K]$ (*stiffness proportional*) (*Chopra, 1995· Cook, Malkus, & Plesha, 1989*):

$$[C] = a_0 \cdot [M] + a_1 \cdot [K] \quad (11.1)$$

Προκύπτει πως η απόσβεση είναι συχνотικά εξαρτώμενη, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δοθεί σταθερή για όλο το φάσμα των συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Βολεύει συνεπώς η δυνατότητα που έχει το πρόγραμμα να υπολογίσει τους παραπάνω συντελεστές απόσβεσης με βάση τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη συχνότητα ενδιαφέροντος. Συχνά ως μικρότερη συχνότητα ενδιαφέροντος τίθεται μια τιμή κοντά στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του φορέα που εξετάζεται, ενώ η μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα για προβλήματα σεισμικής απόκρισης κατασκευών μπορεί να οριστεί μεταξύ 10-15Hz (*Clough & Penzien, 1993*). Καθώς η μοναδική ιδιοπερίοδος του πλαισίου υπολογίστηκε ίση με $T=0.14375s$ ($f=6.96Hz$), ορίζεται στο Σχήμα 11.14 τιμή απόσβεσης 5% στο εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος, δηλαδή μεταξύ των τιμών $f_{min}=5Hz$ (λίγο κάτω από τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου) και $f_{max}=15Hz$ (μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος),.

Με τον παραπάνω τρόπο ορισμού της απόσβεσης δεν είναι δεδομένο πως στις ενδιάμεσες συχνότητες εμφανίζεται μια ομαλή μορφή της καμπύλης απόσβεσης. Συχνά λοιπόν απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον ορισμό των δυο συντελεστών, κάτι που μπορεί να ελεγχθεί με χρήση της γραφικής απεικόνισης της απόσβεσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.15. Παρατηρείται πως στην τιμή της ιδιοσυχνότητας του φορέα (περίπου 7Hz), η τιμή της απόσβεσης που θα ληφθεί υπόψη είναι περίπου 4.4%.



Σχήμα 11.15 Απεικόνιση της συχνοτικής εξάρτησης της απόσβεσης τύπου Rayleigh.

Επιλογή χρονικού βήματος κατά τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο

Για την ακριβή απόδοση της συμπεριφοράς του φορέα κατά τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο, απαιτείται ο ορισμός ενός επαρκώς μικρού χρονικού βήματος ανάλυσης. Το χρονικό βήμα εξαρτάται και από την επιλογή της μεθόδου αριθμητικής ολοκλήρωσης, η οποία μπορεί να ανήκει στις γενικές κατηγορίες των πεπλεγμένων (*implicit*) ή ρητών (*explicit*) μεθόδων (Κολιόπουλος & Μανώλης, 2005). Γενικότερα, στις γραμμικές ελαστικές αναλύσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χρονικό βήμα της ανάλυσης η τιμή $\Delta t = T_{min}/10$. Στην περίπτωση όμως μη γραμμικών ανελαστικών αναλύσεων, κάποιο βήμα της τάξης του $\Delta t = T_{min}/20$ θεωρείται περισσότερο κατάλληλο, αν και απαιτείται πάντα προσεκτική επιλογή βάσει του προβλήματος που εξετάζεται (Cook et al., 1989). Στην παρούσα άσκηση, όπου γίνεται γραμμική ελαστική ανάλυση με $f_{max}=15\text{Hz}$ ($T_{min}=0.0667\text{s}$), προκύπτει $\Delta t = T_{min}/10 = 0.00667\text{s}$, οπότε επιλέγεται χρονικό βήμα 0.005s . Σημειώνεται πως η θεώρηση $f_{max}=15\text{Hz}$ στο παρόν γίνεται για λόγους γενίκευσης, καθώς η ανάλυση του μονώροφου πλαισίου περιλαμβάνει μια μόνο ιδιομορφή με τιμή ιδιοσυχνότητας περίπου 7Hz .

Σε κάθε περίπτωση, στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος συνιστάται η χρήση επαναληπτικών αναλύσεων με μειωμένο χρονικό βήμα, έως το σημείο όπου τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται πλέον από την επιλογή του βήματος ανάλυσης.

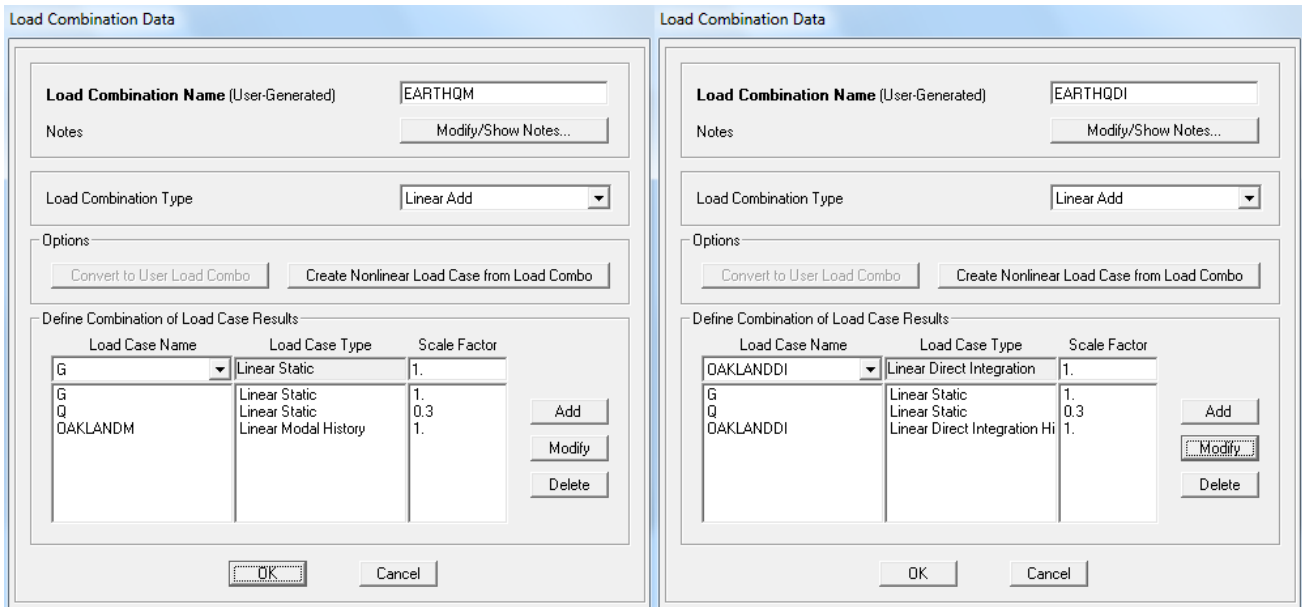
Οι παράμετροι που συνδέονται με την ολοκλήρωση στο χρόνο (*Time Integration*) καθορίζουν τη μορφή των αλγορίθμων ολοκλήρωσης (ρητών ή πεπλεγμένων). Η παρουσίαση περαιτέρω πληροφοριών αναφορικά με τα θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου είναι εκτός του στόχου του συγγράμματος, ενώ περισσότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία που παρατέθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

11.4. Ορισμός συνδυασμών φόρτισης δυναμικών αναλύσεων με χρονοϊστορία

Καθώς οι αναλύσεις του παραδείγματος είναι γραμμικές-ελαστικές, τα αποτελέσματα από τη συνδυασμένη δράση του σεισμού με τα κατακόρυφα φορτία είναι δυνατό να προκύψουν με συνδυασμό των αποτελεσμάτων των επιμέρους αναλύσεων, χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη δυνατότητα του προγράμματος από το *Define* → *Load Combinations*. Στο παράθυρο που ανοίγει, εμφανίζονται οι υφιστάμενοι συνδυασμοί από το παράδειγμα του Κεφαλαίου 3 (υπενθυμίζεται πως οι συνδυασμοί

SEISMIC+ και **SEISMIC-** αφορούν την ταυτόχρονη δράση κατακόρυφων φορτίων με την, στατικού τύπου, οριζόντια φόρτιση **E** του συγκεκριμένου παραδείγματος).

Δημιουργούνται δυο νέοι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν την ανάλυση με το επιταχυνσιογράφημα και τα κατακόρυφα φορτία που δρουν στον φορέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.16 (ένας συνδυασμός για τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών και ένας για τη μέθοδο της απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο).



Σχήμα 11.16 Συνδυασμοί φόρτισης κατακόρυφων δράσεων με δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας.

11.5. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων

Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση, κάτι που γίνεται με την εντολή **Analyze → Run Analysis** και **Run Now**. Καθώς η διαδικασία περιλαμβάνει ανάλυση με χρονοϊστορίες σημαντικού αριθμού βημάτων, ο χρόνος ολοκλήρωσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερος από τις απλές αναλύσεις στατικού τύπου.

11.5.1. Εμφάνιση αποτελεσμάτων χρονοϊστοριών φόρτισης

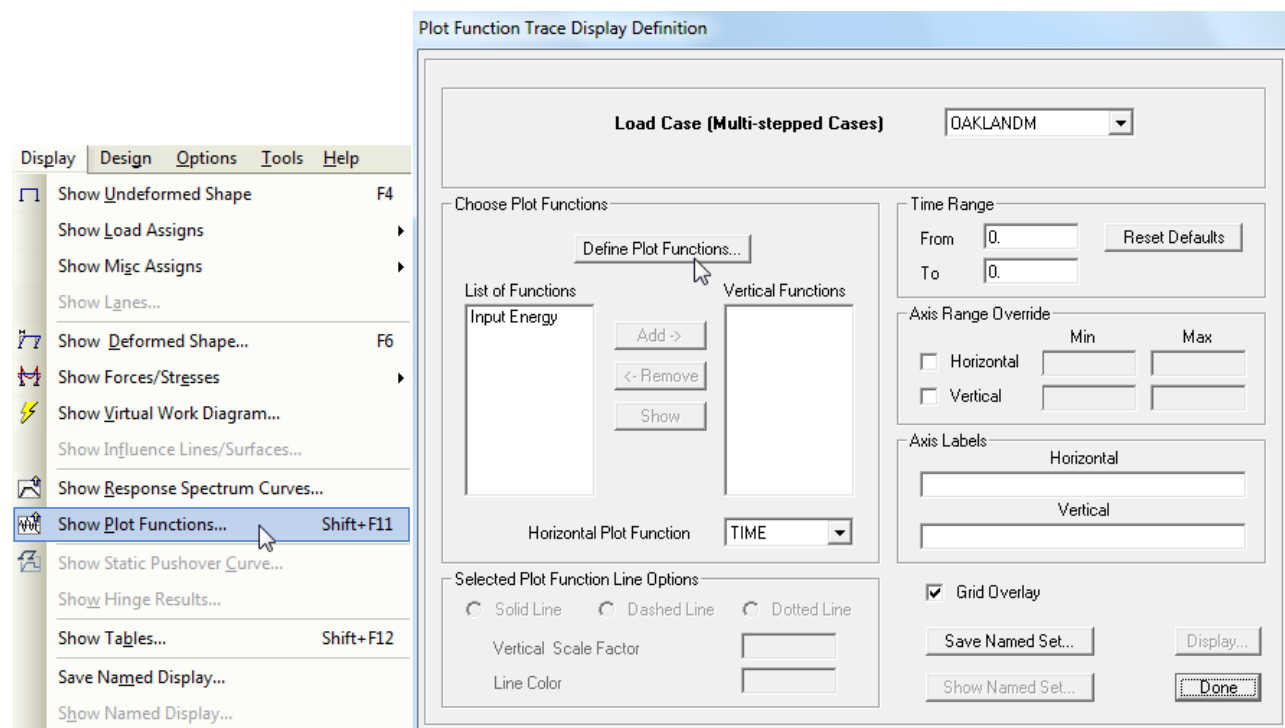
Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή της φόρτισης, μπορεί να γίνει με τις κλασικές εντολές **Display → Show Deformed Shape** για τις μετακινήσεις και **Display → Show Forces/Stresses → Frames/Cables** για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Η στιγμή της φόρτισης καθορίζεται από την επιλογή **Time**, ενώ υπάρχει πάντα η δυνατότητα εμφάνισης της περιβάλλουσας μέγιστων τιμών (**Envelope**). Τα παραπάνω αφορούν την απόκριση σε χρονοϊστορίες φόρτισης, δεν ισχύουν όμως στην περίπτωση συνδυασμών με άλλους τύπους φορτίων (π.χ. με τα κατακόρυφα).

Τα αναλυτικά αποτελέσματα σε μορφή χρονοϊστοριών απόκρισης εμφανίζονται από την εντολή **Display → Show Plot Functions** (Σχήμα 11.17). Στο παράθυρο που εμφανίζεται από το **Define Plot Functions..**, καθορίζεται το στοιχείο (κόμβος ή γραμμικό στοιχείο) και το μέγεθος απόκρισης τα οποία θα αποτυπωθούν στη χρονοϊστορία αποτελεσμάτων (Σχήμα 11.18 αριστερά). Δίνονται οι παρακάτω δυνατότητες:

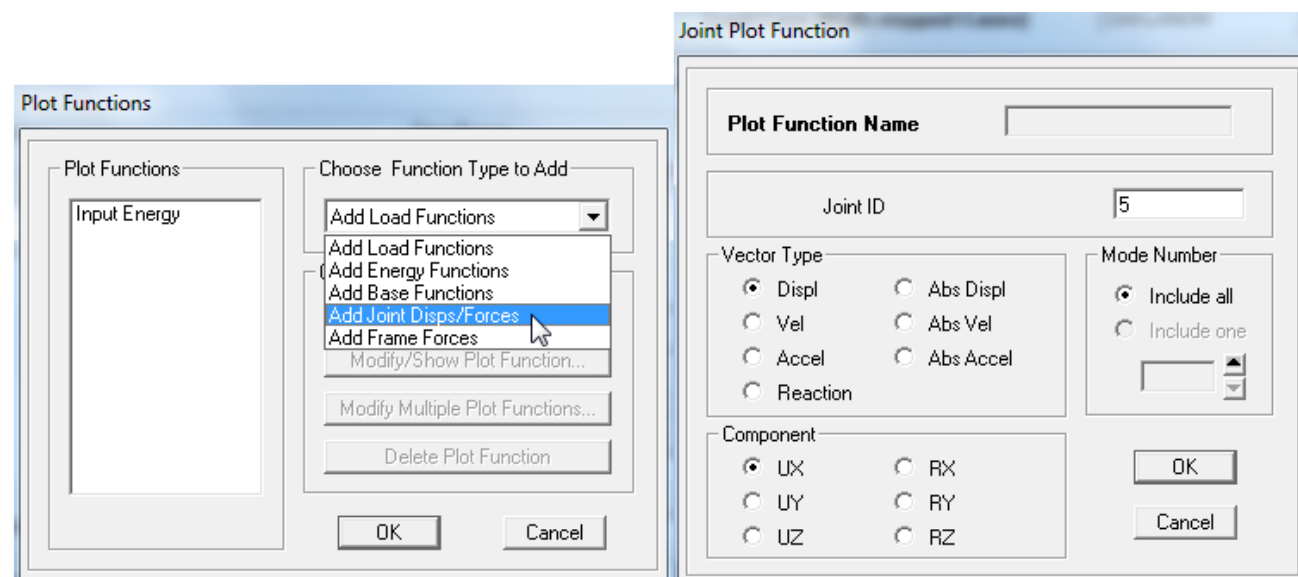
- **Add Load Functions:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες φόρτισης.
- **Add Energy Functions:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες διαφόρων τύπων ενέργειας κατά τη διάρκεια της φόρτισης (ενέργειας που εισάγεται στον φορέα, κινητικής ενέργειας, δυναμικής ενέργειας και ενέργειας που αποσβένεται κατά την ταλάντωση).

- **Add Base Functions:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες της συνολικής σεισμικής δύναμης στον φορέα (τέμνουσες βάσης).
- **Add Joint Disps/Forces:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων, επιταχύνσεων ή ταχυτήτων σε κόμβους του φορέα, αλλά και των αντιδράσεων στήριξης στη βάση.
- **Add Frame Forces:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών στα άκρα των γραμμικών στοιχείων (*Relative Distance=0* για την αρχή και *1* για το τέλος του γραμμικού στοιχείου).

Για την εμφάνιση της χρονοϊστορίας μετακίνησης ενός κόμβου επιλέγεται η εντολή **Add Joint Disps/Forces**. Στη συνέχεια, από το **Add Plot Function...**, καθορίζεται το ζητούμενο μέγεθος απόκρισης (εδώ μετακίνηση *Displ*) στον ζητούμενο κόμβο (π.χ. τον κόμβο *5* που βρίσκεται στο μέσον του ζυγώματος), όπως και η διεύθυνση της εν λόγω μετακίνησης.

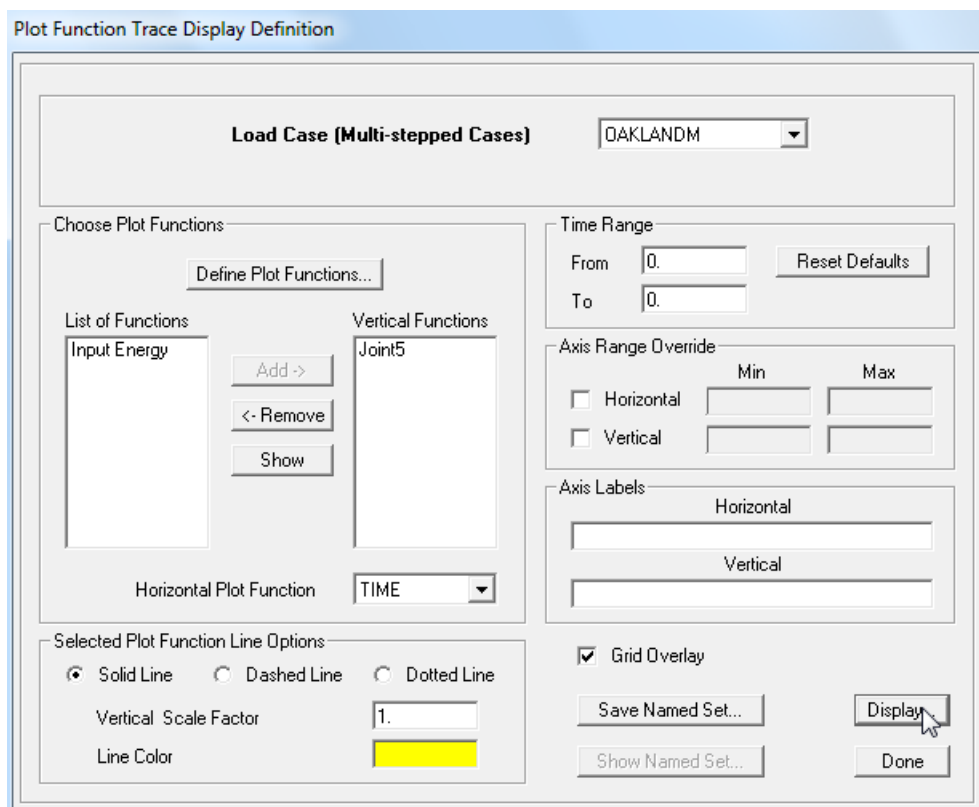


Σχήμα 11.17 Εντολές εμφάνισης χρονοϊστορίας μεγέθους απόκρισης.



Σχήμα 11.18 Καθορισμός στοιχείου (κόμβου-γραμμικού στοιχείου) και ζητούμενου μεγέθους απόκρισης.

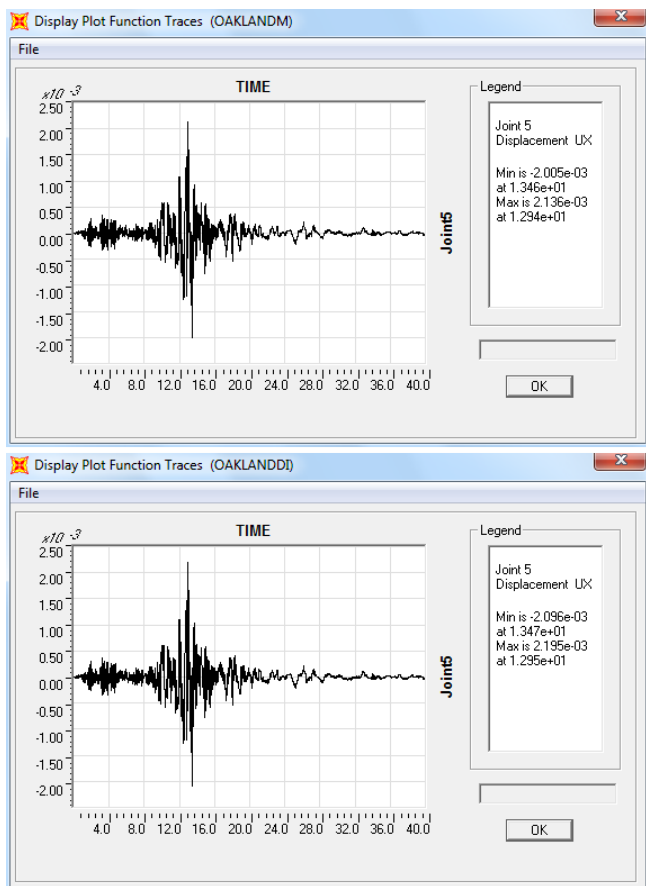
Με **OK** το ζητούμενο μέγεθος απόκρισης εμφανίζεται στο αρχικό παράθυρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.19. Για την επισκόπηση της χρονοϊστορίας μετακίνησης, το επιθυμητό στοιχείο/κόμβος μεταφέρεται με το **Add** στη δεξιά στήλη (**Vertical Functions**: μέγεθος στον κατακόρυφο άξονα της ζητούμενης χρονοϊστορίας), επιβεβαιώνεται ότι στο **Horizontal Plot Function** υπάρχει το **TIME** (οριζόντιος άξονας της ζητούμενης χρονοϊστορίας που πρέπει να αφορά τον χρόνο) και αφού οριστεί η επιθυμητή ανάλυση χρονοϊστορίας (**Analysis Case**) επιλέγεται το **Display**.



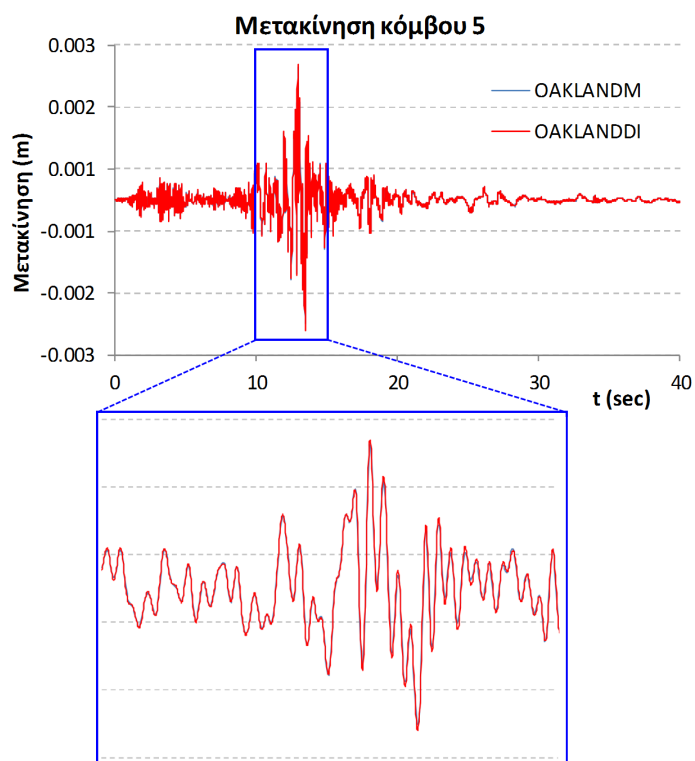
Σχήμα 11.19 Προετοιμασία παραμέτρων εμφάνισης της χρονοϊστορίας μετακίνησης του κόμβου 5.

Στο Σχήμα 11.20 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετακίνησης του κόμβου 5 για τις δυο μεθόδους ανάλυσης. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, σχεδόν ταυτόσημα, όπως προκύπτει και από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που εμφανίζονται στην λεζάντα, στο δεξί τμήμα του κάθε παραθύρου.

Μια καλύτερη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη απεικόνιση των δυο χρονοϊστοριών σε κοινό διάγραμμα. Με την εντολή **File → Print Tables to File...** στο Σχήμα 11.20, γίνεται εξαγωγή των τιμών της κάθε χρονοϊστορίας μετακινήσεων γίνεται σε αρχείο μορφής ***.txt**. Στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων για το άνοιγμα των αρχείων και την δημιουργία του κοινού διαγράμματος (Σχήμα 11.21). Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα από τις δυο αναλύσεις πρακτικά ταυτίζονται.



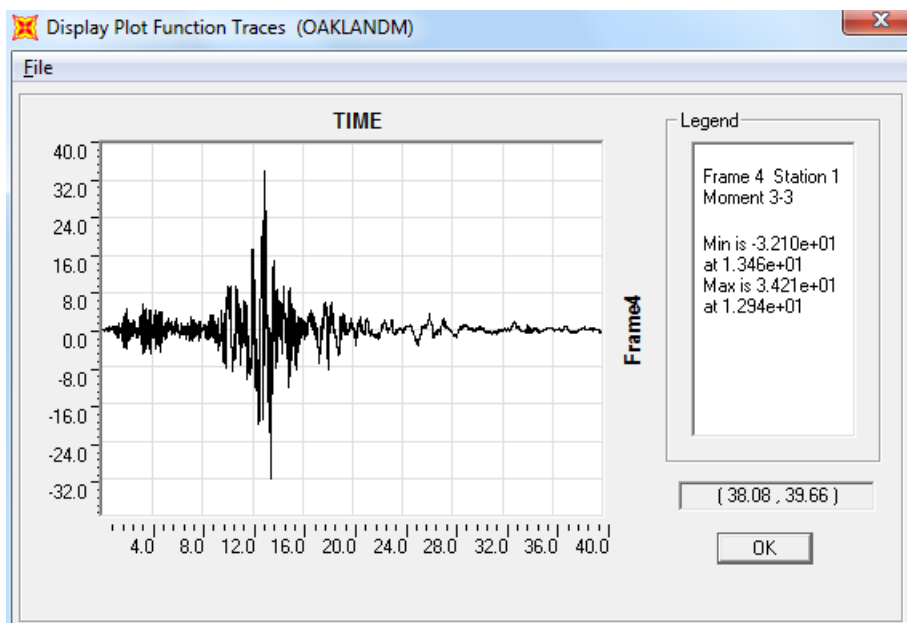
Σχήμα 11.20 Εμφάνιση της χρονοϊστορίας μετακίνησης του κόμβου 5 για την ανάλυση με επαλληλία ιδιομορφών (πάνω) και με απευθείας ολοκλήρωση στο χρόνο (κάτω).



Σχήμα 11.21 Εμφάνιση της χρονοϊστορίας μετακίνησης του κόμβου 5 για τις δυο μεθόδους ανάλυσης σε κοινό διάγραμμα (κάτω: λεπτομέρεια για το χρονικό διάστημα 10-15s).

Με αντίστοιχη διαδικασία μπορούν να αποτυπωθούν σε διάγραμμα χρονοϊστορίας και τα υπόλοιπα μεγέθη απόκρισης, όπως π.χ. καμπτικές ροπές σε διάφορες διατομές του φορέα, επιταχύνσεις κτλ. Έτσι, στο Σχήμα 11.22 εμφανίζεται η καμπτική ροπή της δοκού στο αριστερά άκρο (*Frame 4*), ζητώντας *Add Frame Forces* και επιλέγοντας *Moment 3-3* (για αρχή δοκού επιλέγεται *Relative Distance=0*). Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να ζητηθεί η εμφάνιση της χρονοϊστορίας φόρτισης (*Load functions*), της τέμνουσας βάσης (*Base functions*) κτλ.

Κατά την εμφάνιση των διαφόρων χρονοϊστοριών απόκρισης, παρατηρείται πως τα αποτελέσματα αφορούν μόνο τη φόρτιση βάσει του επιταχυνσιογραφήματος και όχι τον συνδυασμό που δημιουργήθηκε μαζί με τα κατακόρυφα φορτία.



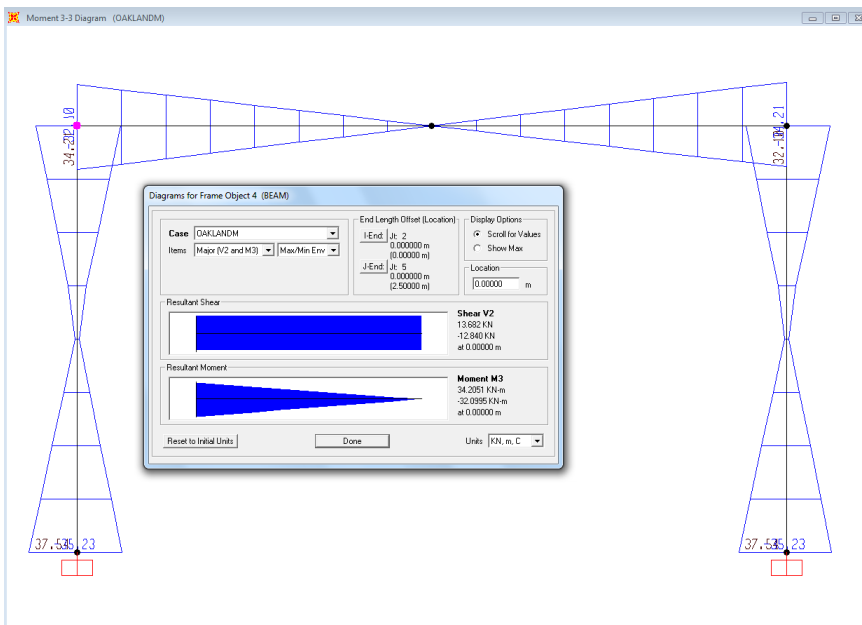
Σχήμα 11.22 Εμφάνιση της χρονοϊστορίας ροπής στο αριστερά άκρο της δοκού (*Frame 4 – Relative distance 0*) για τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών.

11.5.2. Εμφάνιση αποτελεσμάτων συνδυασμών φόρτισης

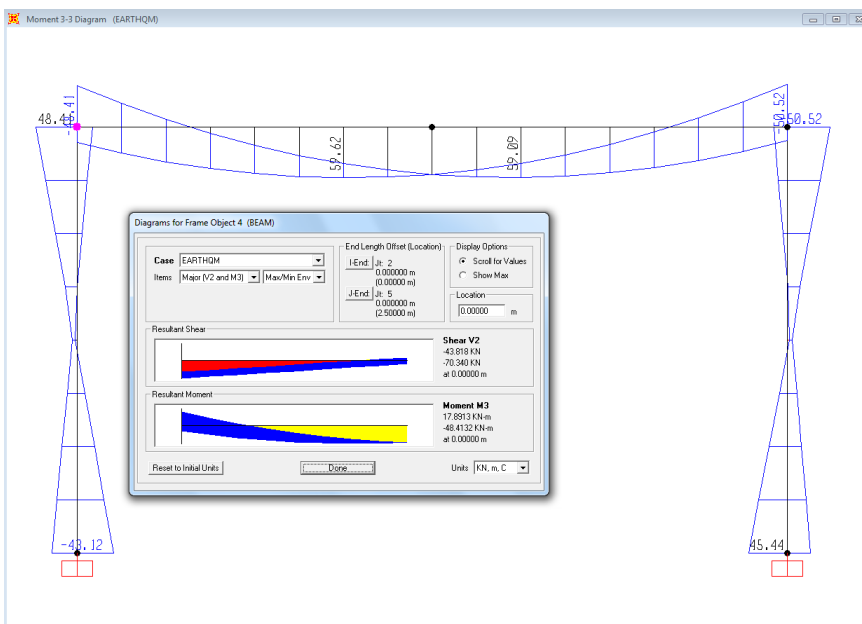
Η εμφάνιση αποτελεσμάτων από τη συνδυασμένη δράση των χρονοϊστοριών φόρτισης με τα κατακόρυφα φορτία είναι δυνατή μόνο ως περιβάλλουσες τιμές (μέγιστες και ελάχιστες τιμές), με χρήση της εντολής *Display* → *Show Forces/Stresses* για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 11.23 φαίνεται το διάγραμμα ροπών λόγω μόνο της σεισμικής καταπόνησης, δίχως τα κατακόρυφα φορτία (φόρτιση *OAKLANDM*), με συνέπεια το μηδενισμό της ροπής περίπου στο μέσον της δοκού. Παρατηρούνται θετικές και αρνητικές τιμές σε κάθε θέση, λόγω της εναλλαγής της φοράς της σεισμικής κίνησης (δεν υπάρχει προφανώς ακριβής συμμετρία καθώς το επιταχυνσιογράφημα φόρτισης δεν είναι συμμετρικό). Οι τιμές της ροπής από το συγκεκριμένο διάγραμμα βρίσκονται σε συμφωνία με τη χρονοϊστορία ροπών για τη θέση στο αριστερά άκρο της δοκού (Σχήμα 11.22).

Αντίθετα, στο Σχήμα 11.24 όπου συμπεριλαμβάνονται και τα κατακόρυφα φορτία (συνδυασμός *EARTHQM*), υπάρχει μόνιμα θετική ροπή στο άνοιγμα της δοκού. Παράλληλα, η διαφορά μεταξύ των μέγιστων θετικών και αρνητικών ροπών είναι σημαντική σε όλα τα δομικά στοιχεία, καθώς τα κατακόρυφα φορτία δημιουργούν ροπές σταθερού προσήμου στον φορέα.



Σχήμα 11.23 Περιβάλλουσα ροπών για τη φόρτιση OAKLANDM και λεπτομέρεια διαγραμμάτων δοκού στο αριστερό της τμήμα (μόνο σεισμικά φορτία – μέθοδος επαλληλίας ιδιομορφών).



Σχήμα 11.24 Περιβάλλουσα ροπών για τον συνδυασμό EARTHQM και λεπτομέρεια διαγραμμάτων δοκού στο αριστερό της τμήμα (κατακόρυφα και σεισμικά φορτία της μεθόδου επαλληλίας ιδιομορφών).

11.5.3. Εξαγωγή πλήρων χρονοϊστοριών απόκρισης

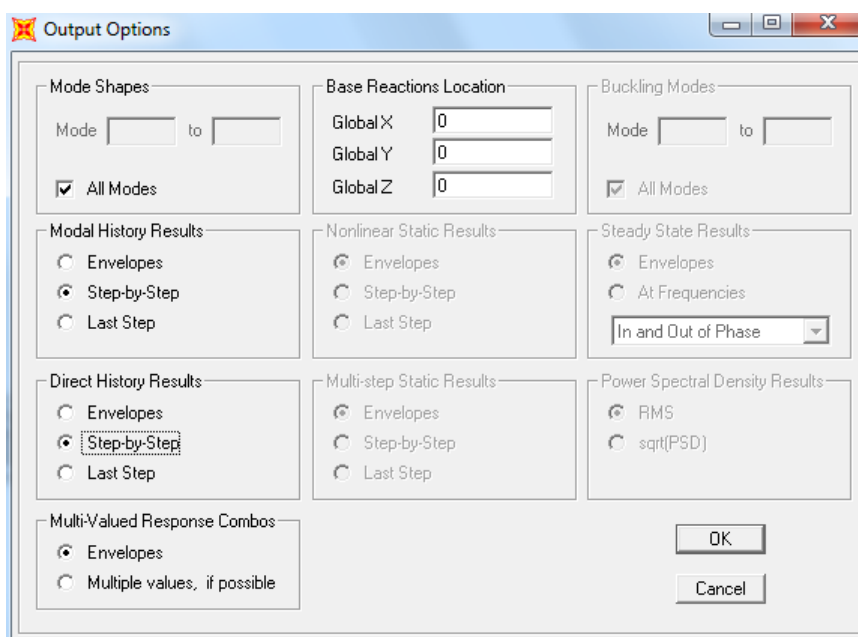
Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 9, με χρήση της εντολής *Display* → *Show Tables* και επιλογή των επιθυμητών μεγεθών απόκρισης και φορτιστικών καταστάσεων, τα τελικά αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν σε μορφή πινάκων και να εξαχθούν για περαιτέρω επεξεργασία στο *Excel*.

Αντίστοιχη δυνατότητα υπάρχει και για χρονοϊστορίες απόκρισης, όπου από το πλήκτρο *Modify/Show Options* προσφέρονται οι εξής επιλογές (Σχήμα 11.25):

- *Envelope*: εμφάνιση περιβάλλουσας τιμών (μέγιστες-ελάχιστες τιμές),
- *Step-by-Step*: εμφάνιση της πλήρους χρονοϊστορίας απόκρισης,

- **Last Step:** εμφάνιση αποτελεσμάτων του τελευταίου βήματος της ανάλυσης.

Η δεύτερη επιλογή (*Step-by-Step*) μπορεί να δώσει τη χρονοϊστορία απόκρισης σε μορφή λίστας τιμών (ενδεικτικά μετακινήσεις κόμβων στο Σχήμα 11.26), αντίστοιχα με τη διαδικασία που περιγράφηκε κατά την επισκόπηση μεμονωμένων χρονοϊστοριών απόκρισης του φορέα (επιλογή *File → Print Tables to File...* στο Σχήμα 11.20). Το πλεονέκτημα της διαδικασίας που περιγράφεται εδώ, είναι η εξαγωγή χρονοϊστοριών για πολλά μεγέθη ή θέσεις απόκρισης ταυτοχρόνως.



Σχήμα 11.25 Προσφερόμενες δυνατότητες εμφάνισης αποτελεσμάτων χρονοϊστορίας κατά τη διαδικασία παρουσίασης πινακοποιημένων αποτελεσμάτων ανάλυσης.

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0	0	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.01	0.0000007046	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.02	0.000002579	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.03	0.000005041	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.04	0.000007098	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.05	0.000007966	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.06	0.000007783	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.07	0.000006984	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.08	0.000005849	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.09	0.000004457	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.1	0.000002173	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.11	-0.000001411	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.12	-0.000005567	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.13	-0.000009312	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.14	-0.0000012	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.15	-0.0000013	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.16	-0.0000014	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.17	-0.0000014	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.18	-0.0000014	0	0	0
5	OAKLANDM	LinModHist	Time	0.19	-0.0000013	0	0	0

Σχήμα 11.26 Εμφάνιση της πλήρους χρονοϊστορίας μετακινήσεων σε μορφή λίστας τιμών (διακρίνονται τα αποτελέσματα της μετατόπισης του κόμβου 5 για τα πρώτα χρονικά βήματα).

11.5.4. Προσδιορισμός τέμνουσας βάσης

Η μάζα του φορέα προσδιορίστηκε στην αρχή του Κεφαλαίου ίση με 11.72t, ενώ η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του μονοβάθμιου πλαισίου υπολογίστηκε κατά την ιδιομορφική ανάλυση ίση με 0.14375s. Από την επισκόπηση του φάσματος απόκρισης για το επιταχυνσιογράφημα που αποτελεί τη σεισμική φόρτιση του φορέα (Σχήμα 11.9), προέκυψε φασματική επιτάχυνση περίπου ίση με 4.13m/s². Συνεπώς η σεισμική δύναμη (τέμνουσα βάση) που αναμένεται να αναπτυχθεί στο πλαίσιο μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$F = m \cdot S_g = 11.72 \cdot 4.13 = 48.40 \text{ kN} \quad (11.2)$$

Από την εντολή *Display* → *Show Tables* μπορεί να εμφανιστεί η συνολική σεισμική δύναμη που αναπτύσσεται στον φορέα, επιλέγοντας *Analysis Results* → *Structure Output* → *Base Reactions*, αλλά και τις κατάλληλες φορτιστικές καταστάσεις που αντιστοιχούν σε χρονοϊστορία φόρτισης. Με την παραπάνω διαδικασία προκύπτει πίνακας αποτελεσμάτων, με τη μέγιστη τιμή οριζόντιας δύναμης να εμφανίζεται ίση με 47.83kN για τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών και 49.15kN για τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο.

Παρατηρείται πως στην περίπτωση του μονοβάθμιου φορέα, η τιμή της σεισμικής δύναμης που εκτιμήθηκε αντιστοιχεί όντως σε αυτήν που αναπτύχθηκε στη βάση του πλαισίου. Στην περίπτωση βεβαίως που εξετάζεται πολυβάθμιος φορέας, η συγκεκριμένη διαδικασία είναι περισσότερο πολύπλοκη.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 11^{ου} Κεφαλαίου

- Ambraseys, N., Smit, P., Douglas, J., Margaris, B., Sigbjornsson, R., Olafsson, S., Suhadolc, P., & Costa, G. (2004). Internet site for European strong-motion data. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 45(3), 113-129.
- CEN (2004). *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. NJ: Prentice Hall Inc.
- Clough, R., & Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures* (Second ed.). New York: McGraw-Hill Inc.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (1989). *Concepts and applications of finite element analysis* (Third ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Rayleigh, J. W., & Lindsay, R. B. (1945). *The theory of sound*. New York: Dover Publications.
- Seismosoft (2013). SeismoSignal – A computer program for signal processing of strong-motion data (Version 5.1) [Computer software]. Retrieved from <http://www.seismosoft.com>
- SHARE (2010). EC Project SHARE: Seismic Hazard Harmonization in Europe. <http://www.share-eu.org>
- Κατσικαδέλης, Ι. Θ. (2012). *Δυναμική ανάλυση των κατασκευών: Θεωρία και εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Κολιόπουλος, Π. Κ., & Μανώλης, Γ. Δ. (2005). *Δυναμική των κατασκευών με εφαρμογές στην αντισεισμική μηχανική*. Αθήνα: Β. Γκιούρδας Εκδοτική.

Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 12 παρουσιάζεται η προσομοίωση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης απλού φορέα, γνωστής και ως ανάλυση pushover. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, ανελαστική στατική ανάλυση (pushover analysis), ανελαστική συμπεριφορά διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, ιδιότητες πλαστικών αρθρώσεων, μορφή επιβαλλόμενης οριζόντιας φόρτισης, καθορισμός μετακίνησης-στόχου, επισκόπηση αποτελεσμάτων καμπύλης αντίστασης και εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων.

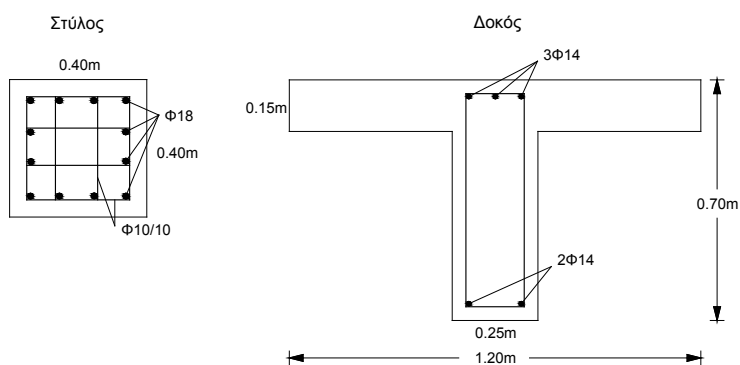
Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού και ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, εφαρμογή του παραδείγματος που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 3, όπως και πλήρης κατανόηση επιμέρους γνώσεων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

12.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η ανελαστική στατική ανάλυση του φορέα του Κεφαλαίου 3 (Σχήμα 3.1), με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Η συνολική οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή του πλαισίου θα θεωρηθεί ίση με 0.30m.
- Το υλικό του φορέα είναι οπλισμένο σκυρόδεμα τύπου C20/25 (να δοθεί αβαρές και με μηδενική πυκνότητα).
- Ο χάλυβας οπλισμού ανήκει στην κατηγορία B500C.
- Η επικάλυψη είναι ίση με 0.04m σε δοκό και υποστυλώματα.
- Ο οπλισμός δοκού είναι: άνω 3Φ14 (4.62cm²), κάτω 2Φ14 (3.08cm²) (Σχήμα 12.1).
- Ο οπλισμός υποστυλώματος είναι 12Φ18 (30.54cm²) περιμετρικά τοποθετημένος (Σχήμα 12.1) με συνδετήρες Φ10/10cm.



Σχήμα 12.1 Διάταξη οπλισμού υποστυλώματος και δοκού.

12.2. Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover analysis)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα δοθούν κάποιες κατευθυντήριες οδηγίες για την εκτέλεση στατικής ανελαστικής ανάλυσης (*pushover analysis*) στο *SAP 2000*. Η στατική ανελαστική ανάλυση αφορά μη γραμμική ανελαστική απόκριση του φορέα, υπό τη δράση οριζόντιων δυνάμεων στατικού τύπου για την προσομοίωση της σεισμικής φόρτισης. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο, και οι σχετικές κανονιστικές και βιβλιογραφικές προδιαγραφές για την υλοποίηση της αρκετά πολύπλοκες, συμπεριλαμβάνοντας σημαντικό εύρος επιστημονικών αντικειμένων. Κατά συνέπεια, στόχος του παραδείγματος δεν είναι η ακριβής εφαρμογή της στατικής ανελαστικής ανάλυσης για την περίπτωση του φορέα που εξετάζεται βάσει ενός αυστηρού κανονιστικού πλαισίου, αλλά η εισαγωγή του αναγνώστη στα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου.

Για την εκτέλεση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης στο συγκεκριμένο πρόγραμμα θα χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς σε προκαθορισμένα σημεία ενός φορέα, με τη χρήση των σημειακών πλαστικών αρθρώσεων (*hinges*). Για να γίνει μια τέτοια ανάλυση πρέπει να δοθούν τα κατάλληλα δεδομένα, αναφορικά τόσο με τις ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων όσο και με τις διάφορες παραμέτρους της ανάλυσης. Καθώς μάλιστα στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα γίνει αυτόματα ο υπολογισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς της κάθε διατομής (υποστυλώματος και δοκού), τα δεδομένα θα πρέπει να μπορούν να περιγράψουν με λεπτομέρεια τις ιδιότητες της διατομής, όπως θα φανεί στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

Καθώς ο φορέας της ανάλυσης βασίζεται στο πλαίσιο του Κεφαλαίου 3, αρχικά γίνεται άνοιγμα του συγκεκριμένου αρχείου και αποθήκευσή του ως *Chapter 12.SDB*.

Ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος

Είναι γνωστό πως οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζουν σημαντικό εύρος μεταελαστικής συμπεριφοράς κατά τη σεισμική τους απόκριση, εφόσον πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις μόρφωσης του φέροντος οργανισμού και διαστασιολόγησης των δομικών στοιχείων (Paulay & Priestley, 1992· Πενέλης & Κάππος, 1992). Η δυνατότητα ανελαστικής συμπεριφοράς φορέων οπλισμένου σκυροδέματος έχει αποδειχθεί από σημαντικό αριθμό πειραμάτων στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου συχνά το φαινόμενο εξετάζεται σε συνδυασμό με αναλυτικές λύσεις και αριθμητικά προσομοιώματα (ενδεικτικά Kirtas & Kakaletsis, 2013· Κακαλέτσης, 2008).

Το παραπάνω γεγονός λαμβάνεται υπόψη στη φιλοσοφία όλων των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών, με την υιοθέτηση απομειωμένων σεισμικών φορτίων κατά το σχεδιασμό των κατασκευών βάσει του συντελεστή συμπεριφοράς q . Η ανάλυση της κατασκευής αφορά το καθαρά γραμμικό ελαστικό εύρος απόκρισης, ακολουθώντας είτε την ισοδύναμη στατική είτε τη δυναμική φασματική προσέγγιση. Ο φορέας αναμένεται να παραλάβει την υπολειπόμενη σεισμική επιβάρυνση, μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου μηχανισμού πλαστικών αρθρώσεων σε προσεκτικά διαστασιοποιημένες διατομές των δομικών στοιχείων.

Το κέρδος της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η απλή και γρήγορη διαδικασία ανάλυσης σε επίπεδο απαιτήσεων τόσο για τον μελετητή όσο για το λογισμικό θα χρησιμοποιηθεί. Η διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών διαστασιολόγησης περιγράφεται αναλυτικά στους διάφορους Κανονισμούς, ενώ μια ενδιαφέρουσα παρουσίαση των λεπτομερειών όπλισης γίνεται από τον Ιγνατάκη (2008).

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αρχίσει να εξετάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και να εισάγονται στους Κανονισμούς μέθοδοι ανάλυσης που λαμβάνουν υπόψη άμεσα τη μη-γραμμική, ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η ανελαστική στατική ανάλυση, η οποία εξετάζεται στο παρόν, και η ανελαστική δυναμική ανάλυση, στοιχεία της οποίας θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 13.

Η ανελαστική στατική ανάλυση (pushover analysis)

Η ανελαστική στατική ανάλυση, γνωστή ως *pushover analysis* (αλλά και *nonlinear static analysis*, *στατική υπερωθητική ανάλυση* ή *μέθοδος ελέγχου των μετακινήσεων*), αποτελεί την κυριότερη μη-γραμμική στατική μέθοδο για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών (Αβραμίδης και συνεργάτες, 2011). Πρόκειται για μια διαδικασία απλούστερη σε απαιτήσεις προσομοίωσης και επίλυσης σε σχέση με την πλήρη δυναμική ανελαστική ανάλυση, η οποία όμως έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο στην περίπτωση φορέων που συνήθως χαρακτηρίζονται «κανονικοί», με χαμηλή συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών απόκρισης (*EC8 §4.3.3.4.2.1, ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.2α*).

Η αναγνώριση της μεθόδου στη διαδικασία τόσο του σχεδιασμού, ως κύρια ή συμπληρωματική μέθοδος, όσο και της αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών, είναι δεδομένη, καθώς συμπεριλαμβάνεται σε πολλούς σύγχρονους Κανονισμούς (*EC8 §4.3.3.1(4)* και *§4.3.3.4.2, ΚΑΝ.ΕΠΕ. §2.4.3.3 και §5.7*). Οι πρόσφατες τάσεις στους αμερικανικούς κανονισμούς περιορίζουν την επιλεξιμότητα της στατικής ανελαστικής ανάλυσης σε κτίρια ύψους έως 12m (*FEMA 750 – resource paper 2*) και δεν τη συμπεριλαμβάνουν στις γενικότερα προτεινόμενες μεθόδους σχεδιασμού, σε αντίθεση με την πιο σύνθετη δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας (*ASCE 7-10 §C12.6*). Αναλυτικές διατάξεις για τη χρήση της μεθόδου εξακολουθούν όμως να υπάρχουν σε μορφή συμπληρωματικών κειμένων κανονιστικού χαρακτήρα (*FEMA 440, FEMA 450 §5 Appendix A*), ενώ η μέθοδος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται κανονικά στην περίπτωση της σεισμικής αποτίμησης και ενίσχυσης υφισταμένων κτιρίων (*ASCE 41-13*).

Κατά την ανελαστική στατική ανάλυση εξετάζεται η συμπεριφορά του φορέα υπό τη δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων (*EC8 §4.3.3.4.2.1(1)*). Βασικό αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η καμπύλη ικανότητας (ή καμπύλη αντίστασης) της κατασκευής, όπου αποτυπώνεται η μεταβολή της τέμνουσας βάσης με τη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου, η θέση του οποίου συνήθως αφορά το κέντρο μάζας στην κορυφή του φορέα (*EC8 §4.3.3.4.2.3, ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.3.2*). Εξετάζεται, για την κατάσταση του φορέα που αφορά τη μετακίνηση-στόχο, εφόσον η παραμόρφωση των πλάσμιων δομικών στοιχείων δεν συνεπάγεται βαθμό βλάβης μεγαλύτερο από τον ανεκτό.

Από το *Εθνικό Προσάρτημα* του *EC8 §4.3.3.1(4)*, προκύπτει πως η ανελαστική στατική μέθοδος (αλλά και η δυναμική ανελαστική μέθοδος που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 13) δύναται να χρησιμοποιηθεί για κατασκευές του Ελληνικού χώρου μόνο σε συνδυασμό με τη δυναμική φασματική μέθοδο ανάλυσης, για εμβάθυνση στα αποτελέσματα της τελευταίας. Σημειώνεται μάλιστα, πως δεν επιτρέπεται να ληφθούν υπόψη τυχόν ευνοϊκότερα αποτελέσματα, σε σχέση με τη δυναμική φασματική ανάλυση, με εξαίρεση τις παρακάτω περιπτώσεις:

- κτίρια με σεισμική μόνωση,
- έλεγχο ή διόρθωση του συντελεστή υπεραντοχής α_u/α_1 που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή συμπεριφοράς q ,
- αποτίμηση της συμπεριφοράς υπαρχόντων ή ενισχυόμενων κτιρίων.

Η αναλυτική περιγραφή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης και της εξέλιξής της βρίσκεται εκτός των στόχων του συγγράμματος. Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο και τις εφαρμογές της μπορούν να αναζητηθούν στις παραπάνω κανονιστικές διατάξεις, όπως και στη διεθνή βιβλιογραφία (ενδεικτικά Chorga & Goel, 2002· Fajfar 2000· Kappos & Panagopoulos 2004· Kappos, Panagopoulos, Panagiotopoulos, & Penelis, 2006· Krawinkler & Seneviratna, 1998).

12.3. Καθορισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς διατομής οπλισμένου σκυροδέματος

Ο καθορισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την εκπόνηση ανελαστικών αναλύσεων, έχει κατά κύριο λόγο ως στόχο τον προσδιορισμό διαγραμμάτων ροπής-στροφής ($M-\theta$) ή ροπής-καμπυλότητας ($M-\kappa$) για την εν λόγω διατομή. Ασφαλώς αντίστοιχες καμπύλες μπορούν να προκύψουν και για τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη, είναι όμως ήσσονος σημασίας, καθώς η κύρια μορφή ανελαστικής παραμόρφωσης των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος σχετίζεται με την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων λόγω καμπτικής ροπής.

Ο υπολογισμός των διαγραμμάτων που προαναφέρθηκαν μπορεί να γίνει είτε αυτόματα από το *SAP 2000*, είτε με χρήση κάποιου τρίτου προγράμματος ανάλυσης διατομών, όπως π.χ. το *RCCOLA* (Mahin & Bertero, 1977· Παναγόπουλος & Κάππος, 2008). Για την πρώτη διαδικασία αυτόματου υπολογισμού από το πρόγραμμα, η οποία υιοθετείται στο τρέχον παράδειγμα, απαιτείται μια ιδιαίτερα λεπτομερής περιγραφή των υλικών και των διατομών του φέροντος οργανισμού του φορέα που σχετίζονται με:

- την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος,
- την ανελαστική συμπεριφορά του χάλυβα των ράβδων οπλισμού.

12.3.1. Ανελαστική συμπεριφορά σκυροδέματος

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης ανελαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός του τύπου (ποιότητας) του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται. Αρχικά γίνεται τροποποίηση του υφιστάμενου υλικού από το *Define* → *Materials*, όπου επιλέγεται το *Show Advanced Properties*, όπως φαίνεται αριστερά στο Σχήμα 12.3, ώστε να εμφανιστούν οι πλήρεις ιδιότητες του υλικού. Με *Modify/Show* στο *MATERIAL* αλλάζει η ονομασία του υλικού σε *C20/25* και ο τύπος του σε σκυρόδεμα (*Material Type: Concrete*) (Σχήμα 12.3, δεξιά).

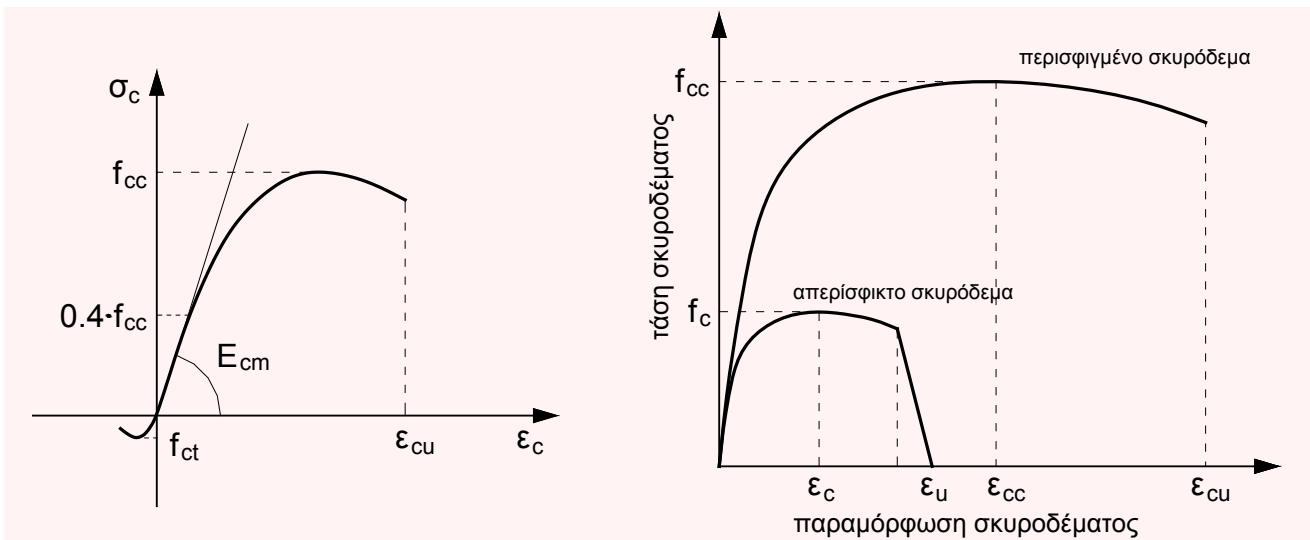
Στη συνέχεια, με *Modify/Show Material Properties*, τίθενται οι τιμές των ελαστικών αλλά και ανελαστικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, βάσει των μέσων τιμών των ιδιοτήτων του (Σχήμα 12.4).

Ιδιότητες και προσδιορισμός ανελαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος

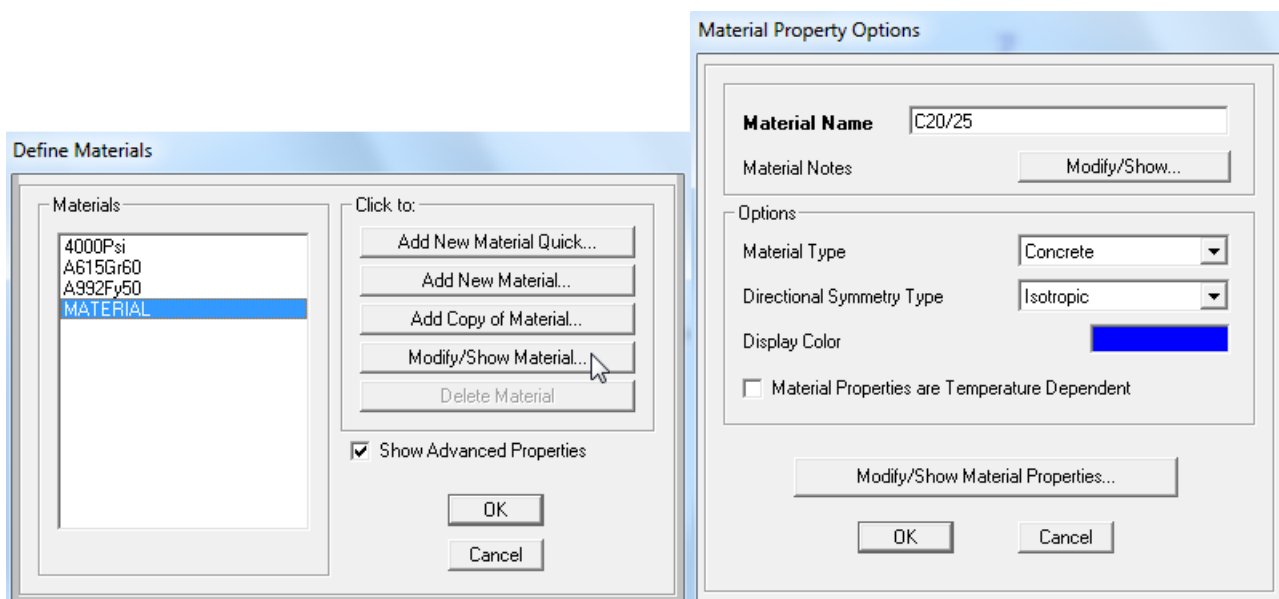
Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που ορίζονται κατά τις μη γραμμικές μεθόδους θα πρέπει να αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των ιδιοτήτων του υλικού (*EC8 §4.3.3.4.1(4)*). Συνεπώς για σκυρόδεμα *C20/25* προκύπτουν οι παρακάτω τιμές (*EC2 Table 3.1*):

- μέση τιμή επιβατικού μέτρου ελαστικότητας $E=3 \cdot 10^7 \text{ kPa}$,
- μέση τιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος $f_{cm}=28000 \text{ kPa}$,
- τιμή θλιπτικής παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση $\epsilon_{c1}=2.0\%$,
- τιμή θλιπτικής παραμόρφωσης αστοχίας $\epsilon_{cu}=3.5\%$ (στον *ΕΚΩΣ 2000 §2.5.1* προτείνονται υψηλότερες τιμές μεταξύ 3.5-7.0%).

Σημειώνεται πως το διάγραμμα που περιγράφει την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος έχει διαφορετική εικόνα για το περισφιγμένο σε σχέση με το απερίσφικτο σκυρόδεμα. Ενδεικτικά, στην αριστερή εικόνα του Σχήματος 12.2, παρουσιάζεται η γενική μορφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα (*ΕΚΩΣ 2000, §2.5.1*), όπου ο δείκτης c αντιστοιχεί σε θλίψη και ο δείκτης t σε εφελκυσμό. Στη δεξιά εικόνα του Σχήματος παρουσιάζεται ενδεικτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για περισφιγμένο (*confined*) και απερίσφικτο (*unconfined*) σκυρόδεμα (περισσότερες πληροφορίες από *Computers and Structures Inc., 2008*, αναφορικά με την έρευνα των Mander, Priestley, & Park, 1988).



Σχήμα 12.2 Τυπικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυροδέμα: (αριστερά) γενική μορφή διαγράμματος και (δεξιά) σύγκριση περισφισμένου-απερίσφικτου σκυροδέματος κατά Mander et al. (1988).



Σχήμα 12.3 Ορισμός πρόσθετων χαρακτηριστικών υλικού σκυροδέματος C20/25.

Από την επιλογή *Nonlinear Material Data* ορίζονται οι παραμορφώσεις στη μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (*Strain at Unconfined Compressive Strength*), αλλά και η μέγιστη παραμόρφωση αστοχίας (*Ultimate Unconfined Strain Capacity*), ενώ στο πεδίο *Stress-Strain Curve Definition Options* δίνεται η μορφή της καμπύλης ανελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής.

Οι διαθέσιμες επιλογές για τον προσδιορισμό της καμπύλης ανελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι δύο: *Simple* και *Mander* (Σχήμα 12.5). Στο παρόν παράδειγμα, για λόγους οικονομίας χρόνου, επιλέγεται η *Simple*, οπότε από το *Show Stress-Strain Plot..* εμφανίζεται η εν λόγω καμπύλη για το σκυροδέμα (Σχήμα 12.6). Η διαφορά του διαγράμματος που προκύπτει, σε σχέση με τη μορφή της καμπύλης του Σχήματος 12.2, οφείλεται στο ότι οι αρνητικές τιμές εμφανίζονται στην κάτω πλευρά του άξονα Y (υπάρχει επιλογή *Reverse Plot Axis Direction* για την απεικόνιση των θλιπτικών τάσεων στην πάνω πλευρά του άξονα). Στο ίδιο διάγραμμα διακρίνονται οι μικρές αντοχές του σκυροδέματος σε εφελκυστικές τάσεις.

Material Property Data

Material Name C20/25	Material Type Concrete	Symmetry Type Isotropic
Modulus of Elasticity E 30000000	Weight and Mass Weight per Unit Volume 0.	Units KN, m, C
Poisson's Ratio U 0.	Mass per Unit Volume 0.	
Coeff of Thermal Expansion A 0.	Other Properties for Concrete Materials Specified Concrete Compressive Strength, f'c 28000 <input type="checkbox"/> Lightweight Concrete Shear Strength Reduction Factor	
Shear Modulus G 15000000	Advanced Material Property Data Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...	

OK Cancel

Σχήμα 12.4 Τιμές πρόσθετων χαρακτηριστικών υλικού σκυροδέματος C20/25.

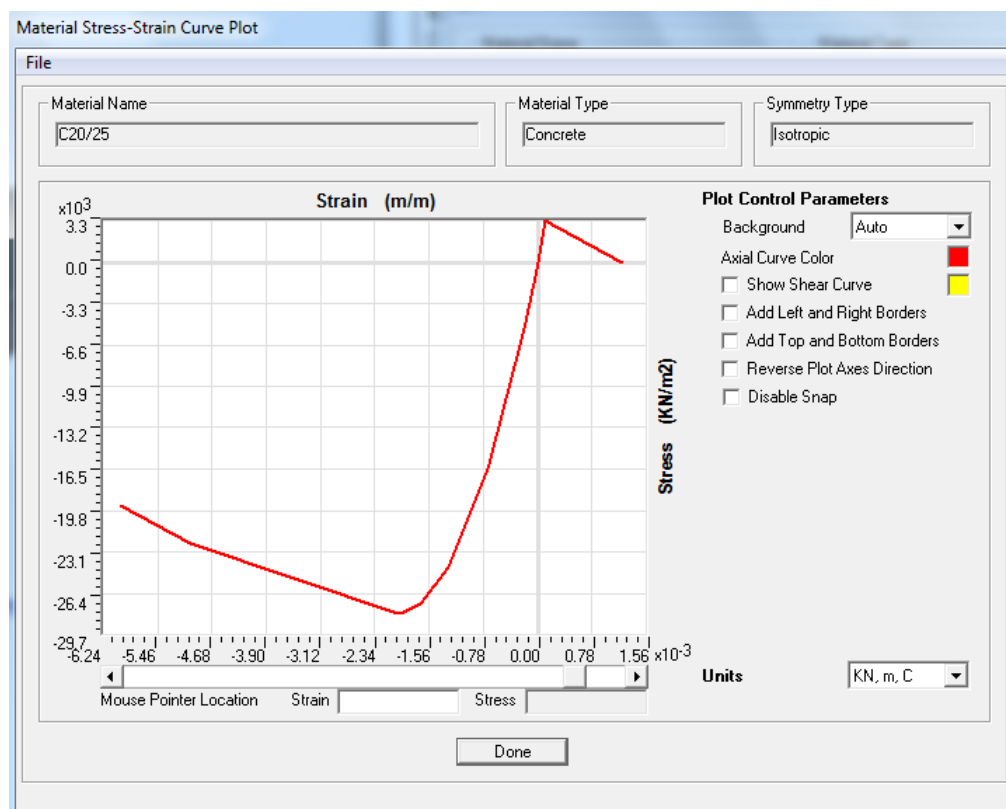
Nonlinear Material Data

Edit

Material Name C20/25	Material Type Concrete
Hysteresis Type Takeda	Drucker-Prager Parameters Friction Angle 0. Dilatational Angle 0.
Units KN, m, C	
Stress-Strain Curve Definition Options <input checked="" type="radio"/> Parametric <input type="radio"/> User Defined Simple Mander	
Parametric Strain Data Strain At Unconfined Compressive Strength, f'c 2.000E-03 Ultimate Unconfined Strain Capacity 3.500E-03 Final Compression Slope (Multiplier on E) -0.1	

Show Stress-Strain Plot...
OK Cancel

Σχήμα 12.5 Ιδιότητες μη γραμμικής συμπεριφοράς σκυροδέματος.



Σχήμα 12.6 Καμπύλη ανελαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος (Simple).

12.3.2. Ανελαστική συμπεριφορά χάλυβα ράβδων οπλισμού

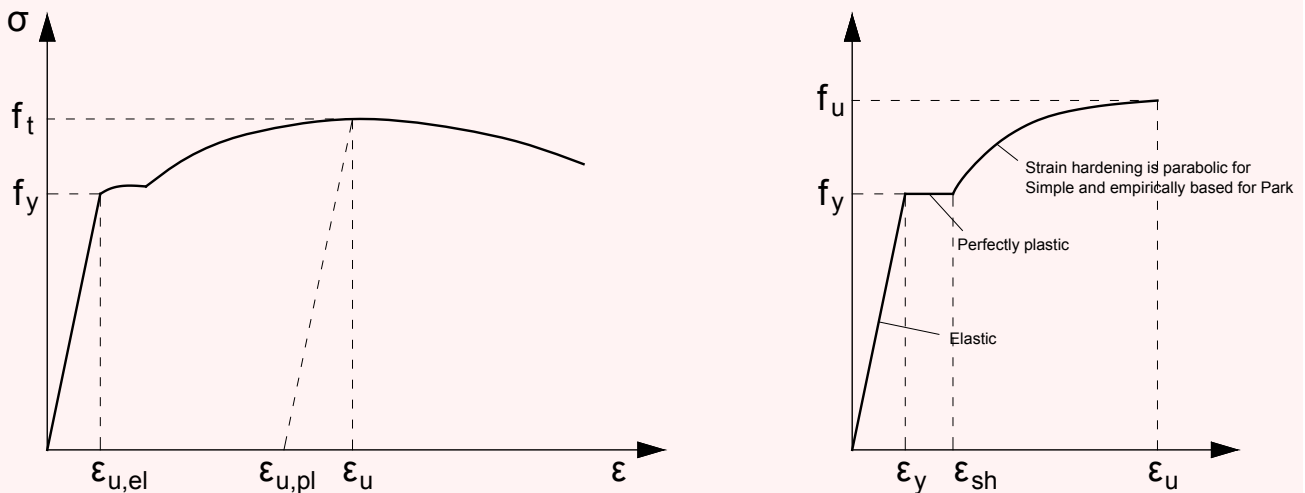
Για την προσομοίωση του υλικού του χάλυβα οπλισμού ορίζεται ένα νέο υλικό, από την εντολή *Define* → *Materials* → *Add New Material*, με επιλεγμένο το *Show Advanced Properties* και τύπο υλικού τον χάλυβα οπλισμού (*Material Type: Rebar*) (Σχήμα 12.8). Στη συνέχεια, με *Modify/Show Material Properties*, τίθενται οι τιμές των ελαστικών αλλά και ανελαστικών χαρακτηριστικών του χάλυβα, βάσει των μέσων τιμών των ιδιοτήτων του (Σχήμα 12.9).

Ιδιότητες και προσδιορισμός ανελαστικής συμπεριφοράς χάλυβα ράβδων οπλισμού

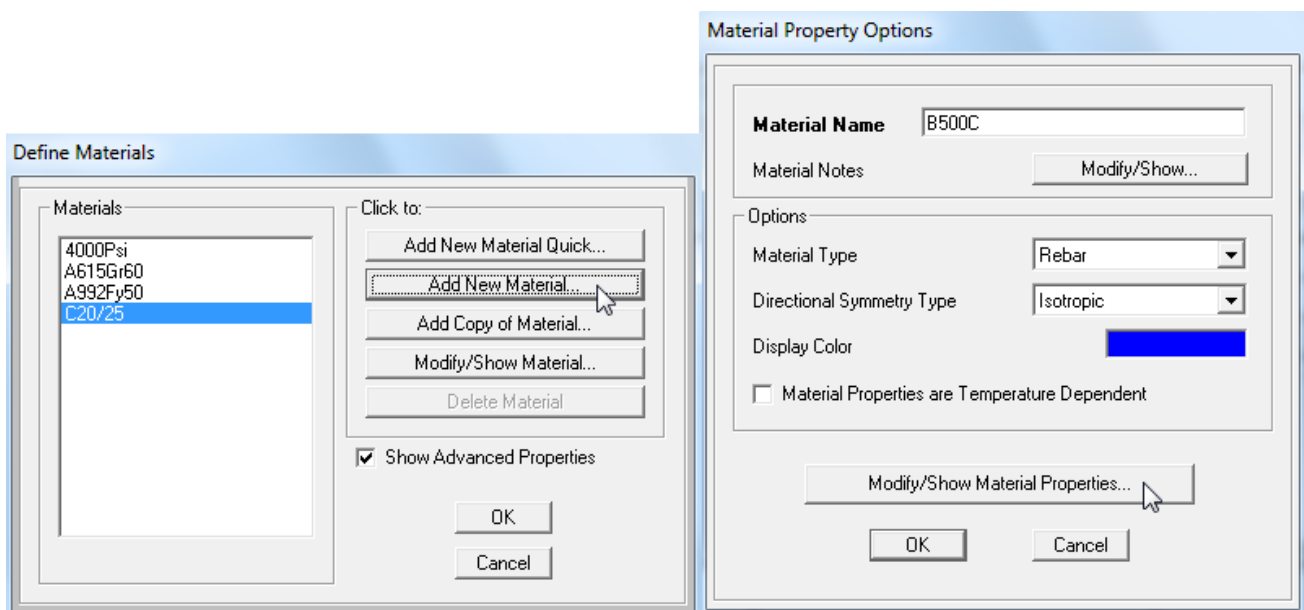
Για τον προσδιορισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα των ράβδων οπλισμού, είναι απαραίτητος ο καθορισμός του τύπου (ποιότητας) του χάλυβα που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οι τιμές της τάσης διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής τάσης του χάλυβα. Οι ιδιότητες του χάλυβα που ορίζονται κατά τις μη γραμμικές μεθόδους θα πρέπει να αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των ιδιοτήτων του υλικού (*EC8 §4.3.3.4.1(4)*). Συνεπώς, για χάλυβα *B500C*, προκύπτουν οι παρακάτω τιμές (οι συμβολισμοί ακολουθούν αυτούς που εμφανίζονται στο πρόγραμμα):

- μέτρο ελαστικότητας $E=2.0 \cdot 10^8 \text{ kPa}$ (*KTX 2008 §3.3[α]*),
- λόγος *Poisson* 0.3 (*KTX 2008 §3.3[γ]*),
- συντελεστής γραμμικής διαστολής $12.0 \cdot 10^{-6}$ (*KTX 2008 §3.3[ε]*),
- τάση διαρροής (ονομαστική) $F_y=500 \text{ MPa}$ (προκύπτει από τον τύπο του χάλυβα),
- τάση διαρροής (μέση τιμή) $F_{ye}=1.15 \cdot 500=575 \text{ MPa}$ (επιλέγεται τιμή 1.15 βάσει του ορίου $F_{ye}/F_y \leq 1.25$ που ορίζεται από τον *KTX 2008 Πιν. 3.3* κατά *ΕΛΟΤ 1421-3* και συστάσεις για $F_{ye}/F_y \leq 1.15$ από τους Πενέλη και Κάππο, 1992),
- εφελκυστική αντοχή (ονομαστική) $F_u=1.25 \cdot 500=625 \text{ MPa}$ (επιλέγεται τιμή 1.25 βάσει του εύρους $1.15 \leq F_u/F_y \leq 1.35$ που ορίζεται από τον *EC2 Table C.1* και τον *KTX 2008 Πιν. 3.3* κατά *ΕΛΟΤ 1421-3*),
- εφελκυστική αντοχή (μέση τιμή) $F_{ue}=1.10 \cdot 625=687.5 \text{ MPa}$ (επιλέγεται τιμή 1.10 βάσει του *KAN.ΕΠΕ. §Π4.1.2[β]* μεταξύ των ορίων 1.05-1.10),

- συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_u \geq 7.5\%$ (ΚΤΧ 2008 Πιν. 3.3 κατά ΕΛΟΤ 1421-3). Στην αριστερή εικόνα του Σχήματος 12.7 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα (Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων 2008, §3.2.1), όπου ο δείκτης t αντιστοιχεί σε εφελκυσμό. Στη δεξιά εικόνα φαίνεται η γενική μορφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων που χρησιμοποιεί το SAP 2000 (CSI, 2008), σε δυο εναλλακτικές μορφές: *Simple* (παραβολική μορφή στον τελευταίο κλάδο) και κατά *Park* (εμπειρική μορφή του τελευταίου κλάδου).



Σχήμα 12.7 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για το χάλυβα: (αριστερά) τυπικό διάγραμμα και (δεξιά) διάγραμμα που χρησιμοποιείται στο SAP 2000 (τύπου *Simple* και κατά *Park*).



Σχήμα 12.8 Ορισμός υλικού χάλυβα οπλισμού.

Από την επιλογή *Nonlinear Material Data..* (Σχήμα 12.10) ορίζονται οι παραμορφώσεις στην έναρξη της κράτυνσης (*Strain at Onset of Strain Hardening*), η οποία αφορά τον τρίτο κλάδο συμπεριφοράς του χάλυβα σύμφωνα με το Σχήμα 12.7, όπως και η μέγιστη παραμόρφωση αστοχίας (*Ultimate Strain Capacity*). Στα συγκεκριμένα πεδία επιλέγεται να διατηρηθούν οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα τιμές.

Material Property Data

Material Name B500C	Material Type Rebar	Symmetry Type Isotropic
Modulus of Elasticity E 2E+08	Weight and Mass Weight per Unit Volume 0 Mass per Unit Volume 0	Units KN, m, C
Poisson's Ratio U 0.3	Other Properties for Rebar Materials Minimum Yield Stress, Fy 500000 Minimum Tensile Stress, Fu 625000 Expected Yield Stress, Fye 575000 Expected Tensile Stress, Fue 687500	
Coeff of Thermal Expansion A 1.20E-05	Advanced Material Property Data Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...	
Shear Modulus G 76923077		

OK Cancel

Σχήμα 12.9 Ορισμός ελαστικών χαρακτηριστικών χάλυβα οπλισμού.

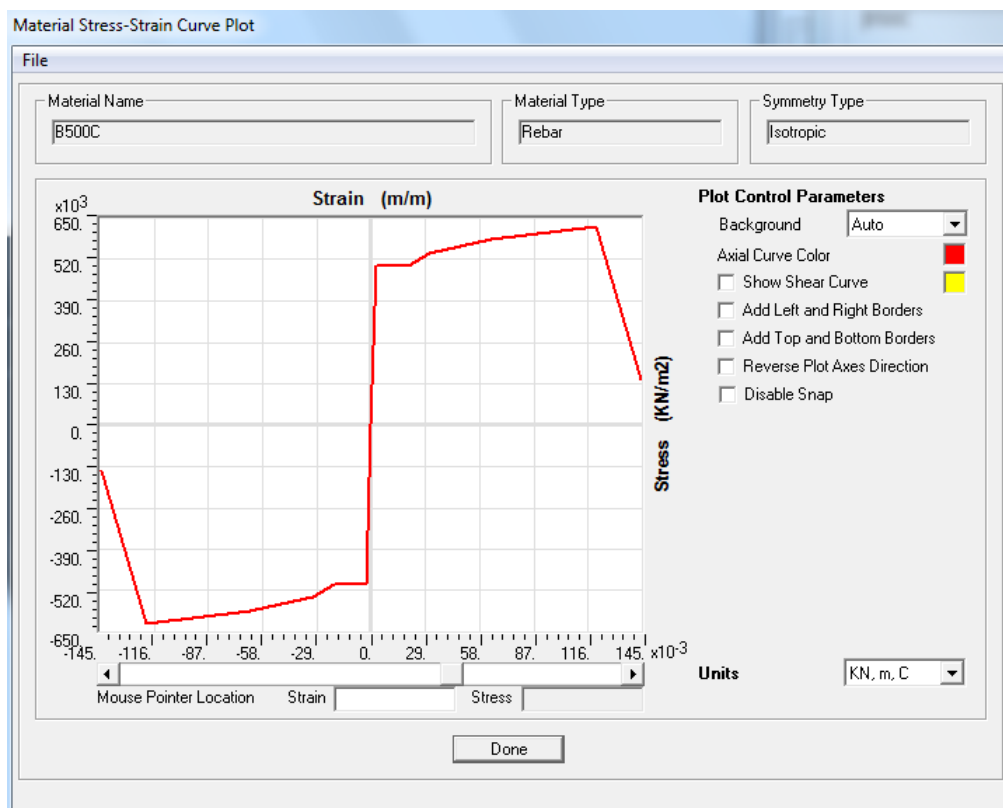
Nonlinear Material Data

Edit

Material Name B500C	Material Type Rebar	
Hysteresis Type Kinematic	Drucker-Prager Parameters Friction Angle Dilatational Angle	Units KN, m, C
Stress-Strain Curve Definition Options <input checked="" type="radio"/> Parametric <input type="radio"/> User Defined	Simple Simple Park	Convert To User Defined
Parametric Strain Data Strain At Onset of Strain Hardening 0.02 Ultimate Strain Capacity 0.12 Final Slope (Multiplier on E) -0.1 <input type="checkbox"/> Use Caltrans Default Controlling Strain Values (Bar Size Dependent)		
Show Stress-Strain Plot...		
OK Cancel		

Σχήμα 12.10 Ιδιότητες μη-γραμμικής συμπεριφοράς χάλυβα οπλισμού.

Στο πεδίο *Stress-Strain Curve Definition Options* ορίζεται η μορφή της καμπύλης ανελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής. Οι επιλογές που δίνονται είναι *Simple* και *Park* (Σχήμα 12.10). Στο παρόν παράδειγμα επιλέγεται *Simple*, οπότε από το *Show Stress-Strain Plot..* εμφανίζεται η εν λόγω καμπύλη για το σκυρόδεμα (Σχήμα 12.11).



Σχήμα 12.11 Καμπύλη ανελαστικής συμπεριφοράς χάλυβα σπλισμού (*Simple*).

12.3.3. Ανελαστική συμπεριφορά σε επίπεδο διατομής

Στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης θα δοθεί η λεπτομερής περιγραφή διαστάσεων, υλικών και σπλισμού στην κάθε διατομή, ώστε να μπορεί να γίνει υπολογισμός της αναμενόμενης ανελαστικής της συμπεριφοράς. Γίνεται συνεπώς τροποποίηση των διατομών στύλων (*COLUMN*) και δοκού (*BEAM*), από την εντολή *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections*.

Εξετάζοντας αρχικά τη διατομή υποστυλώματος, επιβεβαιώνεται ότι ως υλικό διατομής έχει τεθεί το νέο υλικό *C20/25*, ενώ στην επιλογή *Concrete Reinforcement* ορίζεται ο σπλισμός που φαίνεται στο Σχήμα 12.1. Καθώς στα υποστυλώματα έχουν τοποθετηθεί ράβδοι διαμέτρου 18mm (*18d*) που δεν υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του προγράμματος, θα πρέπει να εισαχθούν από την επιλογή *Longitudinal Bar Size* πατώντας το (+) (Σχήμα 12.12, αριστερά). Εκεί ορίζεται η ονομασία της ράβδου (*18d*), το εμβαδόν (*Bar Area*) και η διάμετρος (*Bar Diameter*), ενώ με *Add* προστίθεται στη λίστα των διαθέσιμων ράβδων σπλισμού (Σχήμα 12.12, δεξιά).

Στη συνέχεια ορίζονται κατάλληλα οι διαμήκεις (*Longitudinal Bars*) και οι εγκάρσιοι σπλισμοί (*Confinement Bars*), με βάση τα παρακάτω πεδία (Σχήμα 12.12, αριστερά):

- Τύπος διαστασιολόγησης (*Design Type*): Υποσύλωμα (*Column*).
- Διάταξη όπλισης (*Reinforcement Configuration*): Ορθογωνική (*Rectangular*).

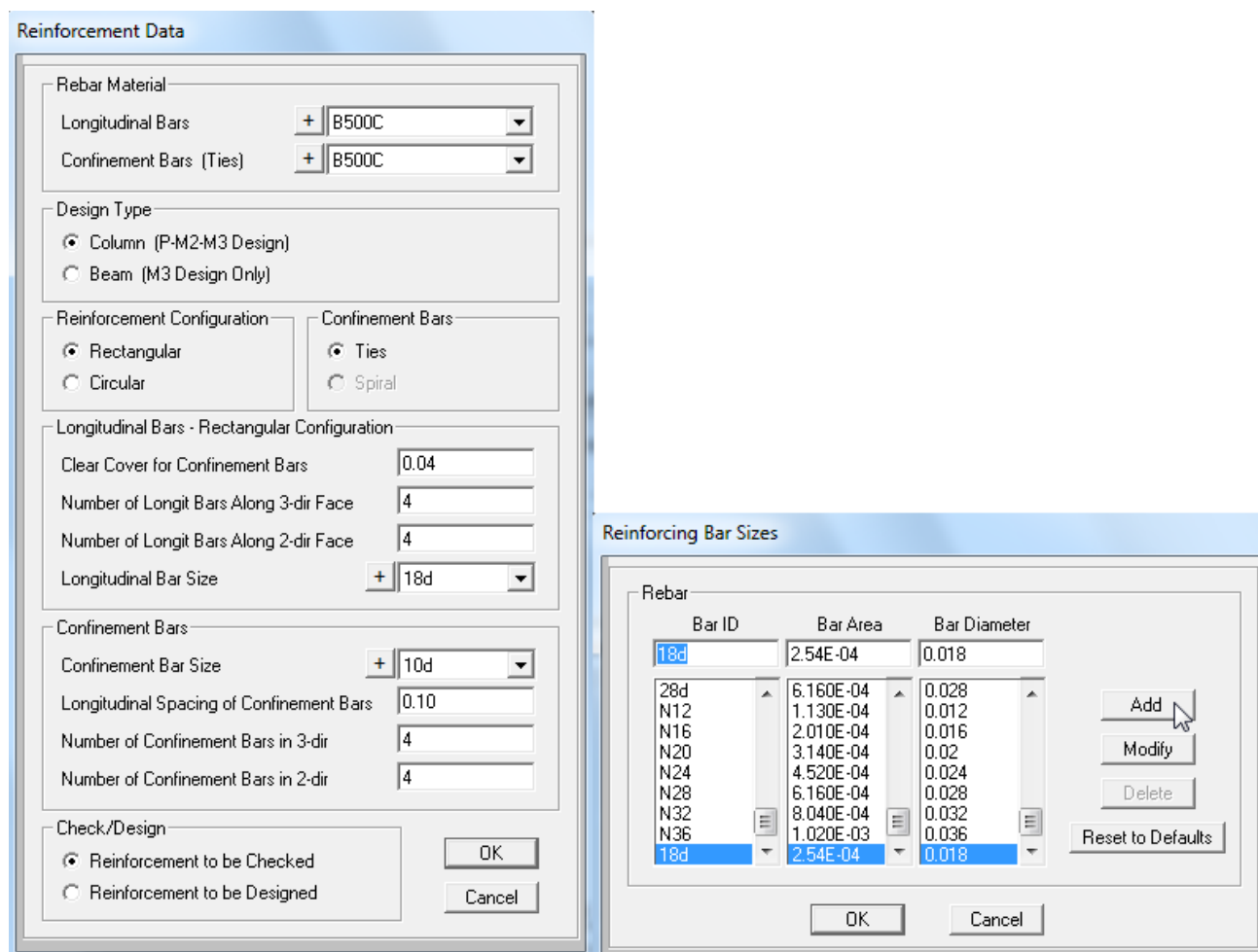
Διαμήκεις οπλισμοί (Longitudinal Bars):

- Επικάλυψη (*Clear Cover for Confinement Bars*): *0.04m*.
- Αριθμός διαμήκων ράβδων στις πλευρές που είναι παράλληλες με τον τοπικό άξονα 3 (*Number of Longit Bars Along 3-dir Face*): *4*.
- Αριθμός διαμήκων ράβδων στις πλευρές που είναι παράλληλες με τον τοπικό άξονα 2 (*Number of Longit Bars Along 2-dir Face*): *4*.
- Μέγεθος διαμήκου ράβδου (*Longitudinal Bar Size*): *18d* (18mm διάμετρος, όπως ορίστηκε προηγουμένως).

Εγκάρσιοι οπλισμοί (Confinement Bars):

- Μέγεθος συνδετήρα (*Confinement Bar Size*): *10d* (10mm διάμετρος).
- Απόσταση μεταξύ συνδετήρων (*Longitudinal Spacing of Confinement Bars*): *0.10m*.
- Αριθμός σκελών συνδετήρα στις πλευρές που είναι παράλληλες με τον τοπικό άξονα 3 (*Number of Confinement Bars in 3-dir*): *4*.
- Αριθμός σκελών συνδετήρα στις πλευρές που είναι παράλληλες με τον τοπικό άξονα 2 (*Number of Confinement Bars in 3-dir*): *4*.

Τέλος, επιλέγεται το *Reinforcements to be Checked*, προκειμένου να γίνει χρήση όλων των δεδομένων στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της διατομής.



Σχήμα 12.12 Ορισμός οπλισμού στη διατομή υποστυλώματος.

Με όμοιο τρόπο ορίζεται ο οπλισμός στη διατομή της δοκού, με βάση τα παρακάτω πεδία, όπως φαίνονται στο Σχήμα 12.13:

- Επικάλυψη (*Concrete Cover to Longitudinal Rebar Centers*): $0.04m$ στην άνω και στην κάτω ίνα.
- Εμβαδόν οπλισμού στη δοκό (*Reinforcement Overrides for Ductile Beams*): Δίνονται τα εμβαδά διαμήκους οπλισμού που ορίστηκαν στα δεδομένα του προβλήματος για την άνω (*Top*) και κάτω ίνα (*Bottom*) της δοκού, στις θέσεις αριστερά (*Left*) και δεξιά (*Right*).

Σχήμα 12.13 Ορισμός οπλισμού στη διατομή δοκού.

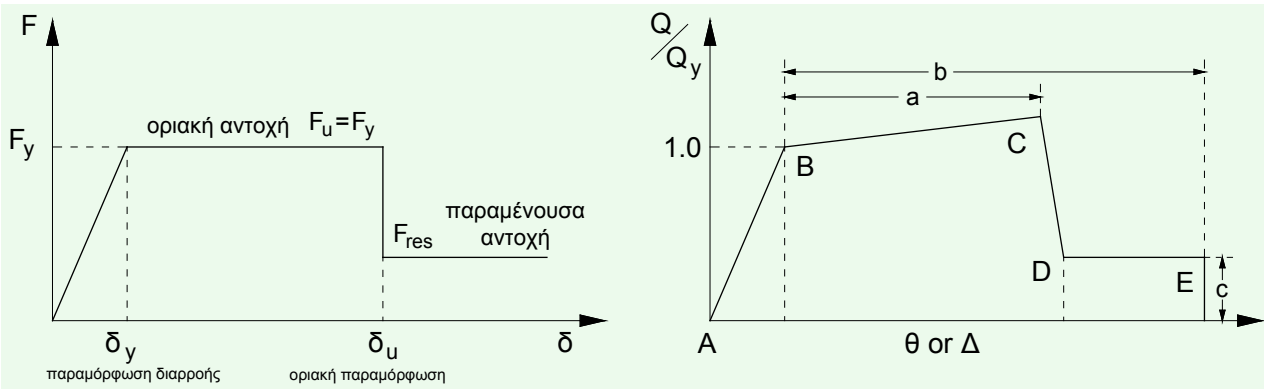
Ανελαστική συμπεριφορά διατομής οπλισμένου σκυροδέματος

Ως αποτέλεσμα της υπολογιστικής διαδικασίας που επεξεργάζεται τα παραπάνω δεδομένα, προκύπτει ο προσδιορισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής, συνήθως με μορφή διαγραμμάτων ροπής-καμπυλότητας ή ροπής-στροφής, Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει είτε αυτόματα από το *SAP 2000* είτε με χρήση κάποιου τρίτου προγράμματος ανάλυσης διατομών. Απλοποιημένα διαγράμματα ανελαστικής συμπεριφοράς αυτής της μορφής δίνονται στον *KAN.EΠΕ. §7.1.2.2*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.14, ενώ η προέλευση των διαγραμμάτων του *SAP 2000* βασίζεται στην *FEMA 356 §6.4.1.2.2 (Figure 6.1)*, ενημερώσεις της οποίας ακολούθησαν προσφάτως (*ASCE 41-06 §6.3.1.2.2, Figure 6-1· ASCE 41-13 §10.3.1.2.2, Figure 10-1*).

Στα διαγράμματα του Σχήματος 12.14, ο κατακόρυφος άξονας αφορά κάποιο μέγεθος έντασης και ο οριζόντιος κάποιο μέγεθος παραμόρφωσης. Για την ανελαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων, τα συγκεκριμένα διαγράμματα αφορούν συνήθως τη σχέση ροπών-στροφών ή ροπών-καμπυλοτήτων, με το πρώτο σημείο αλλαγής κλίσης των διαγραμμάτων να αντιστοιχεί στην τιμή διαρροής (δ_y ή σημείο B αντίστοιχα) και το δεύτερο στην τιμή αστοχίας (δ_u ή σημείο C). Η διαφορά των δυο τιμών ($\delta_u - \delta_y$) ορίζει την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης της διατομής.

Η ύπαρξη κράτυνσης ή μηδενικής κλίσης του δεύτερου κλάδου, όπως και η παραμένουσα αντοχή, αποτελούν παραδοχές των επιμέρους αναλύσεων (ενδεικτικά στον *KAN.EΠΕ. §7.1.2.3* προτείνεται απομένουσα αντοχή ίση με το 25% της οριακής). Επίσης, παρόλη τη μηδενική κράτυνση του δεύτερου κλάδου στο αριστερά μέρος του Σχήματος 12.14, στον *KAN.EΠΕ. §7.1.2.3* σημειώνεται πως ο μετελαστικός κλάδος μπορεί να λαμβάνεται με μικρή θετική κλίση για λόγους αριθμητικής ευστάθειας της ανάλυσης.

Σημειώνεται πως κατά την προετοιμασία των διατομών για προσδιορισμό της ανελαστικής τους συμπεριφοράς, οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων (*modifiers*) εξακολουθούν να υπάρχουν, οδηγώντας σε απομειωμένη δυσκαμψία κατά το ελαστικό μέρος της απόκρισης των δομικών στοιχείων, όπως προβλέπεται και στον *EC8 §4.3.3.4.1(2)*.

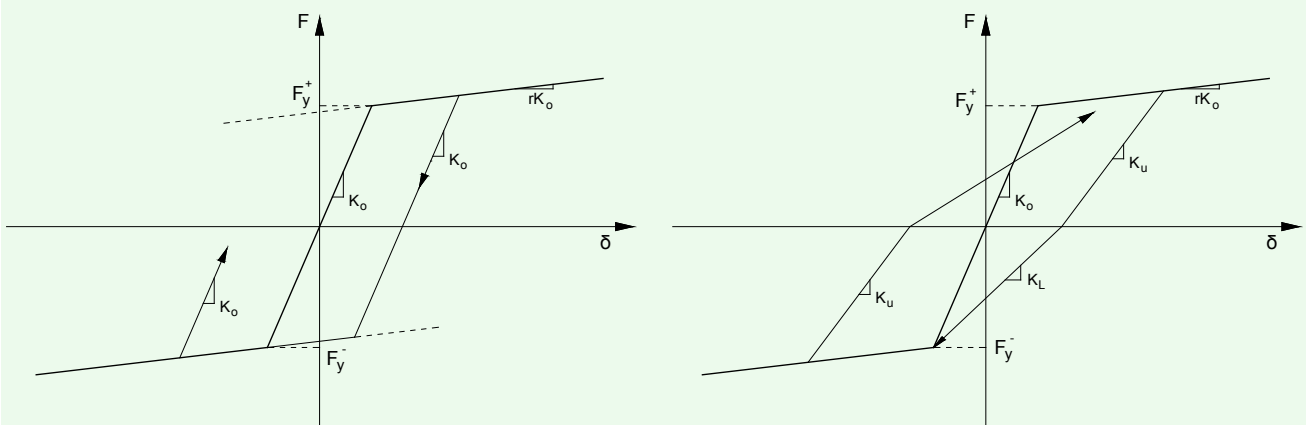


Σχήμα 12.14 Γενική σχέση δύναμης – παραμόρφωσης σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ. (αριστερά) και FEMA 356 – ASCE 41-13 (δεξιά). Ο κατακόρυφος άξονας αφορά μέγεθος έντασης (π.χ. ροπή κάμψης), ενώ ο οριζόντιος αφορά μέγεθος παραμόρφωσης (π.χ. στροφή ή καμπυλότητα).

Ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά διατομής οπλισμένου σκυροδέματος

Καθώς στην πραγματικότητα ο σεισμός είναι μια φόρτιση με μεταβαλλόμενο πρόσημο, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς της διατομής. Ασφαλώς αυτό δεν αφορά άμεσα τη στατική ανελαστική ανάλυση, κατά την οποία ορίζεται μονότονη φόρτιση, αλλά αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη την ανακύκλιση του σεισμικού φορτίου. Ο τρόπος με τον οποίο μορφώνεται το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση εξαρτάται επίσης από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της κάθε διατομής, και προσδιορίζει, μέσω των βρόχων υστέρησης που σχηματίζονται, την ενέργεια η οποία ανελαστικά απορροφάται από τη διατομή με τον σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι νόμοι ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς για διατομές οπλισμένου σκυροδέματος. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 12.15, παρουσιάζεται αριστερά ο ελαστοπλαστικός ή διγραμμικός νόμος υστέρησης, ενώ δεξιά ο –συχνά χρησιμοποιούμενος για διατομές οπλισμένου σκυροδέματος– νόμος υστέρησης *Takeda* (Takeda, Sozen, & Nielsen, 1970). Ο τελευταίος εμφανίζεται στο παρόν στην τροποποιημένη του μορφή, όπως προτάθηκε από τους Otani and Sozen (1972), που λαμβάνει υπόψη την απομείωση της δυσκαμψίας της διατομής σε διαδοχικούς κύκλους φόρτισης. Για τον καθορισμό των διάφορων νόμων υστέρησης, απαιτείται συνήθως ο ορισμός σημαντικού αριθμού παραμέτρων που αφορούν ιδιότητες και χαρακτηριστικά συμπεριφοράς της διατομής οπλισμένου σκυροδέματος. Αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς διατομών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να βρεθεί στους Karros and Penelis (2010).



Σχήμα 12.15 Νόμοι υστερητικής συμπεριφοράς οπλισμένου σκυροδέματος: ελαστοπλαστικός ή διγραμμικός (αριστερά) και τροποποιημένος *Takeda* (δεξιά).

12.4. Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων (hinges)

12.4.1. Αυτόματος ορισμός πλαστικών αρθρώσεων

Ως θέσεις πιθανής ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων ορίζονται οι διατομές στην αρχή και στο τέλος των δομικών στοιχείων, καθώς πρόκειται για τα σημεία του φορέα όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές κατά τη σεισμική φόρτιση. Ο τύπος πλαστικών αρθρώσεων που κατά κανόνα χρησιμοποιείται, αναφέρεται σε καθαρή κάμψη (*M3* στο *SAP 2000*) για τις δοκούς και σε αλληλεπίδραση διαξονικής κάμψης με αξονικό φορτίο (*PMM* στο *SAP 2000*) για τα υποστυλώματα.

Η πλαστική άρθρωση σε μια διατομή ενεργοποιείται μόνο όταν η ροπή από την ανάλυση ξεπεράσει την αντίστοιχη ροπή διαρροής. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο συμπεριφέρεται ελαστικά και οι πλαστικές αρθρώσεις που έχουν τοποθετηθεί δε λαμβάνονται καθόλου υπόψη.

Με βάση τις ιδιότητες των υλικών και την αναλυτική περιγραφή των διατομών που δόθηκαν στα προηγούμενα βήματα, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει τις ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων. Πριν τον υπολογισμό και την ανάθεση των πλαστικών αρθρώσεων, θα πρέπει να οριστεί μια νέα φορτιστική κατάσταση (*Define* → *Load Cases*) στατικού τύπου (*Load Case Type: Static*), η οποία θα εμπεριέχει το συνδυασμό κατακόρυφων φορτίων *G+0.3Q* που είναι ταυτόχρονα με τα σεισμικά (Σχήμα 12.16). Κάποιες από τις τιμές εντατικών μεγεθών που θα προκύψουν από το συγκεκριμένο συνδυασμό, θα χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα για την αυτόματη προσαρμογή των διαγραμμάτων στις πλαστικές αρθρώσεις (π.χ. απαιτείται η τιμή αξονικού για τον καθορισμό της αλληλεπίδρασης *PMM* στα υποστυλώματα).

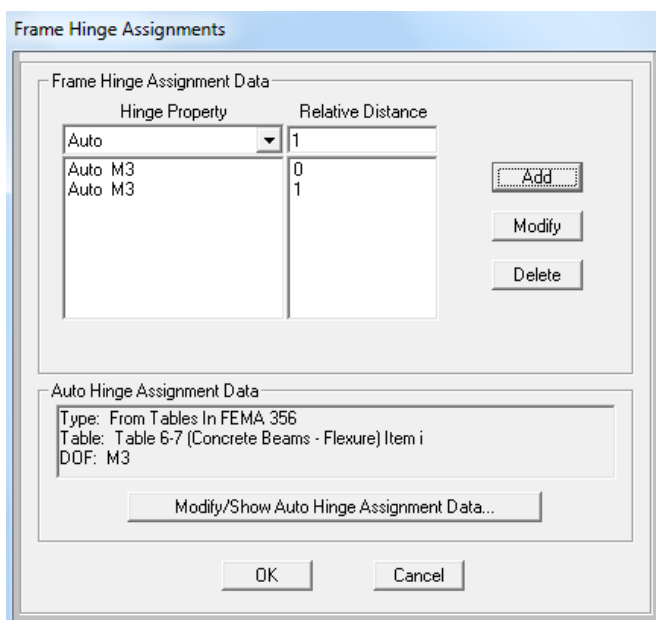
Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	G	1.
Load Pattern	Q	0.3

Σχήμα 12.16 Ορισμός φορτιστικής κατάστασης *G+0.3Q*.

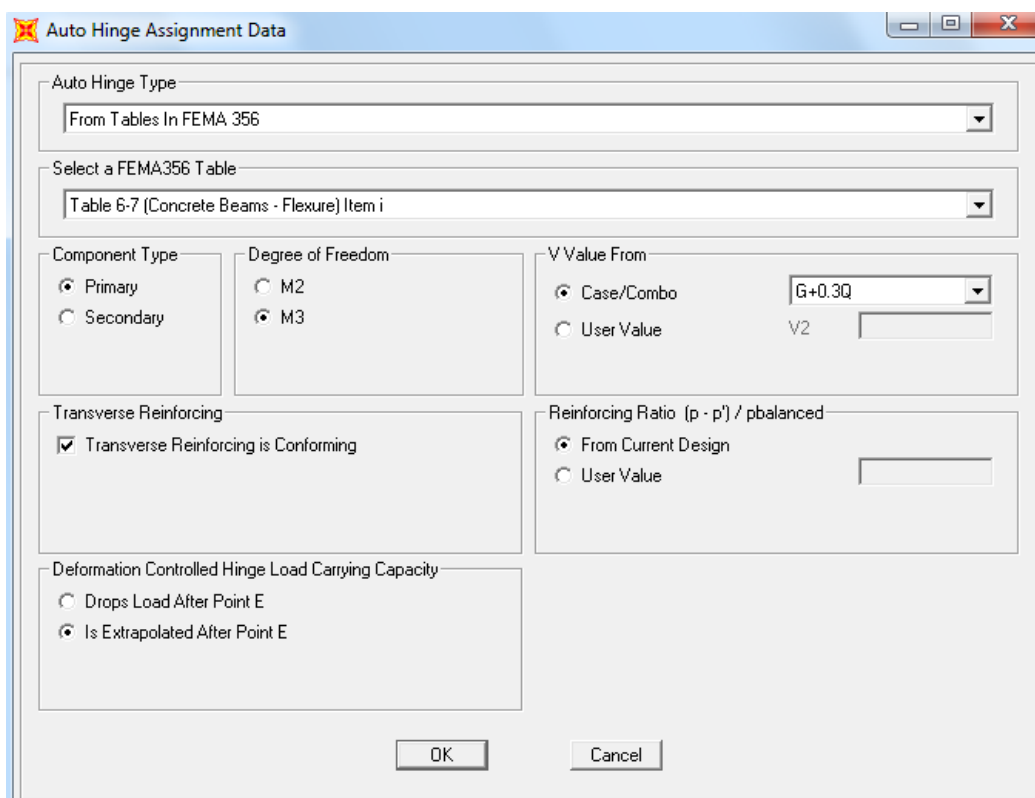
Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των προκαθορισμένων (*default*) ιδιοτήτων των πλαστικών αρθρώσεων στα κατάλληλα σημεία των δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω:

Πρώτα επιλέγεται η δοκός, και από το *Assign* → *Frame* → *Hinges* χρησιμοποιείται το *Add*, αρχικά με τιμή *Relative Distance=0* για το αριστερά άκρο της δοκού (Σχήμα 12.17, το οποίο εμφανίζεται στην τελική του μορφή μετά και από τις εντολές που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια της παραγράφου). Στο παράθυρο που προκύπτει, επιλέγεται τύπος πλαστικής άρθρωσης που αντιστοιχεί σε δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη (*Concrete Beams – Flexure*) και ορίζεται καταπόνηση σε κάμψη *M3*, ενώ ζητείται η τιμή της τέμνουσας να ληφθεί από το συνδυασμό *G+0.3Q* (Σχήμα 12.17). Η επιλογή *Transverse Reinforcing is*

Conforming είναι η κατάλληλη όταν υπάρχει επαρκής οπλισμός διάτμησης (συνδετήρες) στο δομικό στοιχείο. Επιλέγεται επίσης το **Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity Is Extrapolated After Point E**, για να αποφευχθούν αστάθειες κατά την ανάλυση (αφορά τη συμπεριφορά της διατομής μετά το σημείο E, όπως φαίνεται στο διάγραμμα στο δεξί μέρος του Σχήματος 12.14). Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία για τη σχετική θέση 0 (**Relative Distance=0** στο αριστερά άκρο της δοκού), ακολουθεί με νέο **Add** αντίστοιχος ορισμός ιδιοτήτων πλαστικής άρθρωσης για τη σχετική θέση 1 (**Relative Distance=1** στο δεξί άκρο δοκού).

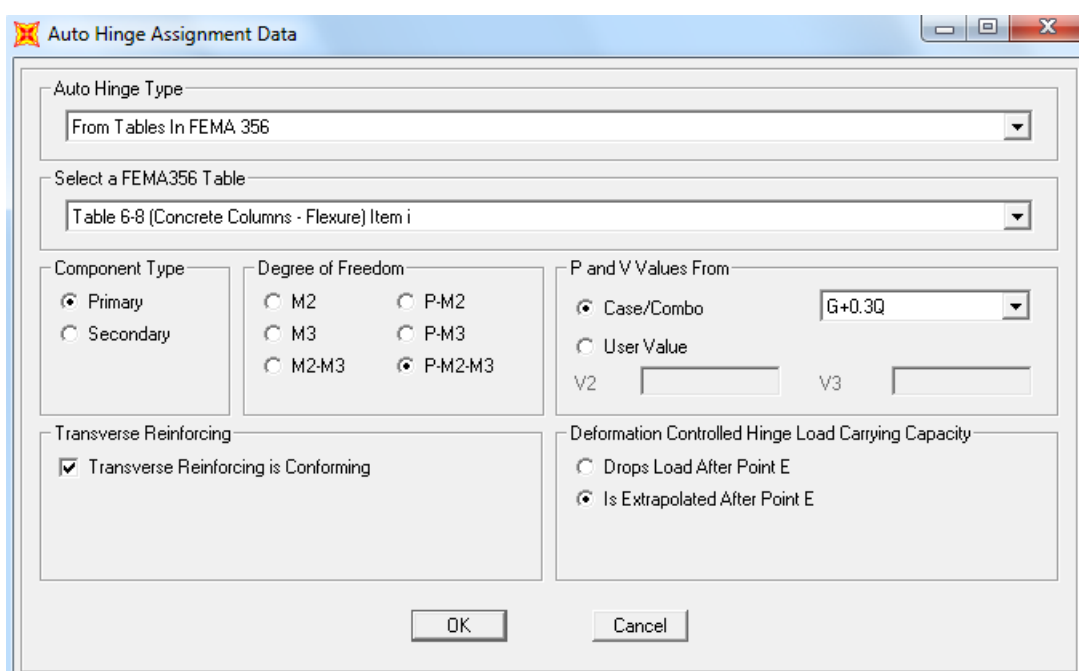


Σχήμα 12.17 Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων στην αρχή και το τέλος της δοκού.



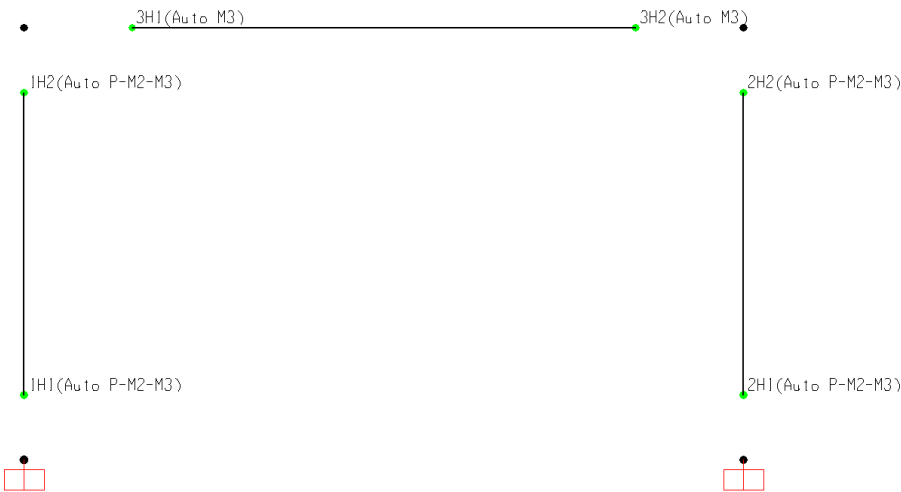
Σχήμα 12.18 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικής άρθρωσης στη δοκό.

Με αντίστοιχο τρόπο ορίζονται οι ιδιότητες για τα υποστυλώματα. Μπορεί να γίνει ταυτόχρονη επιλογή των δυο υποστυλωμάτων, οπότε με την εντολή *Assign* → *Frame* → *Hinges* και *Add* (*Relative Distance=0* για τη βάση των στύλων) επιλέγεται τύπος πλαστικής άρθρωσης που αντιστοιχεί σε στύλο οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη (*Concrete Columns - Flexure*), ενώ ζητείται οι τιμές αξονικού και τέμνουσας (*P and V values*) να ληφθούν από το συνδυασμό *G+0.3Q* (Σχήμα 12.19) σύμφωνα και με τις επιταγές του Κανονισμού (*EC8 §4.3.3.4.1(6)*). Για ανάλυση επίπεδου πλαισίου αρκεί η χρήση πλαστικής άρθρωσης τύπου *P-M3* (πλαίσιο σε επίπεδο *xz*). Στη γενικότερη περίπτωση απαιτείται η χρήση του τύπου *P-M2-M3*, καθώς τα υποστυλώματα υφίστανται διαξονική κάμψη. Η επιλογή του τύπου *P-M2-M3* στο παρόν, γίνεται περισσότερο για να παρουσιαστούν οι ιδιότητες του πιο σύνθετου τύπου πλαστικής άρθρωσης. Η επιλογή *Transverse Reinforcing is Conforming* αφορά την περίπτωση ύπαρξης επαρκούς οπλισμός διάτμησης (συνδετήρες) στο δομικό στοιχείο. Επιλέγεται επίσης το *Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity Is Extrapolated After Point E*, για να αποφευχθούν αστάθειες κατά την ανάλυση, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Αφού τελειώσει η διαδικασία για τη σχετική θέση 0 (*Relative Distance=0* στη βάση των στύλων), ακολουθεί με νέο *Add* αντίστοιχος ορισμός ιδιοτήτων πλαστικής άρθρωσης για τη σχετική θέση 1 (*Relative Distance=1* στην κορυφή των στύλων).

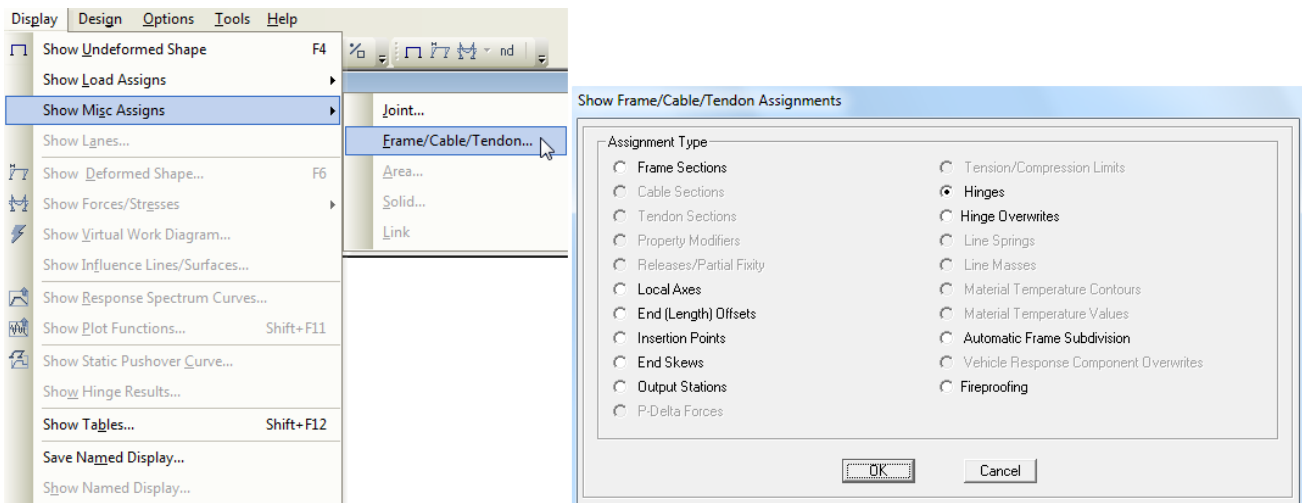


Σχήμα 12.19 Ορισμός ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα.

Ο τρόπος εμφάνισης των πλαστικών αρθρώσεων στον φορέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.20. Παρατηρείται πως η αυτόματη αρίθμηση από το πρόγραμμα της κάθε παραγόμενης πλαστικής άρθρωσης περιλαμβάνει τρεις χαρακτήρες (Σχήμα 12.20). Ο πρώτος αφορά την ονομασία (*Label*) του γραμμικού δομικού στοιχείου, ο δεύτερος το γράμμα *H* (*Hinge*) και ο τρίτος λαμβάνει τιμή *1* ή *2* για την αρχή και το πέρας του κάθε στοιχείου αντίστοιχα. Σημειώνεται πως η εικόνα του φορέα μπορεί να επανέλθει στην αρχική της μορφή, αν επιλεγεί απαραμόρφωτος φορέας (*Display* → *Show Undeformed Shape*). Η επανεμφάνιση της θέσης και της ονομασίας των πλαστικών αρθρώσεων μπορεί να γίνει εκ νέου από την επιλογή *Display* → *Show Misc Assigns* → *Frame/Cable/Tendon* και στη συνέχεια *Hinges* (Σχήμα 12.21).



Σχήμα 12.20 Εικόνα του φορέα μετά την εισαγωγή των πλαστικών αρθρώσεων.

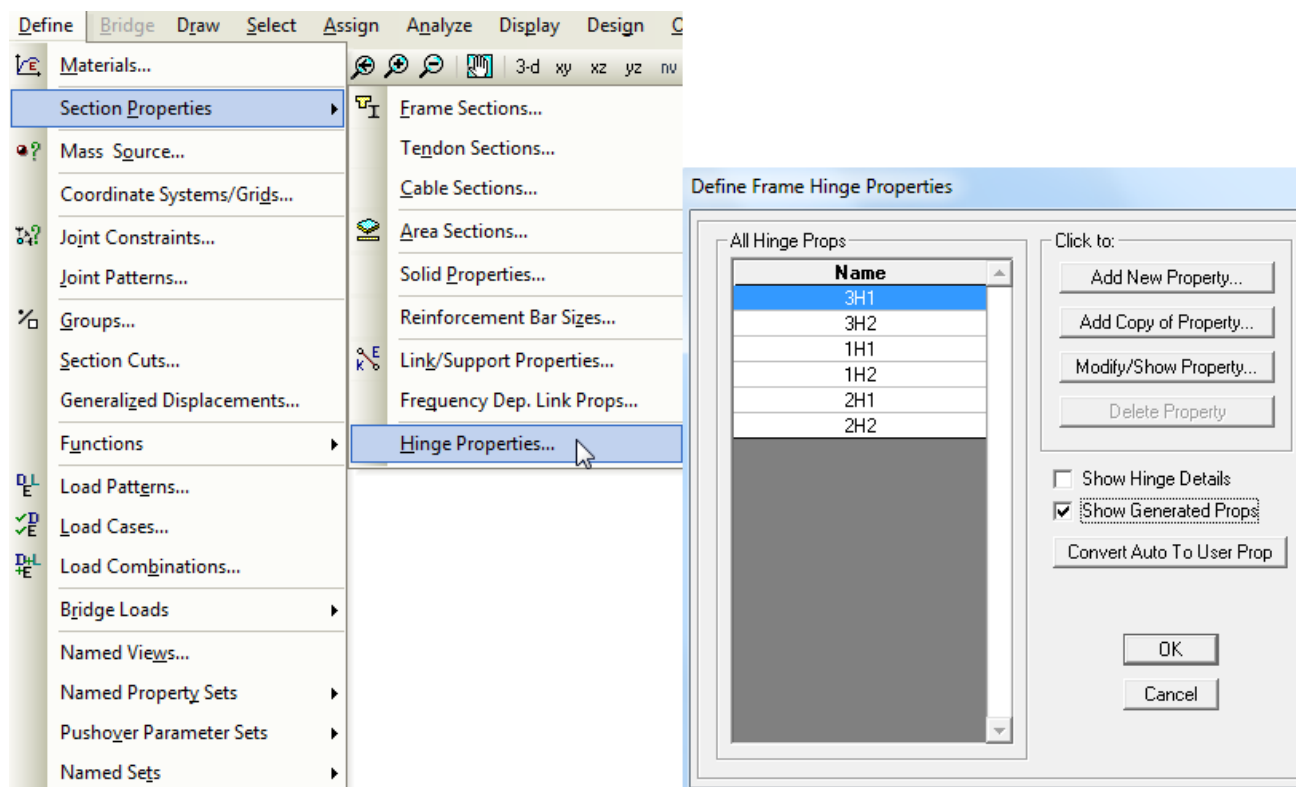


Σχήμα 12.21 Επανεμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων στην όψη του φορέα (απόκρυψη γίνεται με επιλογή εμφάνισης απαραμόρφωτου φορέα).

12.4.2. Επισκόπηση ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων

Μετά τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων, είναι δυνατή η αναλυτική εμφάνιση και ο καθορισμός των ιδιοτήτων τους μέσω της εντολής *Define* → *Section Properties* → *Hinge Properties*, εφόσον πρώτα επιλεγεί το *Show Generated Props* (Σχήμα 12.22). Για την τροποποίηση κάποιων από τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς της πλαστικής άρθρωσης, θα πρέπει να έχει επίσης επιλεγεί το *Convert Auto to User Prop* (μετατροπή αυτόματων σε χειροκίνητες ιδιότητες).

Αν στη συνέχεια επιλεγεί το *Modify/Show Property* για μια από τις πλαστικές αρθρώσεις που αντιστοιχούν σε δοκό (ενδεικτικά την 3H1), εμφανίζεται το είδος της άρθρωσης και στη συνέχεια οι λεπτομέρειες και τα χαρακτηριστικά της (Σχήμα 12.23). Σημειώνεται πως η συσχέτιση των τιμών της ροπής (*Moment*) μπορεί να γίνει είτε με τιμές στροφής (*Rotation* θ), όπως στο συγκεκριμένο παράδειγμα, είτε με τιμές καμπυλότητας (*Curvature* k). Στις παραμέτρους που εμφανίζονται, επιλέγεται η επέκταση της παραμένουσας αντοχής στην πλαστική άρθρωση μετά το σημείο E του Σχήματος 12.14, από το πεδίο *Load Carrying Capacity Beyond Point E: Is Extrapolated*, προκειμένου να αποφευχθούν θέματα ευστάθειας κατά την ανάλυση (εφόσον βεβαίως η συγκεκριμένη επιλογή είναι συμβατή με τον επιθυμητό τρόπο ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής). Ο ορισμός της συγκεκριμένης επιλογής γίνεται με τον ίδιο τρόπο και στην πλαστική άρθρωση που βρίσκεται στο άλλο άκρο της δοκού (3H2).



Σχήμα 12.22 Διαδικασία εμφάνισης αναλυτικών ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων.

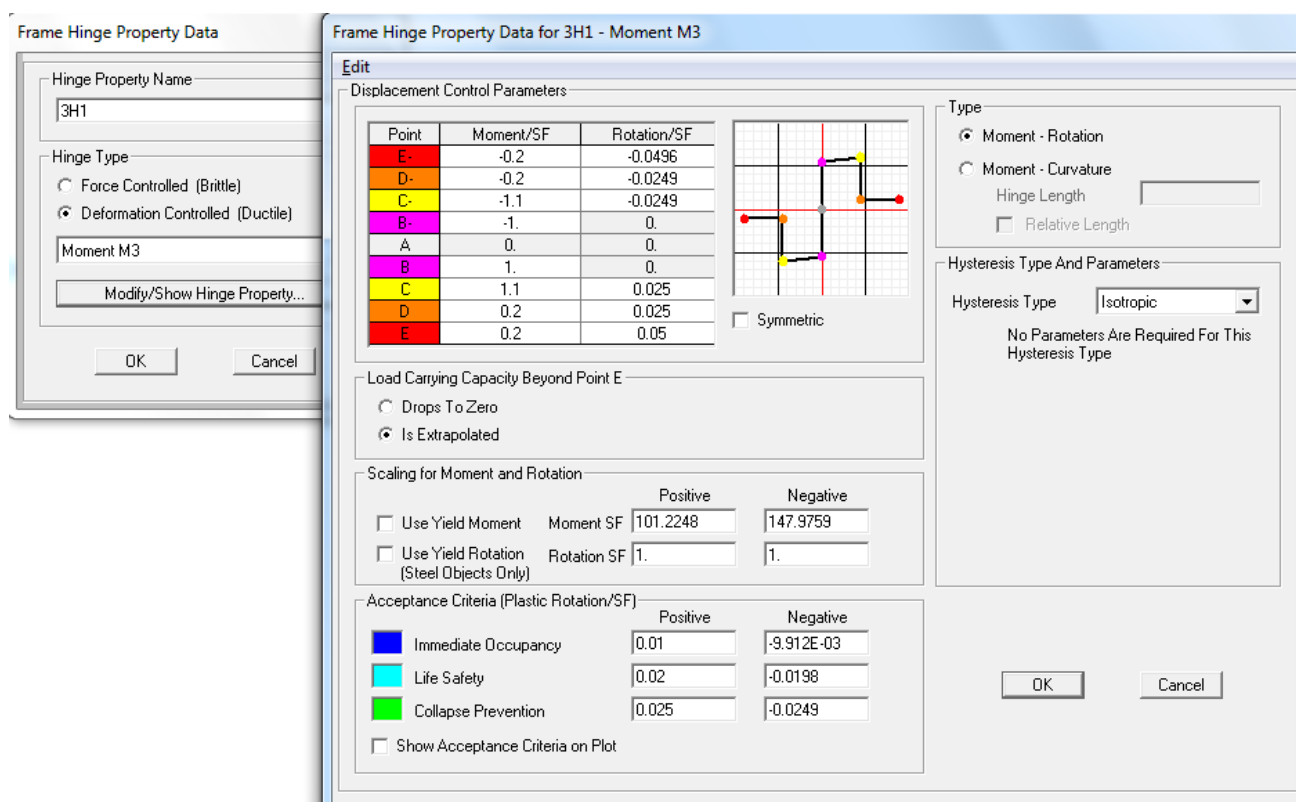
Στην περίπτωση που επιλεγεί η χρήση συσχέτισης των ροπών με καμπυλότητες, θα πρέπει να οριστεί το μήκος της πλαστικής άρθρωσης (*Hinge Length*). Ο υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης μπορεί να γίνει ενδεικτικά με την ακόλουθη σχέση (Priestley, Seible, & Calvi, 1996):

$$L_p = 0.08 \cdot L_o + 0.022 \cdot f_{ye} \cdot d_{bl} \geq 0.044 \cdot f_{ye} \cdot d_{bl} \quad (f_{ye} \text{ σε MPa}) \quad (12.1)$$

Στην παραπάνω σχέση, L_o είναι το μήκος του δομικού στοιχείου από το άκρο του έως το σημείο μηδενισμού της ροπής (λαμβάνεται συνήθως ίσο με το μισό μήκος του στοιχείου), f_{ye} η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα οπλισμού και d_{bl} η διάμετρος των ράβδων του διαμήκους οπλισμού. Η συσχέτιση μεταξύ στροφής και καμπυλότητας δίνεται ως $\kappa = \theta / L_p$.

Όπως προαναφέρθηκε, με την επιλογή του *Convert Auto to User Prop* (Σχήμα 12.22) είναι δυνατή η αλλαγή κάποιων από τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Σχήμα 12.23, όπως π.χ. η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει κάποια διατομή αλλά και οι αντίστοιχες στροφές/καμπυλότητες. Έτσι, για την πλαστική άρθρωση *3H1* στη δοκό (βλ. τίτλο παραθύρου στο Σχήμα 12.23), είναι δυνατό γίνει η παραπάνω τροποποίηση στις τιμές της ροπής διαρροής και των στροφών/καμπυλοτήτων με δυο τρόπους:

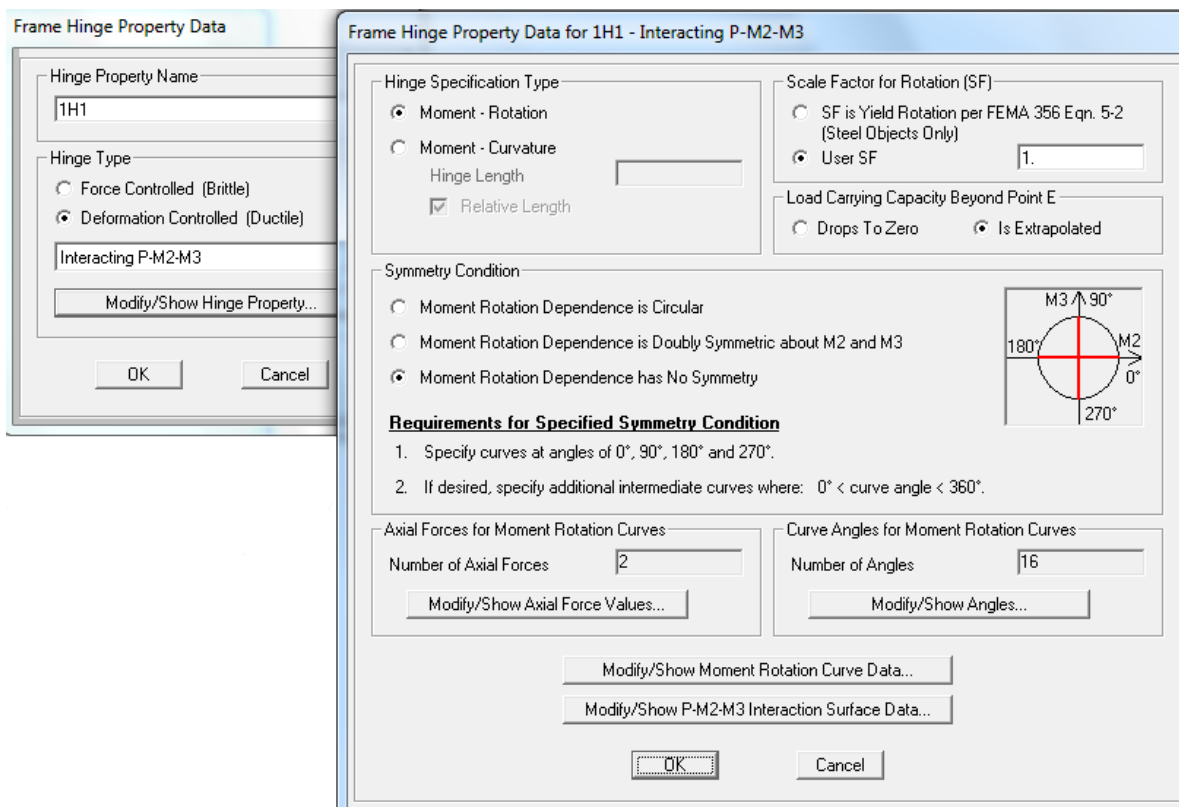
- Μέσω του *Scaling for Moment and Rotation/Curvature*, όπου μπορούν να αλλάξουν οι τιμές της ροπής διαρροής *Moment SF* (+101.2248 kNm και -147.9759 kNm), όπως και οι συντελεστές των στροφών/καμπυλοτήτων από 1 σε κάποιες άλλες επιθυμητές τιμές. Οι τιμές που δίνονται στα συγκεκριμένα πεδία πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές του πίνακα *Displacement Control Parameters*, προκειμένου να οριστούν τα διάφορα σημεία του διαγράμματος
- Με απευθείας αλλαγή των τιμών του πίνακα *Displacement Control Parameters*, οπότε ορίζονται άμεσα τα διάφορα σημεία του διαγράμματος (τιμές ροπής και στροφής ή καμπυλότητας), προσέχοντας όμως στην περίπτωση αυτή να οριστεί μονάδα (1) για τις τιμές ροπής και στροφής/καμπυλότητας στο *Scaling for Moment and Rotation/Curvature*.



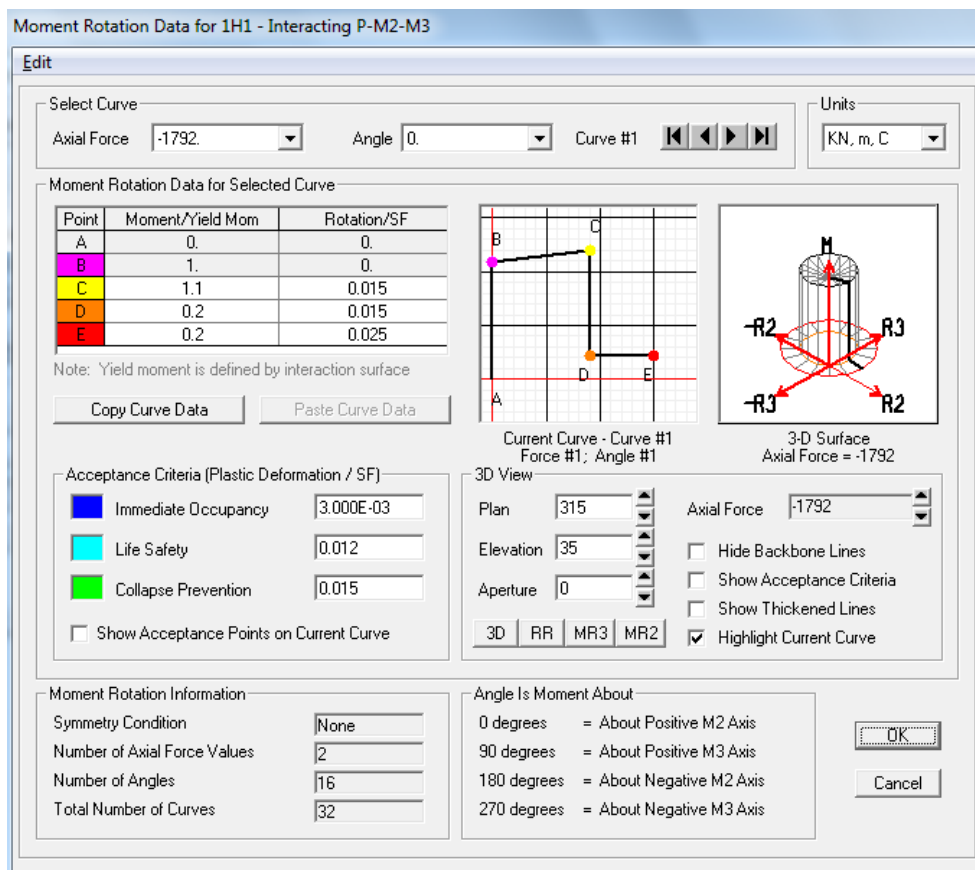
Σχήμα 12.23 Εμφάνιση ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε δοκό.

Αντίστοιχα για τα υποστυλώματα, η επιλογή μιας πλαστικής άρθρωσης (π.χ. της **1H1**) έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του παραθύρου του Σχήματος 12.24. Εδώ, εφόσον έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή **Convert Auto to User Prop**, μπορεί να γίνει η επιλογή της συσχέτισης των ροπών με στροφές ή με καμπυλότητες (στο **Hinge Specification Type**), κάτι που θα επηρεάσει τις τιμές που θα δοθούν στα επόμενα παράθυρα που θα εμφανιστούν. Επιλέγεται και εδώ, όπως και στις δοκούς, η επέκταση της παραμένουσας αντοχής στην πλαστική άρθρωση μετά το σημείο E του Σχήματος 12.14, από το πεδίο **Load Carrying Capacity Beyond Point E: Is Extrapolated**. Υπενθυμίζεται πως η συγκεκριμένη επιλογή αφορά την αποφυγή προβλημάτων ευστάθειας κατά την ανάλυση (εφόσον βεβαίως είναι συμβατή με τον επιθυμητό τρόπο ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής).

Από το **Modify/Show Moment Rotation/Curvature Curve Data..** εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 12.25, όπου μπορούν να τροποποιηθούν οι τιμές της στροφής (ή καμπυλότητας) για κάθε σημείο του πίνακα **Moment Rotation/Curvature Data for Selected Curve**. Παράλληλα, μπορούν να μεταβληθούν και οι τιμές της ροπής στα διάφορα σημεία του διαγράμματος, τροποποιώντας τις τιμές των συντελεστών που εμφανίζονται στη στήλη **Moment/Yield Mom** (λόγος αναπτυσσόμενης ροπής προς ροπή διαρροής). Στην περίπτωση αυτή, όμως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι καθένας από τους εμφανιζόμενους συντελεστές αναφέρεται σε μια τιμή ροπής διαρροής που εμφανίζεται σε επόμενο παράθυρο, όπως θα φανεί στη συνέχεια.



Σχήμα 12.24 Διαδικασία εμφάνισης ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε υποστύλωμα (αρχικό παράθυρο ορισμού συσχέτισης ροπής με στροφές ή καμπυλότητες).



Σχήμα 12.25 Εμφάνιση ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε υποστύλωμα (Moment Rotation/Curvature Curve Data).

Επιστρέφοντας στο Σχήμα 12.24, επιλέγεται το *Modify/Show P-M2-M3 Interaction Surface Data* και στη συνέχεια *Define/Show User Interaction Surface*, οπότε εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 12.26. Στο παράθυρο αυτό καθορίζονται οι παράμετροι της αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικού για την πλαστική άρθρωση του υποστυλώματος.

Η τιμή του αξονικού φορτίου $P=5259.4576\text{kN}$ που εμφανίζεται (πεδίο *Scale Factors*), αντιστοιχεί σε δυνατότητα παραλαβής θλιπτικού φορτίου από τον στύλο όταν η ροπή κάμψης είναι μηδενική γύρω και από τους δυο άξονες. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τους πολλαπλασιαστές στην πρώτη γραμμή (*Point 1*) του πίνακα *Interaction Curve Data*. Αντίστοιχα, οι τιμές των ροπών σε κάθε μια από τις διευθύνσεις *M2* και *M3* (315.3668kNm και στις δυο περιπτώσεις λόγω τετραγωνικού υποστυλώματος με συμμετρική όπλιση) αναφέρονται στη ροπή διαρροής του υποστυλώματος, όταν η τιμή του αξονικού φορτίου είναι ίση με $-0.252P$ (μέγιστη δυνατότητα παραλαβής ροπής από τη διατομή λόγω αλληλεπίδρασης *P-M*) και ταυτόχρονα η ροπή στην άλλη διεύθυνση είναι πρακτικά ίση με μηδέν.

Σημειώνεται πως το πρόγραμμα παράγει 16 καμπύλες, προκειμένου να περιγράψει στον χώρο την αλληλεπίδραση μεταξύ του θλιπτικού φορτίου *P* και των ροπών *M2* και *M3*. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να μειωθούν σε τρεις, εφόσον υπάρχει διπλή συμμετρία στον στύλο και την όπλισή του (οπότε επιλέγεται το *Doubly Symmetric about M2 and M3*), ή και σε μια εφόσον πρόκειται για κυκλική διατομή. Η ενεργοποίηση των παραπάνω επιλογών είναι δυνατή αφού πρώτα γίνει επιλογή του *Convert Auto to User Prop* για τη συγκεκριμένη διατομή (Σχήμα 12.22).

Interaction Curve Data

Point	P	M2	M3
1	-1.	0.	0.
2	-0.7997	0.4461	0.
3	-0.6878	0.6699	0.
4	-0.5677	0.818	1.174E-06
5	-0.4278	0.924	1.284E-06
6	-0.252	1.	1.464E-06
7	-0.1569	0.9305	1.404E-06
8	-0.0547	0.8015	1.337E-06
9	0.0598	0.5932	1.203E-06
10	0.2041	0.2426	1.704E-06
11	0.2898	0.	0.

Interaction Surface Requirements - No Symmetry

1. A minimum of 8 P-M2-M3 curves are specified.
2. P (tension positive) increases monotonically.
3. Each curve must be convex and the interaction surface as a whole must be convex (no dimples in surface).

Σχήμα 12.26 Εμφάνιση ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε υποστυλώμα (δεδομένα καμπυλών αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικού).

Το παράθυρο του Σχήματος 12.26 δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης των τιμών για τις ροπές διαρροής στη συγκεκριμένη διατομή του υποστυλώματος, οι οποίες εδώ λαμβάνουν τιμή 315.3668kNm . Μέσω του τρόπου αυτού, είναι εμμέσως δυνατός ο προσδιορισμός διαφορετικής ροπής διαρροής για το υποστυλώμα σε βάση και κορυφή. Κατά την έξοδο με *OK* εμφανίζεται προειδοποίηση για τη μορφή της επιφάνειας αλληλεπίδρασης (*PMM interaction surface is not convex*), οπότε και μπορεί να επιλεγεί η αυτόματη

ομαλοποίησή της από το πρόγραμμα. Τόσο η τελευταία ενέργεια όσο και η επιλογή *Load Carrying Capacity Beyond Point E: Is Extrapolated* στο Σχήμα 12.24, θα πρέπει να επαναληφθούν για όλες τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν οριστεί στις διατομές των υποστυλωμάτων (1H1, 1H2, 2H1, 2H2).

Στην περίπτωση που εξετάζεται επίπεδο πρόβλημα, θα ήταν δυνατό εξαρχής, από τα κατάλληλα πεδία του Σχήματος 12.19, να επιλεγεί για τον στύλο το *P-M3* που σχετίζεται με την αλληλεπίδραση στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης εντός του επιπέδου *xz*. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο ενδιαφέρει μόνο μια καμπύλη αλληλεπίδρασης, της ροπής *M3*, καθώς η τιμή της *M2* θα είναι μηδενική.

Ιδιότητες πλαστικών αρθρώσεων (hinges)

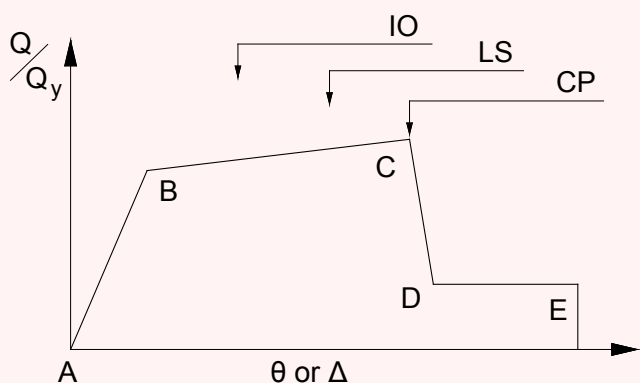
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 12.23 και 12.25, η στροφή για το πρώτο τμήμα *A-B* λαμβάνεται ίση με μηδέν (σημεία *B*, *B*). Αυτό συμβαίνει επειδή οι πλαστικές αρθρώσεις θα ενεργοποιηθούν όταν η αναπτυσσόμενη ροπή ξεπεράσει τη ροπή διαρροής. Το ελαστικό μέρος της απόκρισης λαμβάνεται υπόψη από την (ελαστική/αρχική) δυσκαμψία του δομικού στοιχείου στο οποίο ανατίθεται η πλαστική άρθρωση. Σημειώνεται πως οι προεπιλεγμένες τιμές πλαστικής στροφής δοκού και υποστυλώματος που έχουν τεθεί στα συγκεκριμένα πεδία (πίνακες τιμών), προέρχονται από τις κανονιστικές συστάσεις της *FEMA 356 (Tables 6.7-6.8)*. Σχετικές διαδικασίες προσδιορισμού διαθέσιμης πλαστικής στροφής μπορούν να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και σε κανονιστικά κείμενα (π.χ. *EC8-3 §A3.1· ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7, Παράρτημα Β· ASCE/SEI 41-13, Tables 10-7 and 10-8*).

Τα πεδία με τις τιμές πλαστικής στροφής/καμπυλότητας, τα οποία φαίνονται κάτω από τον γενικό τίτλο *Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)* (Σχήματα 12.23 και 12.25), αναφέρονται σε συγκεκριμένα επίπεδα αναμενόμενων βλαβών για τον φορέα. Στα κανονιστικά κείμενα ορίζονται τρεις στάθμες επιτελεστικότητας, σύμφωνα με τα παρακάτω:

- άμεση χρήση μετά το σεισμό (*IO – Immediate Occupancy*),
- προστασία ανθρώπινης ζωής (*LS – Life Safety*),
- αποφυγή κατάρρευσης (*CP – Collapse Prevention*).

Οι προεπιλεγμένες τιμές πλαστικών στροφών για κάθε τύπο δομικού στοιχείου στο *SAP 2000*, όσον αφορά τα παραπάνω επίπεδα επιτελεστικότητας, προτείνονται από τη *FEMA 356 (Tables 6.7-6.8)*. Θα πρέπει να σημειωθεί, ειδικά για τα υποστυλώματα, πως στις προτεινόμενες τιμές υπάρχουν πρόσφατες τροποποιήσεις των κανονιστικών διατάξεων (*ASCE/SEI 41-13*).

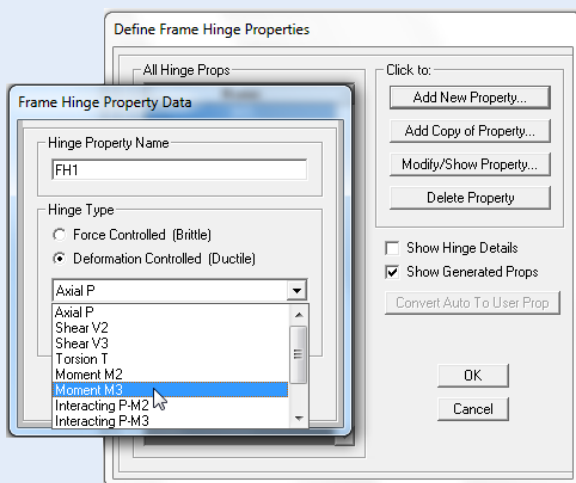
Κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων της ανελαστικής ανάλυσης, η τιμή της αναπτυσσόμενης πλαστικής στροφής, για το εξεταζόμενο κάθε στιγμή επίπεδο φόρτισης, μπορεί να αποδώσει παραστατικά (με αντίστοιχο χρωματισμό) το βαθμό πλαστικοποίησης των πλαστικών αρθρώσεων στον φορέα. Αυτό επιτυγχάνεται σε συσχέτιση με τις τιμές *IO*, *LS* και *CP*, αλλά και τη θέση της πλαστικής άρθρωσης στο διάγραμμα του Σχήματος 12.27.



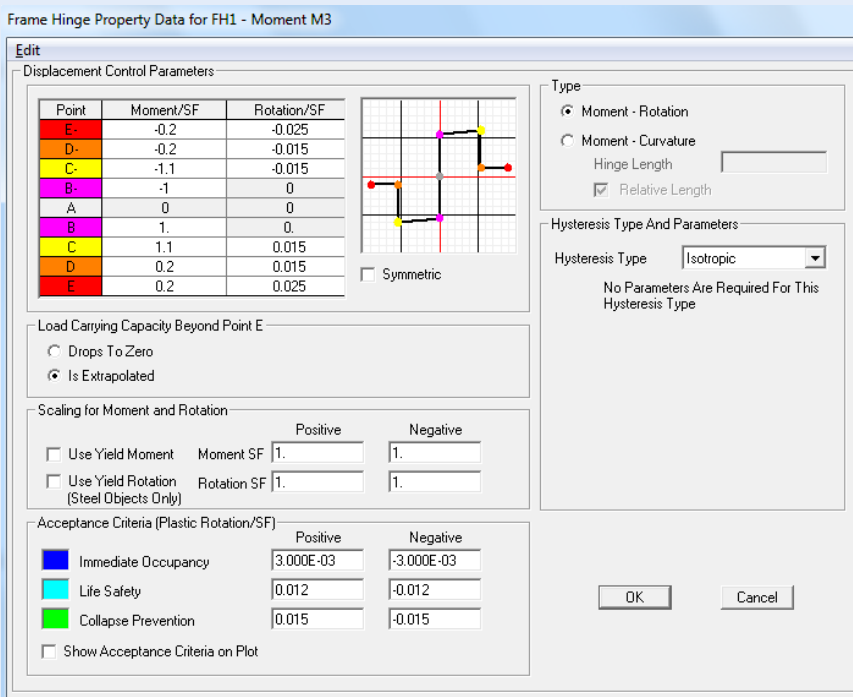
Σχήμα 12.27 Σχέση δύναμης-παραμόρφωσης και στάθμες επιτελεστικότητας.

Μη αυτόματος ορισμός πλαστικών αρθρώσεων

Ο ορισμός των πλαστικών αρθρώσεων θα μπορούσε να μην γίνει εξαρχής με αυτόματο τρόπο, αλλά να διαμορφωθεί αναλυτικά με χρήση της εντολής *Define* → *Section Properties* → *Hinge Properties*, προσθήκη νέας ιδιότητας με *Add New Property* και επιλογή κατάλληλου τύπου άρθρωσης (Σχήμα 12.28, ενδεικτικά επιλογή τύπου *M3* για δοκό κτλ). Στο Σχήμα 12.29 που εμφανίζεται, δίνεται η δυνατότητα, εφόσον αποεπιλεγεί το *Symmetric*, να οριστεί διαφορετική συμπεριφορά σε θετική και αρνητική τιμή ροπής (διαφορετικός σπλισμός άνω και κάτω). Στα πεδία *Scaling for Moment and Rotation* μπορούν να δοθούν οι επιθυμητές τιμές για τη ροπή διαρροής και την αντίστοιχη πλαστική στροφή, οι οποίες θα πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές του πίνακα. Εναλλακτικά, μπορούν να δοθούν απευθείας τιμές ροπής και πλαστικής στροφής στον πίνακα για τις διάφορες θέσεις του διαγράμματος, ορίζοντας αναλυτικά τη συμπεριφορά της διατομής και το επιθυμητό επίπεδο κράτυνσης (σημεία *C*, *C-*). Είναι εμφανές σε κάθε μια από τις παραπάνω διαδικασίες, πως το διάγραμμα *M-θ* ορίζεται με βάση τη γενική μορφή του Σχήματος 12.14.



Σχήμα 12.28 Μη-αυτόματος ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 12.29 Εμφάνιση μη-αυτόματων ιδιοτήτων πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχείο δοκού.

12.5. Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης στο SAP 2000

Ο ορισμός της στατικής ανελαστικής ανάλυσης γίνεται από το *Define* → *Load Cases* → *Add New Load Case*, όπου επιλέγεται *Load Case Type: Static* και *Analysis Type: Nonlinear*. Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, θα απαιτηθεί ο ορισμός δυο τύπων ανελαστικής στατικής ανάλυσης:

- στατική ανελαστική ανάλυση για την επιβολή των κατακόρυφων δράσεων (θα ονομαστεί *PUSHGRAV*),
- στατική ανελαστική ανάλυση για την επιβολή του οριζόντιου σεισμικού φορτίου (θα ονομαστεί *PUSHOVER*).

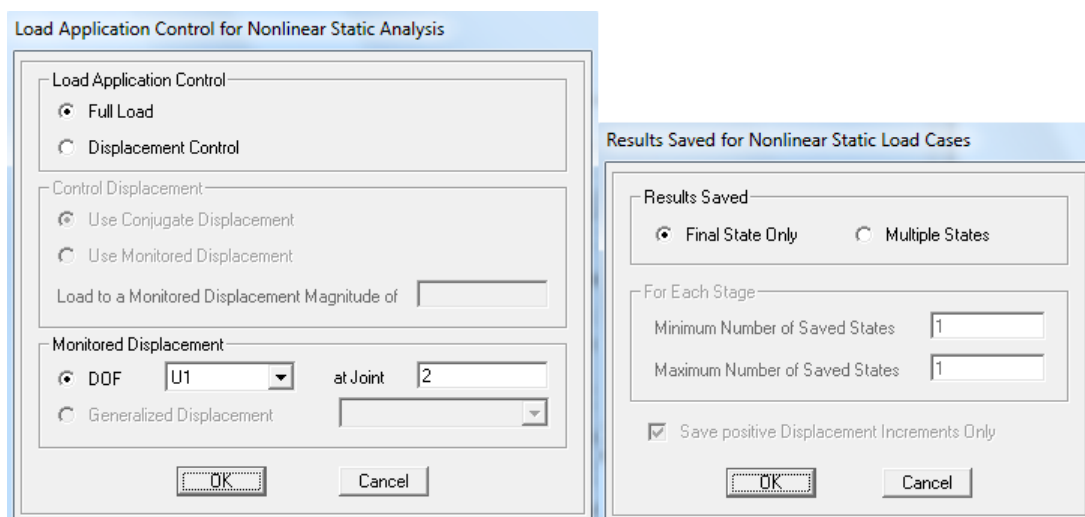
12.5.1. Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης για την επιβολή των κατακόρυφων δράσεων

Όπως είναι γνωστό, η σεισμική δράση δεν εφαρμόζεται σε έναν αφόρτιστο φορέα, αλλά σε έναν φορέα στον οποίο ενεργούν ήδη κάποια κατακόρυφα φορτία. Θα πρέπει συνεπώς, κατά την επιβολή της σεισμικής δράσης και την εκτέλεση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, να δρουν στον φορέα τα υφιστάμενα κατακόρυφα φορτία (*EC8 §4.3.3.4.1(5)P*). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον ορισμό μιας πρώτης ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Σχήμα 12.30), η οποία θα αφορά αποκλειστικά τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στον φορέα κατά τη διάρκεια του σεισμού (με βάση τον Κανονισμό *G+0.3Q*). Στη συνέχεια, η ανελαστική ανάλυση με τα οριζόντια φορτία θα ξεκινήσει από το πέρας της προηγούμενης που αφορά τα κατακόρυφα φορτία, ώστε να συνυπολογιστούν και αυτά στην τελική απόκριση.

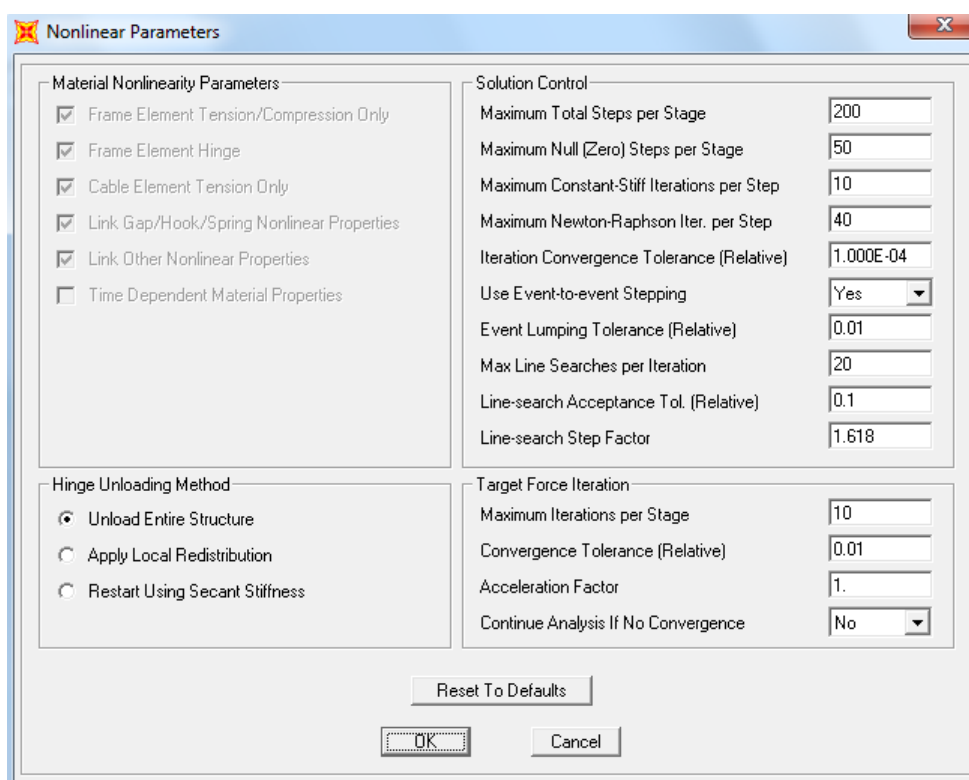
Καθώς η στατική ανελαστική ανάλυση με τα κατακόρυφα φορτία αφορά την πλήρη εφαρμογή των συγκεκριμένων δράσεων, επιλέγονται οι κατάλληλες παράμετροι ανάλυσης στα πεδία *Other Parameters* (Σχήμα 12.30). Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.31, επιλέγεται το *Full Load* στην επιλογή *Load Application* (πλήρης εφαρμογή φορτίου), ενώ παράλληλα ζητείται η αποθήκευση των αποτελεσμάτων μόνο τη χρονική στιγμή που έχει ολοκληρωθεί η πλήρης επιβολή των κατακόρυφων δράσεων στον φορέα (*Results Saved: Final State Only*). Τέλος, οι παράμετροι που σχετίζονται με τη μη-γραμμική διαδικασία (*Nonlinear parameters*) παραμένουν για τη συγκεκριμένη ανάλυση στις προεπιλεγμένες (*Default*) τιμές τους (Σχήμα 12.32).

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	Q	0.3
Load Pattern	G	1
Load Pattern	Q	0.3

Σχήμα 12.30 Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover ή Nonlinear Static Analysis) για τα κατακόρυφα φορτία.



Σχήμα 12.31 Παράμετροι ανελαστικής στατικής ανάλυσης για τα κατακόρυφα φορτία (Load Application και Results Saved).



Σχήμα 12.32 Παράμετροι ανελαστικής στατικής ανάλυσης για τα κατακόρυφα φορτία (Nonlinear Parameters).

12.5.2. Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης για την επιβολή του οριζόντιου σεισμικού φορτίου

Για την επιβολή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης που αφορά τις σεισμικές δράσεις, θα πρέπει προηγουμένως να οριστεί ένα στατικά επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο και η θέση επιβολής του στον φορέα. Κατά συνέπεια, προστίθεται στις μορφές φόρτισης (*Define* → *Load Patterns*) το φορτίο *PUSHLOAD*, βάσει του οποίου θα γίνει η *pushover* ανάλυση. Στη συνέχεια ανατίθεται, στη συγκεκριμένη μορφή φόρτισης, οριζόντιο φορτίο ίσο με *1KN* στον κόμβο που βρίσκεται στην πάνω αριστερά γωνία του πλαισίου (*Assign* → *Joint Loads* → *Forces*), σύμφωνα με τα όσα παρουσιάζονται στο Σχήμα 12.33.

Πλέον μπορεί να οριστεί η ανελαστική στατική ανάλυση για το οριζόντιο φορτίο *PUSHLOAD* (*Define* → *Load Cases* → *Add New Load Case* και ονομασία *PUSHOVER*). Η συγκεκριμένη ανάλυση θα πρέπει να οριστεί με αρχικές συνθήκες που προκύπτουν από το τέλος της προηγούμενης ανελαστικής ανάλυσης (*PUSHGRAV*), δηλαδή με τα κατακόρυφα φορτία να δρουν ήδη στον φορέα (Σχήμα 12.34). Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τον ορισμό των υπολοίπων παραμέτρων της ανάλυσης, οι οποίες φαίνονται στο κάτω τμήμα του παραθύρου στο Σχήμα 12.34, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

Εκκίνηση από προηγούμενη ανελαστική στατική ανάλυση

Η ύπαρξη της επιλογής *Continue from State At End of Nonlinear Case* (πεδίο *Initial Conditions*), δίνει τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να θέσει ως αρχικές συνθήκες μιας ανελαστικής στατικής ανάλυσης την εντατική κατάσταση που προέκυψε από μια προϋπάρχουσα ανάλυση του ίδιου τύπου. Η δυνατότητα αυτή έχει συνήθως εφαρμογή σε δύο περιπτώσεις:

- Όταν απαιτείται ο συνυπολογισμός ανάλυσης με κατακόρυφα φορτία, η οποία πρέπει να προηγηθεί αυτής με τα οριζόντια, όπως αναλυτικά παρουσιάζεται στο τρέχον παράδειγμα.
- Στην περίπτωση αναλύσεων στις οποίες απαιτείται ιδιαίτερα πυκνό βήμα σε κάποιο τμήμα της επίλυσης (συνήθως στο τμήμα στο οποίο υπάρχει πτώση αντοχής σε συγκεκριμένες πλαστικές αρθρώσεις). Τότε, υπάρχει η δυνατότητα διαίρεσης της συνολικής ανάλυσης σε επιμέρους αναλύσεις, ώστε στο εν λόγω τμήμα να δοθεί πυκνότερο βήμα, θέτοντας ως αρχικές συνθήκες αυτές που προκύπτουν κατά το τέλος της προηγούμενης ανελαστικής ανάλυσης.

Μορφή επιβαλλόμενης οριζόντιας φόρτισης κατά την ανελαστική στατική ανάλυση

Καθώς στον φορέα του παραδείγματος υπάρχει μόνο ένα επίπεδο ορόφου, δεν δημιουργείται κάποιος προβληματισμός αναφορικά με τη μορφή της επιβαλλόμενης οριζόντιας φόρτισης. Σε ένα πολυώροφο κτίριο όμως, θα πρέπει η κατανομή των οριζόντιων φορτίων της μορφής φόρτισης *PUSHLOAD* να ακολουθεί κάποιες βασικές αρχές.

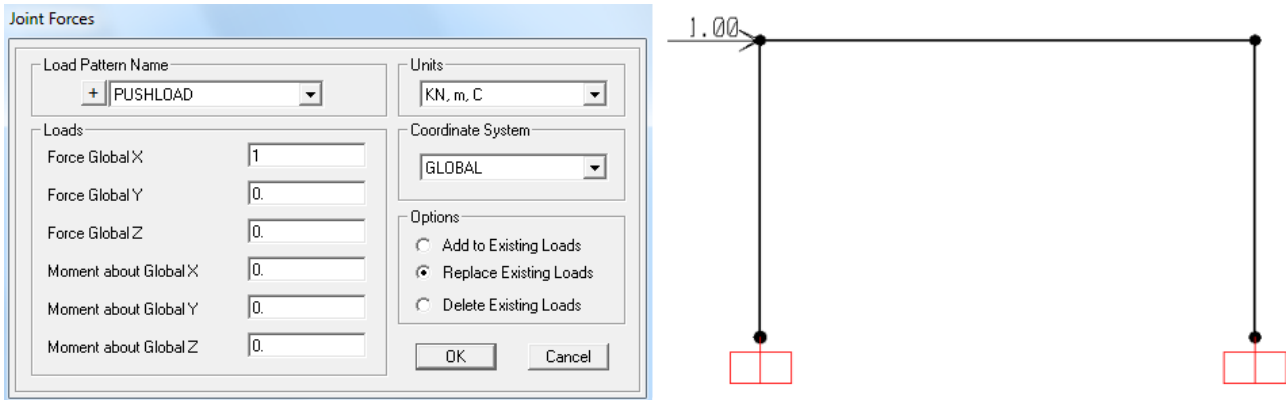
Με βάση όσα προβλέπονται σε ισχύοντες Κανονισμούς (*EC8 §4.3.3.4.2.2(1)*· *KAN.ΕΠΕ. §5.7.3.3*), προβλέπεται για τα οριζόντια φορτία η ύπαρξη δυο τουλάχιστο διαφορετικών κατανομών καθ' ύψος:

- ομοιόμορφη κατανομή βασισμένη σε οριζόντια φορτία ανάλογα της μάζας κάθε ορόφου,
- ιδιομορφική κατανομή ανάλογη προς την κατανομή οριζόντιων φορτίων κατά την περίπτωση ελαστικής ανάλυσης του φορέα.

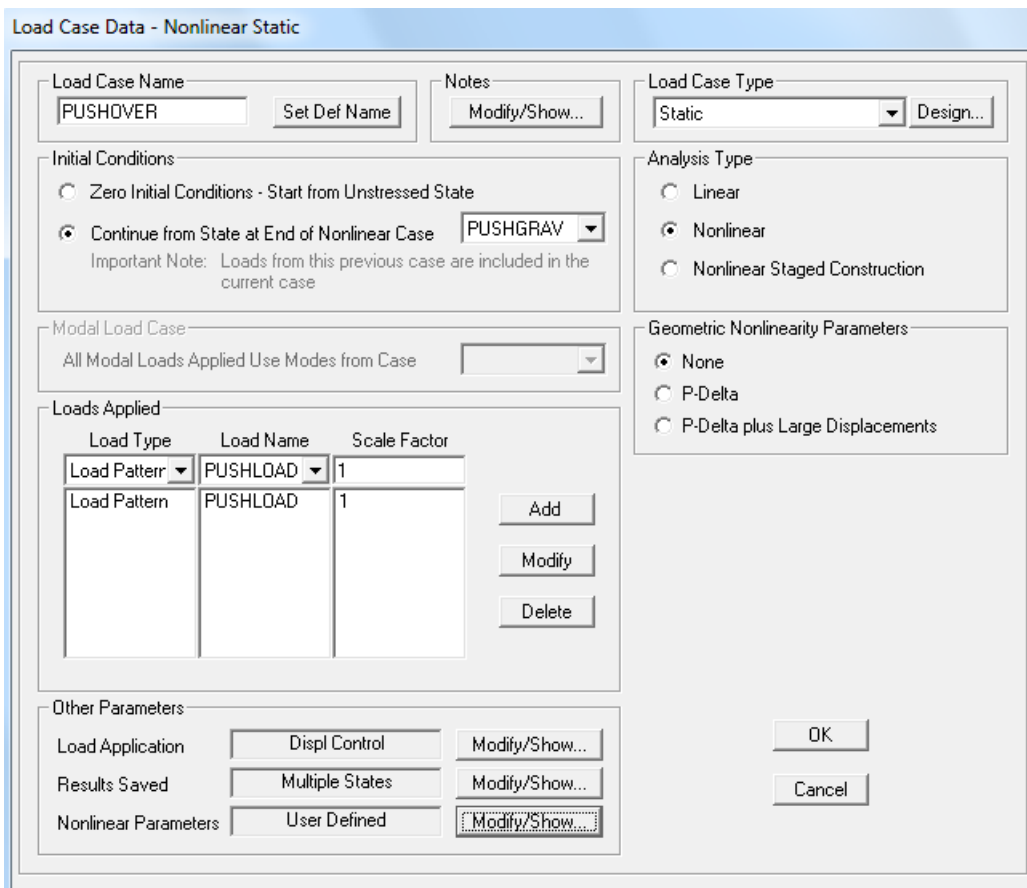
Κατά την ανάλυση των παραπάνω κατανομών, στην περίπτωση πολυώροφου φορέα, δεν ενδιαφέρουν οι απόλυτες τιμές των φορτίων που θα οριστούν στη σχετική μορφή φόρτισης σε κάθε κόμβο, αλλά η μεταξύ τους αναλογία. Στη συνέχεια, η αύξηση της οριζόντιας φόρτισης, σε κάθε βήμα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, θα μεταβάλλει τα επιμέρους φορτία με σταθερή μεταξύ τους αναλογία.

Η εφαρμογή των οριζόντιων δράσεων γίνεται στο κέντρο μάζας του φορέα σε κάθε όροφο (*EC8 §4.3.3.4.2.2(2)P*· *KAN.ΕΠΕ. §5.7.3.3*), ενώ η παρακολούθηση της μετακίνησης γίνεται στον κόμβο ελέγχου, ο οποίος ορίζεται ως το κέντρο μάζας του τελευταίου ορόφου του κτιρίου (*EC8 §4.3.3.4.2.3(2)*· *KAN.ΕΠΕ. §5.7.3.2*). Στην παρούσα περίπτωση, λόγω του επίπεδου φορέα και του διαφράγματος στη στάθμη του ορόφου, η επιλογή επιβολής της οριζόντιας φόρτισης στον αριστερά κόμβο του πλαισίου είναι πρακτικά ισοδύναμη.

Παράλληλα, προβλέπεται η επιβολή της σεισμικής δράσης τόσο κατά τη θετική όσο και κατά την αρνητική φορά φόρτισης, ώστε σε κάθε περίπτωση να ληφθούν υπόψη τα δυσμενέστερα αποτελέσματα (*EC8 §4.3.3.4.1(7)P*). Στο παρόν παράδειγμα, λόγω συμμετρίας του φορέα που αναλύεται, η επιβολή της σεισμικής φόρτισης κατά την αρνητική φορά δεν είναι απαραίτητη.



Σχήμα 12.33 Επιβολή βοηθητικού οριζώντιου φορτίου 1kN στη μορφή φόρτισης PUSHLOAD.



Σχήμα 12.34 Ορισμός ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover ή Nonlinear Static Analysis).

Ο τρόπος επιβολής της οριζόντιας (σεισμικής) φόρτισης (πεδίο *Load Application* στο Σχήμα 12.34), διαφέρει σημαντικά από την περίπτωση της ανελαστικής ανάλυσης για τα κατακόρυφα φορτία, καθώς θα πρέπει να ζητηθεί σταδιακή αύξηση του φορτίου έως ότου επιτευχθεί η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου των 0.3m που έχει οριστεί (τίθεται κατά 50% μεγαλύτερη της πραγματικής μετακίνησης-στόχου). Για τον λόγο αυτόν, γίνεται επιλογή του *Displacement Control* (έλεγχος της μετακίνησης, η οποία αυξάνεται σε κάθε βήμα), όπως φαίνεται στο αριστερά μέρος του Σχήματος 12.35. Ο κόμβος ελέγχου λαμβάνεται στην κορυφή της κατασκευής (*Joint 2*), ενώ η μετατόπισή του κατά τη διεύθυνση της φόρτισης παρακολουθείται στα διαδοχικά βήματα της ανάλυσης (*Monitored Displacement*). Η επιλογή *Use Conjugate Displacement* μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η ανάλυση παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης.

Η αποθήκευση των αποτελεσμάτων (*Results Saved*) μπορεί να γίνει σε συγκεκριμένα βήματα, τα οποία ορίζονται σύμφωνα με το δεξί μέρος του Σχήματος 12.35. Η επιλογή αυτή είναι απαραίτητη στην περίπτωση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, ώστε επαρκής αριθμός αποτελεσμάτων να είναι αποθηκευμένος για την κατασκευή της καμπύλης αντίστασης του φορέα (*pushover curve*).

Καθορισμός μετακίνησης στόχου

Ο καθορισμός της μετακίνησης στόχου κατά την ανελαστική ανάλυση είναι πολύ σημαντικός, καθώς θα πρέπει να αρκεί για να ληφθεί μια πλήρης εικόνα της απόκρισης με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, δίχως όμως να έχει υπερβολικά μεγάλη τιμή που ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα σύγκλισης. Κανονιστικές οδηγίες για τον υπολογισμό της μετακίνησης-στόχου δίνονται στον *EC8 (§4.3.3.4.2.6(1)P* και *Annex B*) και στον *KAN.ΕΠΕ. (§5.7.4.2)*.

Κατά τον ορισμό της ανάλυσης, η ζητούμενη μετακίνηση θα πρέπει να φτάνει το 150% της μετακίνησης-στόχου, ώστε να προκύψει πλήρης εικόνα της ανελαστικής συμπεριφοράς του φορέα (*EC8 §4.3.3.4.2.3(1)·KAN.ΕΠΕ. §5.7.3.1(α)*). Πέραν της παραπάνω τιμής, προτείνεται η συνέχιση της ανάλυσης έως ότου παρατηρηθεί ουσιώδης πτώση της αντοχής, για την εξαγωγή πρόσθετων δεδομένων αναφορικά με την ικανότητα παραλαβής οριζόντιων φορτίων που εμφανίζει η κατασκευή.

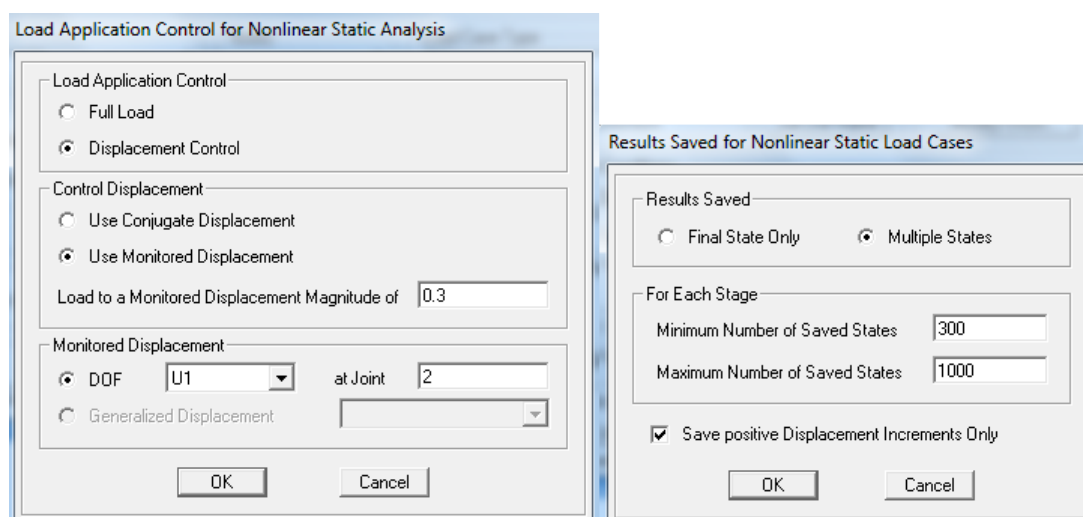
Ορισμός βημάτων εκτέλεσης της ανελαστικής στατικής ανάλυσης

Αν ο ελάχιστος αριθμός βημάτων αποθήκευσης (*Minimum Number of Saved States* στο Σχήμα 12.35) είναι πολύ μικρός, ενδέχεται να μην υπάρχουν αρκετά σημεία για την ικανοποιητική μόρφωση της καμπύλης ικανότητας του φορέα. Αν αντίστοιχα ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός βημάτων αποθήκευσης είναι πολύ μεγάλος, τότε τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιήσουν μεγάλο αποθηκευτικό χώρο στο δίσκο, ενώ και η ανάγνωσή τους από το πρόγραμμα θα είναι δυσχερής. Η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων είναι διαφορετική σε κάθε φορέα που εξετάζεται και απαιτεί σχετική διερεύνηση.

Ο ελάχιστος αριθμός βημάτων καθορίζει τα σημεία κατά τα οποία γίνεται αποθήκευση των αποτελεσμάτων (τα σημεία αποθήκευσης προκύπτουν από τη διαίρεση της μετακίνησης στόχου προς τον ελάχιστο αριθμό βημάτων αποθήκευσης). Εφόσον, κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, κάποιο σημαντικό γεγονός συμβεί σε σημείο εκτός των προκαθορισμένων βημάτων, το πρόγραμμα αποθηκεύει τα αποτελέσματα και του συγκεκριμένου βήματος. Τέτοια ενδιάμεσα γεγονότα θα συνεχίσουν να αποθηκεύονται, έως ότου προσεγγιστεί ο μέγιστος αριθμός βημάτων αποθήκευσης που έχει οριστεί. Καθώς το πρόγραμμα δεν μπορεί να υπερβεί τον μέγιστο αριθμό βημάτων αποθήκευσης, θα πρέπει ο αριθμός αυτός να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να μην υπάρχει απώλεια αποτελεσμάτων σε κάποια σημαντικά σημεία κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Η επιλογή *Save positive Displacement Increments Only* θα έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση μόνο των θετικών μετακινήσεων του κόμβου ελέγχου, και όχι τις ενδεχόμενες αρνητικές μεταβολές που μπορεί να προκύψουν σημειακά, ως αποτέλεσμα της ανακατανομής δυνάμεων στον φορέα μετά από αστοχία κάποιου δομικού μέλους. Ενδεχόμενη παρουσίαση και των αρνητικών μεταβολών μπορεί να επιτρέψει την εμβάθυνση στη συμπεριφορά της ανάλυσης και της κατασκευής (ενδείκνυται σε περιπτώσεις δυσκολίας σύγκλισης), αλλά ταυτόχρονα έχει ως αποτέλεσμα μια περίεργη εικόνα της καμπύλης αντίστασης που θα προκύψει.

Οι υπόλοιπες παράμετροι της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (*Nonlinear Parameters*) ορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 12.37. Ο καθορισμός των συγκεκριμένων παραμέτρων δεν αναφέρεται στην ουσία της φόρτισης και της μεθόδου, αλλά στον έλεγχο του αλγορίθμου επίλυσης και τη διασφάλιση της αποφυγής αριθμητικών ασταθειών.



Σχήμα 12.35 Εφαρμογή φορτίου και αποθήκευση αποτελεσμάτων στις παραμέτρους της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (επιλογές *Load Application* και *Results Saved* της ανελαστικής στατικής ανάλυσης για οριζόντια φόρτιση).

Ανάλυση παραμέτρων ελέγχου της διαδικασίας επίλυσης (*Nonlinear Parameters*)

Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των επιμέρους παραμέτρων ελέγχου της διαδικασίας μη-γραμμικής ανάλυσης.

Η πρώτη κατηγορία παραμέτρων (*Solution Control*) αφορά τον έλεγχο της ευστάθειας της διαδικασίας επίλυσης και περιλαμβάνει τα παρακάτω πεδία:

- **Maximum Total Steps per Stage** (Μέγιστος αριθμός βημάτων ανά στάδιο): Είναι ο μέγιστος αριθμός βημάτων κατά την ανάλυση που καθορίζει και τη διάρκεια της ανάλυσης. Περιλαμβάνει τόσο τα βήματα στα οποία αποθηκεύονται τα αποτελέσματα όσο και τα ενδιάμεσα βήματα. Συνίσταται, σε πρώτη φάση, η επιλογή ενός μικρού σχετικά αριθμού βημάτων, ώστε να γίνει μια εκτίμηση της συνολικής διάρκειας της ανάλυσης. Ο αριθμός των βημάτων μπορεί στη συνέχεια να αυξηθεί, εφόσον δεν έχει επιτευχθεί η στοχευόμενη μετακίνηση που τέθηκε.
- **Maximum Null (Zero) Steps per Stage** (Μέγιστος αριθμός μηδενικών βημάτων ανά στάδιο): Ο μέγιστος αριθμός των μηδενικών/άκυρων βημάτων κατά την ανάλυση τίθεται συνήθως στο 25% του αριθμού των μέγιστων βημάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τιμές αρκετά μικρότερες ($\approx 10\%$) μπορούν να δώσουν εξίσου καλά αποτελέσματα. Τα βήματα αυτά εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης, όταν επιχειρείται αποφόρτιση μιας πλαστικής άρθρωσης ή όταν η σύγκλιση δεν επέρχεται και απαιτείται μικρότερο βήμα ανάλυσης. Πολύ μεγάλος αριθμός μηδενικών βημάτων (βλ. αποτελέσματα ανάλυσης) είναι ενδεικτικός σημαντικών αστοχιών ή αριθμητικού προβλήματος.
- **Maximum Constant-Stiffness Iterations per Substep** και **Maximum Newton-Raphson Iterations per Substep** (Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ανά βήμα): Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού ελέγχει ότι επιτυγχάνεται η ισορροπία σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Στο κάθε βήμα, κατά την επαναληπτική διαδικασία, επιχειρείται πρώτα η προσέγγιση σταθερής δυσκαμψίας (*Constant-Stiffness*). Αν δεν επιτευχθεί σύγκλιση ακολουθεί η προσέγγιση *Newton-Raphson* (*tangent stiffness*). Αν και οι δυο προσεγγίσεις αποτύχουν να παρουσιάσουν σύγκλιση, τότε διαιρείται το βήμα και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Μηδενική τιμή σε κάποια από τις δυο προσεγγίσεις αποκλείει τη χρήση της, ενώ αν οριστούν μηδενικές τιμές και στις δυο επιλογές, τότε το πρόγραμμα επιλέγει τον αριθμό επαναλήψεων που θα επιτρέψει. Οι προεπιλεγμένες τιμές είναι επαρκείς στις περισσότερες περιπτώσεις.
- **Iteration Convergence Tolerance (Relative)** (Ανοχή κατά την επαναληπτική διαδικασία για σύγκλιση): Αφορά το σφάλμα που επιτρέπεται μεταξύ της δρώσας και της υπολογισθείσας δύναμης σε κάθε επανάληψη για την επίτευξη σύγκλισης. Η προεπιλεγμένη τιμή συνήθως αρκεί για τις περισσότερες περιπτώσεις.

- **Use Event to Event Stepping:** Κατά την ανελαστική στατική ανάλυση η συγκεκριμένη επιλογή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και τείνει να μειώσει τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται.
- **(Event Lumping Tolerance (Relative))** (Ανοχή/ευαισθησία κατά την αλλαγή κλάδου): Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ευαισθησία αλλαγής κλάδου (*event tolerance*), η οποία σε μεγάλους συνήθως φορείς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Η παράμετρος αυτή καθορίζει τόσο την ανοχή της έντασης (*Event Force Tolerance*) όσο και την ανοχή της παραμόρφωσης (*Event Displacement Tolerance*), και χρησιμοποιείται για να καθοριστεί πότε συμβαίνει ένα γεγονός (αλλαγή κλάδου) για μια δεδομένη άρθρωση. Γίνεται η υπόθεση (Σχήμα 12.36) ότι η άρθρωση 1 φτάνει στο σημείο C (αλλαγή κλάδου)· αν για την άρθρωση 2 ικανοποιούνται τα όρια τόσο της ανοχή έντασης (*Event Force Tolerance*) όσο και της ανοχή παραμόρφωσης (*Event Displacement Tolerance*), η άρθρωση είναι εντός ορίων ανοχής και θα συμπεριληφθεί στο συγκεκριμένο γεγονός αλλαγής κλάδου του διαγράμματος.
- **Max Line Searches per Iteration:** Πρόκειται για αλγόριθμο της μορφής δοκιμής και σφάλματος (*trial and error*), που αυξάνει την αποτελεσματικότητα της επαναληπτικής διαδικασίας και βελτιώνει τη σύγκλιση της ανάλυσης. Συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές μεταξύ 5-40. Σημειώνεται πως δεν χρησιμοποιείται σε ανελαστικές στατικές αναλύσεις που ορίζονται με έλεγχο μετακίνησης (*displacement controlled*).
- **Line-Search Acceptance Tolerance (Relative):** Ορίζεται το εύρος ανοχής κατά τη λειτουργία του αλγόριθμου που περιγράφηκε παραπάνω. Το πρακτικό εύρος τιμών είναι μεταξύ 0.02-50.
- **Line-Search Step Factor:** Για κάθε δοκιμή, το βήμα της επίλυσης κατά την επαναληπτική διαδικασία μειώνεται βάσει του συντελεστή που ορίζεται στο συγκεκριμένο πεδίο. Η τιμή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1.0 και συνήθως μικρότερη του 2.0.

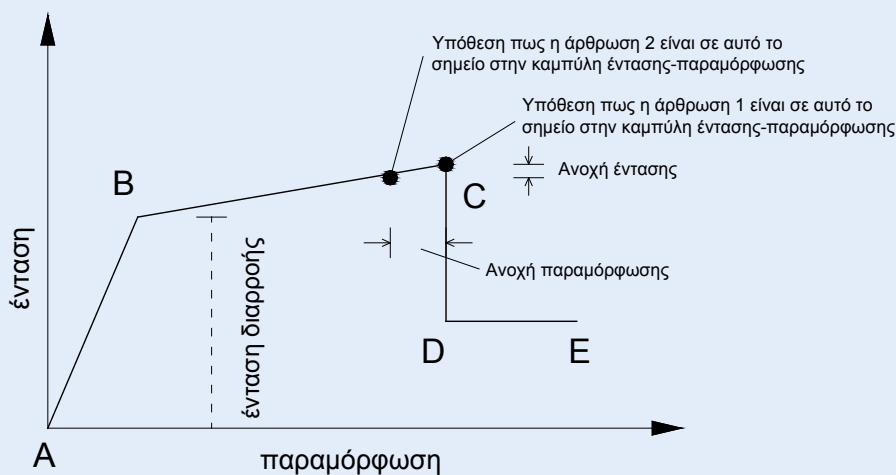
Η επόμενη κατηγορία παραμέτρων (*Target Force Iteration*) αφορά πεδία που χρησιμοποιούνται μόνο όταν εφαρμόζεται φόρτιση με στοχευόμενη δύναμη (*Assign → Frame Loads → Target Force*). Συνεπώς δεν απασχολούν την παρούσα εφαρμογή, η οποία αφορά μετακίνηση-στόχο, δίνονται όμως χάριν πληρότητας κάποια στοιχεία τους, όπως αυτά αντλούνται από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

- **Maximum Iterations per Stage:** Όταν σε μια στατική ανελαστική ανάλυση ορίζεται φορτίο-στόχος, εφαρμόζονται παραμορφώσεις με επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να επιτύχουν τη συγκεκριμένη τιμή φορτίου. Κάθε επανάληψη είναι μια στατική ανελαστική ανάλυση ή τμήμα της. Στο συγκεκριμένο πεδίο χρησιμοποιείται μια μέση τιμή, ξεκινώντας από 5-10 και αυξάνοντας αν χρειαστεί. Μηδενική τιμή αποτρέπει την επαναληπτική διαδικασία με δύναμη-στόχο.
- **Relative Convergence Tolerance:** Ορίζεται η επιτρεπόμενη ανοχή στη δύναμη-στόχο. Συνίσταται μια τιμή μεταξύ 0.01-0.10.
- **Acceleration Factor:** Η απόκλιση μεταξύ της δύναμης-στόχου και της δύναμης που πραγματικά επιτυγχάνεται, μετατρέπεται σε παραμόρφωση και εφαρμόζεται στον επόμενο κύκλο επανάληψης. Με τον συγκεκριμένο συντελεστή είναι δυνατή η αύξηση ή μείωση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Γίνεται χρήση τιμών >1.0 όταν η σύγκλιση αργεί, και τιμών <1.0 όταν η σύγκλιση αποτυγχάνει.
- **Continue Analysis if No Convergence:** Καθώς η επίτευξη της δύναμης-στόχου δεν είναι ένα φυσικό αίτημα, ενώ ενδεχομένως δεν είναι καν εφικτή, με την συγκεκριμένη επιλογή η ανάλυση μπορεί να συνεχιστεί ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας.

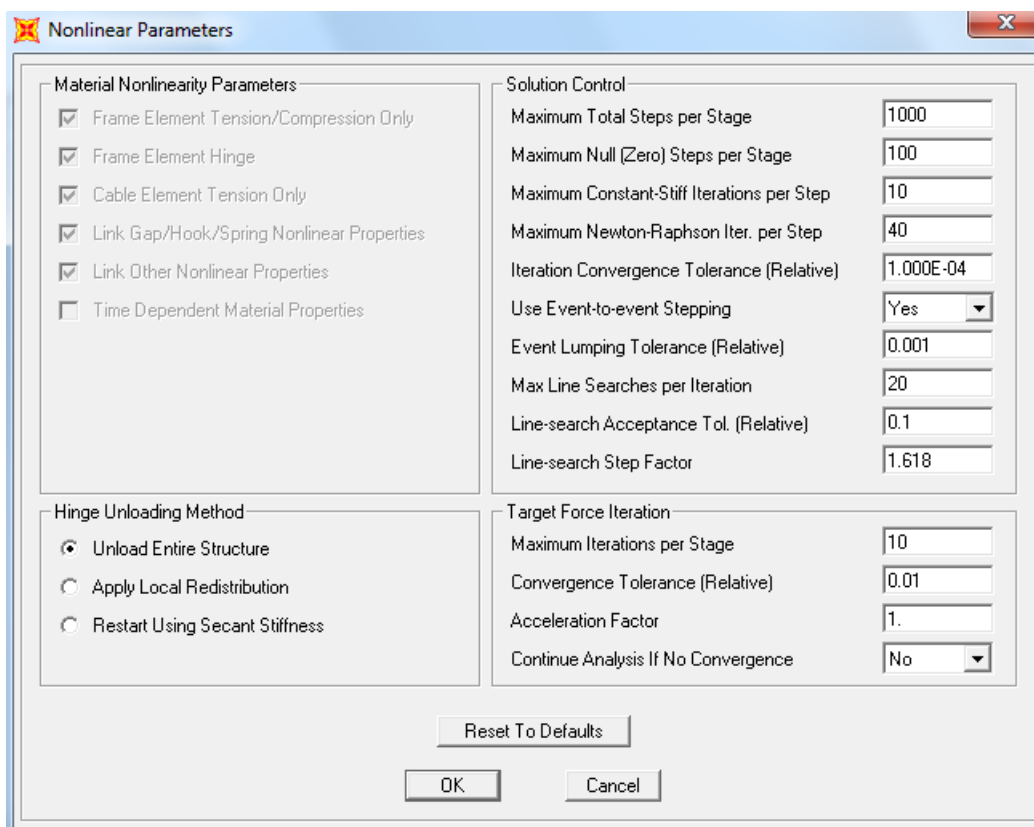
Η τελευταία κατηγορία παραμέτρων σχετίζεται με την επιλεγόμενη μέθοδο αποφόρτισης των πλαστικών αρθρώσεων (*Hinge Unloading Method*). Το *SAP 2000* έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς τρόπους για την αποφόρτιση των δομικών στοιχείων (*Member Unloading Method*). Η έννοια της αποφόρτισης των δομικών στοιχείων αναφέρεται στις περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχει απότομη πτώση αντοχής στο διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης (ροπής-στροφής) για κάποια διατομή. Τέτοια απότομη πτώση αντοχής συμβαίνει κατά τη μετάβαση από το σημείο C στο D ή από το E στην πλήρη αστοχία της διατομής (Σχήμα 12.36). Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο, το πρόγραμμα θα πρέπει να απομακρύνει το φορτίο (ροπή) το οποίο παραλάμβανε η συγκεκριμένη διατομή (ουσιαστικά η συγκεκριμένη πλαστική άρθρωση) και να το ανακατανείμει στην υπόλοιπη κατασκευή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρουσιάσει αστάθεια, καθώς δεν υπάρχει μονοσήμαντη μαθηματική λύση σε μια ανελαστική στατική ανάλυση για το συγκεκριμένο φαινόμενο. Για τον λόγο αυτόν, το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιήσει τρεις διαφορετικές μεθόδους με τις οποίες αντιμετωπίζει πιθανές περιπτώσεις αστάθειας. Οι μέθοδοι οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οι δύο πρώτες (*Unload Entire Structure* και *Apply Local Redistribution*), οι οποίες

μπορούν να δώσουν λύση στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάζονται. Περισσότερες πληροφορίες για την κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις αποφόρτισης μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

Γίνεται κατανοητό, με βάση και την ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων, πως οι περιπτώσεις εμφάνισης αστάθειας κατά τις ανελαστικές αναλύσεις δεν είναι ιδιαίτερα σπάνιες. Κατά συνέπεια, ο μελετητής θα πρέπει να έχει κάποια ευχέρεια και σχετική εμπειρία στην τροποποίηση των διαφόρων παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί προσέγγιση λύσης με ικανοποιητικό βαθμό ακριβείας.



Σχήμα 12.36 Ανοχή-ευαισθησία κατά την αλλαγή κλάδου συμπεριφοράς.



Σχήμα 12.37 Ορισμός παραμέτρων ανελαστικής στατικής ανάλυσης.

Επιρροή φαινομένων γεωμετρικής μη-γραμμικότητας

Κατά την εφαρμογή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης, υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν φαινόμενα γεωμετρικής μη-γραμμικότητας (*Geometric Nonlinearity Parameters* στο Σχήμα 12.34), όπως π.χ. φαινόμενα P-δ και μη-γραμμικά φαινόμενα λόγω μεγάλων μετακινήσεων. Όταν η απόκριση ενός φορέα αναμένεται να δεχθεί έντονη επιρροή από τέτοια φαινόμενα (σε ψηλά κτίρια, καλωδιωτές κατασκευές κτλ), πρέπει αυτά να λαμβάνονται υπόψη, συστήνεται ωστόσο ο συνυπολογισμός τους να γίνεται σταδιακά. Αυτό προτείνεται καθώς, με τη συμμετοχή των φαινομένων μη-γραμμικότητας, αυξάνονται οι παράγοντες που πιθανόν οδηγούν την ανάλυση σε αδυναμία σύγκλισης. Είναι συνεπώς σκόπιμο να διασφαλίζεται η ομαλή εξέλιξη της ανάλυσης υπό τις κλασικές συνθήκες, και σε δεύτερη φάση να αντιμετωπίζεται η συμμετοχή πρόσθετων παραμέτρων.

12.6. Εκτέλεση ανελαστικής στατικής ανάλυσης

Η εκτέλεση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης γίνεται ταυτόχρονα με τις συμβατικές (ελαστικές) αναλύσεις, επιλέγοντας *Analyze* → *Run Analysis* → *Run Now*. Η εικόνα του προγράμματος κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης φαίνεται στο Σχήμα 12.38.

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης, από το αρχείο *Chapter 12.LOG* που δημιουργείται στον φάκελο αποθήκευσης του αρχείου, είναι δυνατή η επισκόπηση τυχόν προειδοποιήσεων (*warnings*) ή σφαλμάτων (*errors*) που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια της επίλυσης.

```

Analysis Complete - Chapter 12
File Name: D:\Scientific\Research\2013 Kallipos\Syggrama\Sap2000\Chapter 12.SDB
Start Time: 06/09/2015 12:42:21 AM Elapsed Time: 00:00:11
Finish Time: 06/09/2015 12:42:32 AM Run Status: Done - Analysis Complete

NONLINEAR STATIC ANALYSIS 00:42:21

CASE: PUSHOVER
CONTINUING FROM THE END OF CASE: PUSHGRAV
LOAD CONTROL TYPE = DISPLACEMENT
NUMBER OF STAGES = 0
TYPE OF GEOMETRIC NONLINEARITY = NONE
INCLUDE ELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
INCLUDE INELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
METHOD TO USE WHEN HINGES DROP LOAD = UNLOAD ENTIRE STRUCTURE
SAVE POSITIVE INCREMENTS ONLY = YES
RELATIVE FORCE CONVERGENCE TOLERANCE = 0.000100
RELATIVE EVENT TOLERANCE = 0.001000

Saved Null Total Iteration Relative Curr Step Curr Sum Max Sum
Steps Steps Steps this Step Unbalance Size of Steps of Steps
( 1000 100 1000 10/40 1.000000 0.003333 1.000000 1.000000)
 304 0 304 Conv 1 0.098283 0.000359 1.000000 1.000000

TIME FOR INITIALIZING ANALYSIS = 0.01
TIME FOR CONTROLLING ANALYSIS = 0.34
TIME FOR FORMING STIFFNESS MATRIX = 0.21
TIME FOR SOLVING STIFFNESS MATRIX = 6.66
TIME FOR CALCULATING DISPLACEMENTS = 1.87
TIME FOR DETERMINING EVENTS = 0.03
TIME FOR UPDATING STATE = 0.14

TOTAL TIME FOR THIS ANALYSIS = 9.26

ANALYSIS COMPLETE 2015/09/06 00:42:31

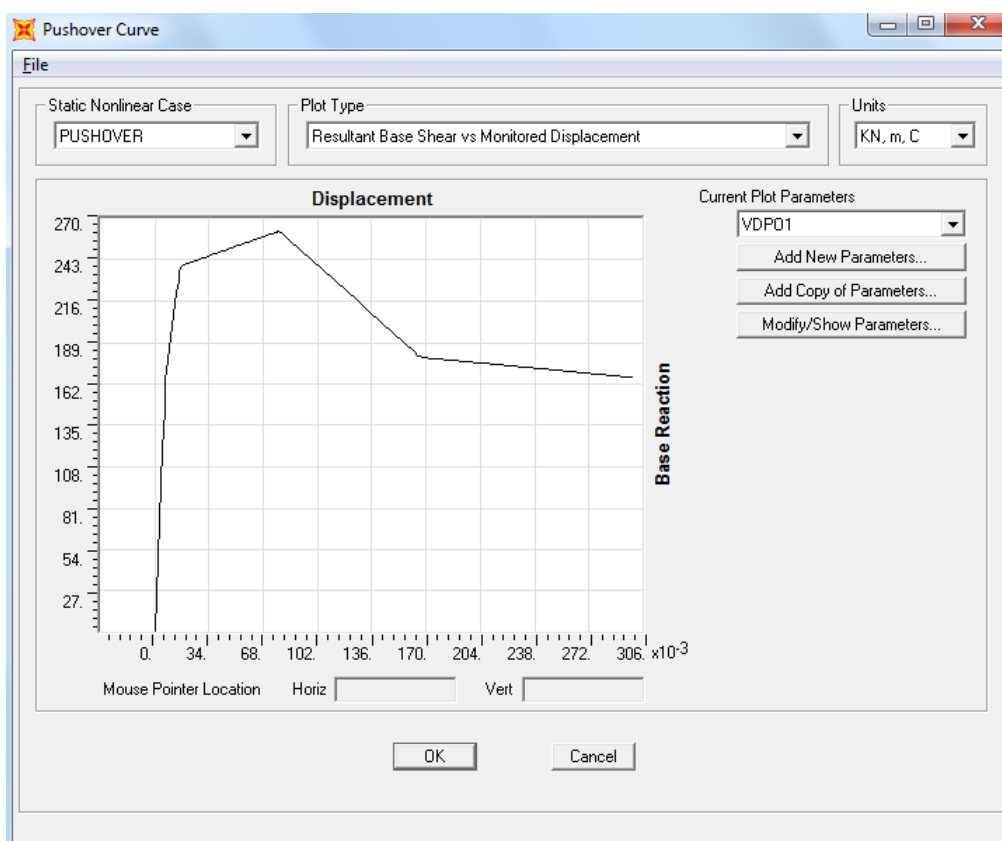
```

Σχήμα 12.38 Τμήμα του παραθύρου που εμφανίζεται κατά την εκτέλεση της ανάλυσης.

12.7. Αποτελέσματα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης

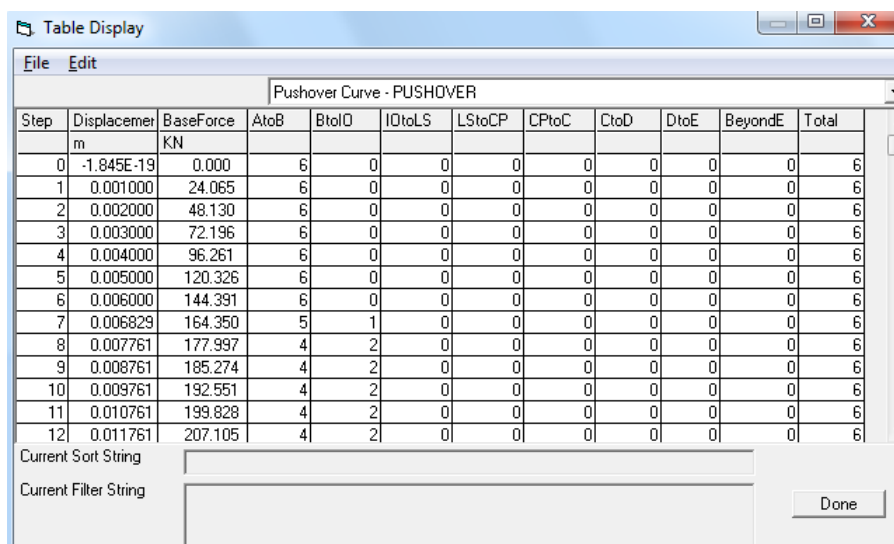
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της επίλυσης, το πρόγραμμα έχει υπολογίσει την καμπύλη αντίστασης (*pushover curve*) του φορέα, η οποία μπορεί να εμφανιστεί επιλέγοντας *Display → Show Static Pushover Curve*). Η καμπύλη αντίστασης ενός φορέα αντιστοιχεί στο διάγραμμα τέμνουσας βάσης – μετακίνησης στην κορυφή και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το μηχανικό, καθώς δίνει άμεσα και με εποπτικό τρόπο χρήσιμες πληροφορίες για τη σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν μεγέθη δυνάμεων (π.χ. διαθέσιμη αντοχή, υπεραντοχή κτλ), μεγέθη παραμορφώσεων (π.χ. διαθέσιμη πλαστικότητα), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση δεικτών όπως ο διαθέσιμος συντελεστής συμπεριφοράς q .

Η καμπύλη αντίστασης που προκύπτει από την ανάλυση του μονώροφου φορέα παρουσιάζεται στο (Σχήμα 12.39). Η συγκεκριμένη καμπύλη διαφέρει από την τυπική μορφή καμπύλης αντίστασης, καθώς ο φορέας που εξετάστηκε είναι μονώροφος και ενός μόνο ανοίγματος, με μικρό βαθμό υπερστατικότητας και μικρό συνολικά αριθμό πιθανών πλαστικών αρθρώσεων. Στην περίπτωση ενός τυπικού πολυώροφου φορέα περισσότερων ανοιγμάτων, η καμπύλη αντίστασης εμφανίζει μεγαλύτερο εύρος μετελαστικού κλάδου συμπεριφοράς, τον οποίο διαδέχεται σταδιακή απομείωση αντοχής με το σχηματισμό ολοένα και περισσότερων πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 12.39 Εμφάνιση καμπύλης αντίστασης φορέα.

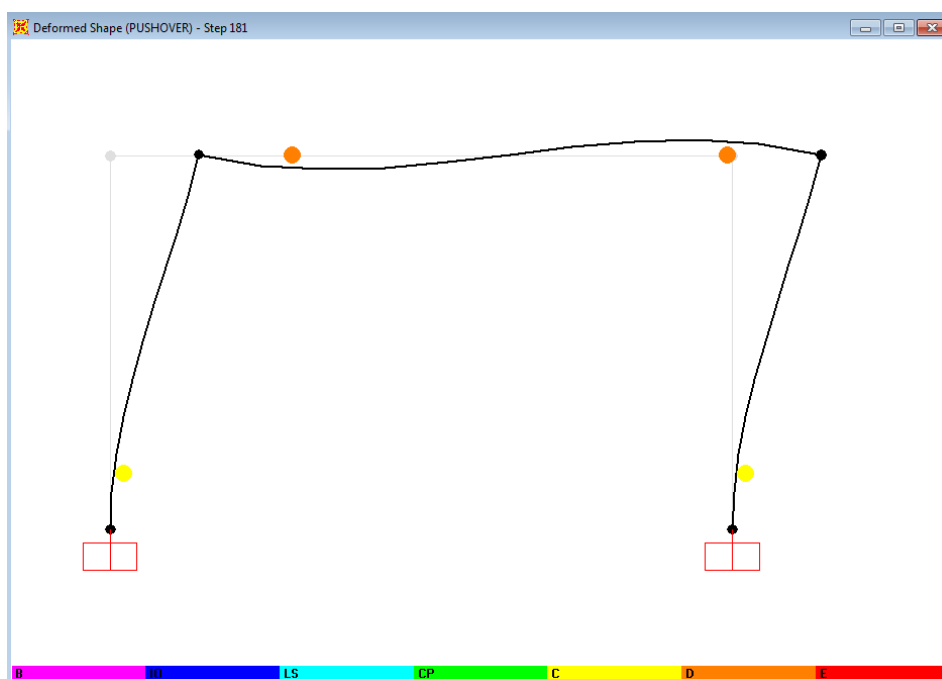
Επιλέγοντας στο παράθυρο του Σχήματος 12.39 την εντολή *File → Display Tables*, εμφανίζονται σε μορφή πίνακα οι τιμές της καμπύλης αντίστασης για το κάθε βήμα της ανάλυσης. Στη συνέχεια, με την επιλογή *File → Export to Excel* από το νέο παράθυρο (Σχήμα 12.40), μπορεί να γίνει εξαγωγή των τιμών αυτών σε μορφή αρχείου **.xls* για περαιτέρω επεξεργασία.



Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoI0	I0toLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-1.845E-19	0.000	6	0	0	0	0	0	0	0	6
1	0.001000	24.065	6	0	0	0	0	0	0	0	6
2	0.002000	48.130	6	0	0	0	0	0	0	0	6
3	0.003000	72.196	6	0	0	0	0	0	0	0	6
4	0.004000	96.261	6	0	0	0	0	0	0	0	6
5	0.005000	120.326	6	0	0	0	0	0	0	0	6
6	0.006000	144.391	6	0	0	0	0	0	0	0	6
7	0.006829	164.350	5	1	0	0	0	0	0	0	6
8	0.007761	177.997	4	2	0	0	0	0	0	0	6
9	0.008761	185.274	4	2	0	0	0	0	0	0	6
10	0.009761	192.551	4	2	0	0	0	0	0	0	6
11	0.010761	199.828	4	2	0	0	0	0	0	0	6
12	0.011761	207.105	4	2	0	0	0	0	0	0	6

Σχήμα 12.40 Πινακοποιημένες τιμές της καμπύλης αντίστασης για κάθε βήμα της ανάλυσης.

Τα εντατικά μεγέθη και ο παραμορφωμένος φορέας μπορούν να εμφανιστούν με τρόπο αντίστοιχο με την περίπτωση των ελαστικών αναλύσεων (*Display → Show Forces/Stresses → Frames* και *Display → Show Deformed Shape* αντίστοιχα), ενώ μπορεί να επιλεγεί επισκόπηση αποτελεσμάτων για το κάθε επιμέρους βήμα της ανάλυσης. Στην περίπτωση μάλιστα του παραμορφωμένου φορέα, είναι δυνατή η σταδιακή εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων που σχηματίζονται με την διαδοχή των βημάτων της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (χρήση βέλους δίπλα στην εντολή *Start Animation*). Ο χρωματισμός της κάθε πλαστικής άρθρωσης σχετίζεται με το βαθμό πλαστικοποίησης της διατομής, βάσει της γενικής μορφής συμπεριφοράς που εικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 12.27, και τις τιμές που έχουν δοθεί για την κάθε στάθμη επιτελεστικότητας (*acceptance criteria*). Στο Σχήμα 12.41 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα, ενδεικτικά κατά το βήμα 181 (*Step 181*) της ανάλυσης, με τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν αναπτυχθεί να λαμβάνουν τον αντίστοιχο χρωματισμό.



Σχήμα 12.41 Παραμορφωμένος φορέας με τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν αναπτυχθεί (*Step 18,1* όπως διακρίνεται στον τίτλο του παραθύρου).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 12^{ου} Κεφαλαίου

- ASCE (2000). *FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- ASCE/SEI (2006). *ASCE 41-06 – Seismic rehabilitation of existing buildings*. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.
- ASCE/SEI (2010). *ASCE 7-10 - Minimum design loads for buildings and other structures*. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.
- ASCE/SEI (2013). *ASCE 41-13 - Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.
- ATC (2005). *FEMA 440 - Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency - Applied Technology Council (ATC-55 Project).
- BSSC (2003). *FEMA 450 - NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- BSSC (2009). *FEMA P-750 - NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- CEN (2004). *EN 1992–1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1998–1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2005). *EN 1998–3: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 561-582. doi: 10.1002/eqe.144
- Computers and Structures, Inc. (2008). *Material stress-strain curves, Technical note*. Berkeley, California: CSI.
- Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake Spectra*, 16(3), 573-592. doi: 10.1193/1.1586128
- Kappos, A., & Panagopoulos, G. (2004). Performance-based seismic design of 3D R/C buildings using inelastic static and dynamic analysis procedures. *ISET Journal of earthquake technology*, 41(1), 141-158.
- Kappos, A., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., & Penelis, G. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 391-413. doi: 10.1007/s10518-006-9023-0
- Kappos, A., & Penelis, G. (2010). *Earthquake resistant concrete structures*: CRC Press.
- Kirtas, E., & Kakaletsis, D. (2013). Numerical investigation of influential parameters concerning the experimental testing of RC frames under cyclic loading. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7, 230-243. doi: 10.2174/1874836801307010230
- Krawinkler, H., & Seneviratna, G. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20(4-6), 452-464. doi: 10.1016/S0141-0296(97)00092-8
- Mahin, S. A., & Bertero, V. V. (1977). RCCOLA, A computer program for reinforced concrete column analysis, user's manual and documentation [Computer software]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California.

- Mander, J., Priestley, M., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 114(8), 1804-1826. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- Otani, S., & Sozen, M. (1972). *Behavior of multistory reinforced concrete frames during earthquakes*. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry structures*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Takeda, T., Sozen, M., & Nielsen, N. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 96(12), 2557-2573.
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Ιγνατάκης, Χ. (2008). *Διαμόρφωση και λεπτομέρειες όπλισης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα: Κωδικοποίηση-Εφαρμογές (2η έκδοση)*. Θεσσαλονίκη: Χαλυβουργία Ελλάδος.
- Κακαλέτσης, Δ. (2008). *Διερεύνηση της συμπεριφοράς ορθογωνικών τοιχοπληρωμένων πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος με ανοίγματα υπό μεγάλου εύρους οριζόντιες κυκλικές μετατοπίσεις*. Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- ΟΑΣΠ (2000). *ΚΑΝ.ΕΠΕ. - Κανονισμός επεμβάσεων (1^η Αναθεώρηση)*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.
- Παναγόπουλος, Γ., & Κάππος, Α. (2008). *RCCOLA.NET, Πρόγραμμα υπολογιστή για την ανάλυση διατομών από Ο/Σ στην ανελαστική περιοχή [Computer software]*. Θεσσαλονίκη: Εργαστήριο Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Πενέλης, Γ., & Κάππος, Α. (1992). *Αντισεισμικές κατασκευές από σκυρόδεμα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΚΩΣ 2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2008). *Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, ΚΤΧ 2008*. (2008). Αθήνα.

Δυναμική ανελαστική ανάλυση

Σύνοψη

Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 13 παρουσιάζεται η προσομοίωση της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης απλού φορέα. Τα βασικά αντικείμενα που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι: δυναμική ανελαστική ανάλυση, ιδιότητες ανελαστικής συμπεριφοράς υλικού κατά τη δυναμική ανελαστική ανάλυση με μη-γραμμικά στοιχεία συνδέσμου (Nonlinear Links), καθορισμός ιδιοτήτων στοιχείων συνδέσμων, μέθοδοι δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης, καθορισμός παραμέτρων ιδιομορφικής ανάλυσης με διανύσματα Ritz, συνδυασμοί φορτίων κατά την ανελαστική δυναμική ανάλυση, επιβολή φόρτισης στατικού τύπου μέσω ανελαστικής ανάλυσης χρονοϊστορίας, επιλογή χρονοϊστορίας επιταχύνσεων για τη δυναμική ανελαστική ανάλυση βάσει EC8, παράμετροι ανελαστικής συμπεριφοράς κατά την επίλυση με τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών, δυναμική ανελαστική ανάλυση με μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο, θρόχοι αναπτυσσομένης ροπής-πλαστικής στροφής διατομής.

Προαπαιτούμενη γνώση

Απαιτούνται βασικές γνώσεις αντοχής υλικών και στατικής επίλυσης φορέων, γνώσεις αντισεισμικού σχεδιασμού, δυναμικής και ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, εφαρμογή του παραδείγματος που αναπτύσσεται στα Κεφάλαια 3 και 11, όπως και πλήρης κατανόηση επιμέρους γνώσεων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια του συγγράμματος.

13.1. Δεδομένα παραδείγματος

Ζητείται η ανελαστική δυναμική ανάλυση του φορέα των Κεφαλαίων 3 και 11 (Σχήμα 3.1), με βάση τα παρακάτω δεδομένα:

- Σεισμική φόρτιση με τη χρονοϊστορία επιταχύνσεων που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 11, με πολλαπλασιαστή ίσο με 5 προκειμένου να προκαλέσει ανελαστική απόκριση του φορέα.
- Υλικό οπλισμένο σκυρόδεμα τύπου **C20/25** (να δοθεί αβαρές και με μηδενική πυκνότητα).
- Τιμές ροπής διαρροής για τη δοκό ίσες με **+101kNm** και **-148kNm** (θετική-αρνητική τιμή) και τιμές ροπών αστοχίας κατά 10% μεγαλύτερες.
- Τιμή ροπής διαρροής για τα υποστυλώματα ίση με **±220kNm** σε βάση και κορυφή (αντιστοιχεί σε αξονικό φορτίο στύλου από το συνδυασμό **G+0.3Q**) και τιμή ροπής αστοχίας 10% μεγαλύτερη.

13.2. Ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear time-history analysis)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα δοθούν κάποιες κατευθυντήριες οδηγίες για την εκτέλεση δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης στο *SAP 2000*. Η δυναμική ανελαστική ανάλυση αφορά μη-γραμμική ανελαστική απόκριση του φορέα, όπου η δράση των οριζόντιων φορτίων είναι δυναμικού τύπου και προκαλεί την αδρανειακή απόκριση της κατασκευής. Αντίθετα, κατά την ανελαστική στατική ανάλυση (*pushover*) που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 12, η δράση των οριζόντιων φορτίων ήταν στατικού τύπου. Υπό το πρίσμα αυτό, η δυναμική ανελαστική ανάλυση περιγράφει ορθότερα την απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος.

Παρόλο που η δυναμική ανελαστική ανάλυση αποτελεί την άμεση προσέγγιση της απόκρισης μιας κατασκευής, εντούτοις δεν χρησιμοποιείται συχνά κατά το σχεδιασμό, όπως άλλωστε συμβαίνει και με την ανελαστική στατική ανάλυση. Αυτό συμβαίνει για τους εξής βασικούς λόγους:

- Απαιτεί σημαντικό αριθμό παραμέτρων για τον καθορισμό της δυναμικής ανελαστικής απόκρισης των επιμέρους διατομών του φορέα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Η αντιμετώπιση δυναμικών ανελαστικών προβλημάτων είναι ιδιαίτερα δυσχερής, τόσο υπολογιστικά, σε επίπεδο διατιθέμενου λογισμικού και δυνατοτήτων που προσφέρει, όσο και σε επίπεδο γνώσεων και εμπειρίας του μέσου μηχανικού.

Η τρέχουσα επιστημονική γνώση, παρόλη την εκτεταμένη ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων δεκαετιών, δεν έχει οδηγήσει σε συνθήκες που επιτρέπουν την εύκολη χρήση της μεθόδου. Η εμπλοκή πολλών παραμέτρων από διάφορα γνωστικά αντικείμενα που σχετίζονται με τη σεισμική μηχανική (από την επιλογή των κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων και τον προσδιορισμό των εδαφικών συνθηκών έως τη σωστή διαδικασία επίλυσης ενός πολυώροφου φορέα) εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έρευνας διεθνώς.

Γίνεται σαφές από τα παραπάνω, πως στόχος του παραδείγματος δεν είναι η ακριβής εφαρμογή της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης για την περίπτωση του φορέα που εξετάζεται βάσει ενός αυστηρού κανονιστικού πλαισίου, αλλά η εισαγωγή του αναγνώστη στα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου.

Δυναμική ανελαστική ανάλυση στο *SAP 2000*

Για την εκπόνηση ανελαστικής ανάλυσης στο πρόγραμμα *SAP 2000* παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς σε προκαθορισμένα σημεία ενός φορέα με τη χρήση:

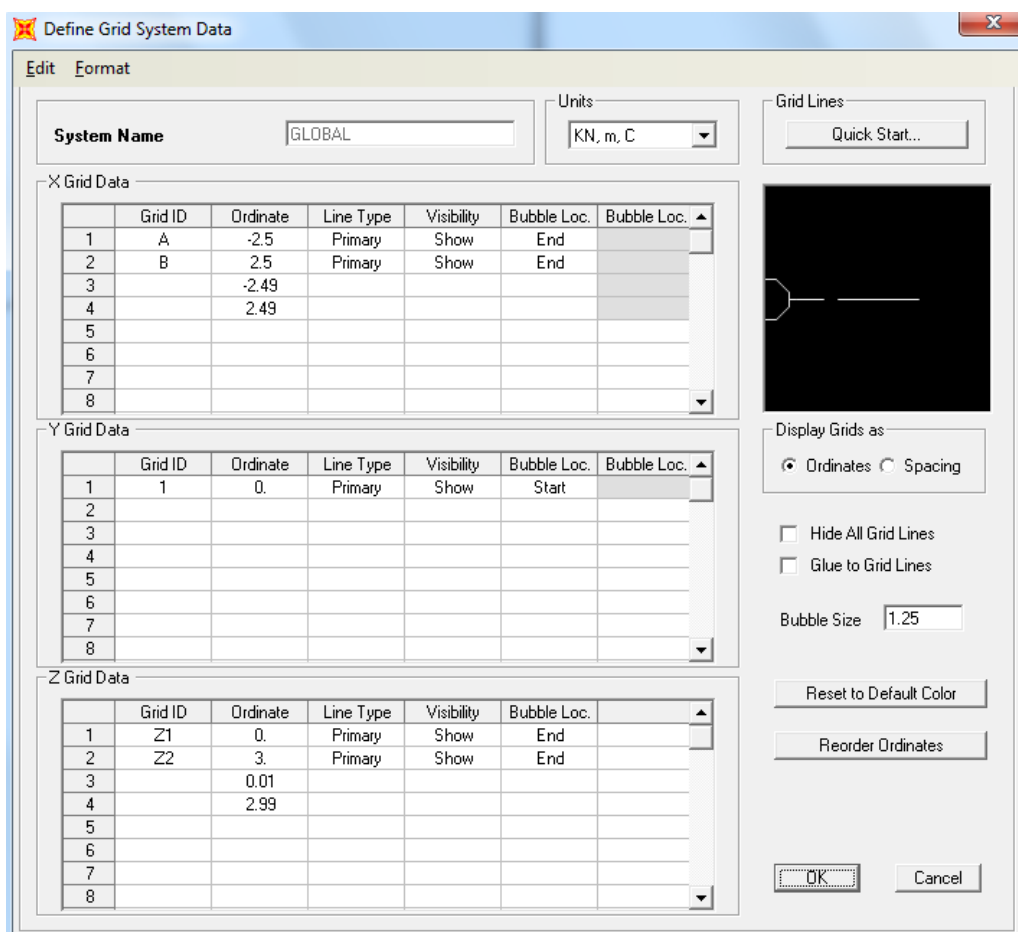
- Πλαστικών αρθρώσεων (*Hinges*) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στην περίπτωση ανελαστικής στατικής ανάλυσης όσο και δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης.
- Μη-γραμμικών συνδέσμων (*Nonlinear Links*) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο στην περίπτωση δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης.

Η περίπτωση των πλαστικών αρθρώσεων τύπου *Hinges* εξετάστηκε στην ανελαστική στατική ανάλυση στο Κεφάλαιο 12. Στο τρέχον Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η χρήση των μη-γραμμικών συνδέσμων *Nonlinear Links*. Σημειώνεται πως για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των *Hinges* κατά τη δυναμική ανελαστική ανάλυση στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, είναι απαραίτητη η επιλογή της μεθόδου απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο κατά την επίλυση του φορέα (βλ. Κεφάλαιο 11).

13.3. Γεωμετρία του φορέα και σχεδίαση στοιχείων συνδέσμων (Links)

Οι μη-γραμμικοί σύνδεσμοι θα εισαχθούν στον φορέα με τρόπο που διακόπτει τη συνέχεια των γραμμικών στοιχείων, αποτελώντας ουσιαστικά κάποια πρόσθετα τμήματα στα άκρα των γραμμικών στοιχείων. Καθώς η μείωση του μήκους των δομικών στοιχείων αυξάνει τη δυσκαμψία τους, θα πρέπει τα στοιχεία τύπου *Link* να έχουν αρκούντως μικρό μήκος ώστε η όποια επιρροή να μην είναι σημαντική. Στην εφαρμογή του παραδείγματος επιλέγεται η χρήση μη-γραμμικών συνδέσμων μήκους 1cm.

Καθώς για τον φορέα της ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα που ήδη έχουν εισαχθεί στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 11, αρχικά γίνεται άνοιγμα του συγκεκριμένου αρχείου και αποθήκευσή του ως *Chapter 13.SDB*. Για τη διευκόλυνση της απομείωσης του μήκους των γραμμικών στοιχείων και της σχεδίασης των συνδέσμων, τροποποιείται το σύστημα βοηθητικών γραμμών (*Define* → *Coordinate Systems/Grids* και *Modify* του υφιστάμενου συστήματος), προσθέτοντας γραμμές καννάβου (*Grid Lines*) σε θέσεις που απέχουν 0.01m από τους κόμβους, σύμφωνα με το Σχήμα 13.1.

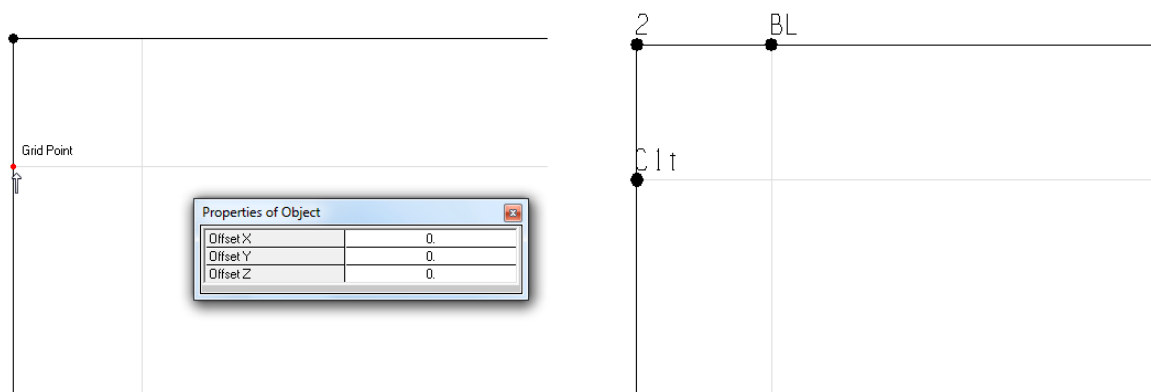


Σχήμα 13.1 Προσθήκη βοηθητικών γραμμών για τη σχεδίαση των συνδέσμων.

Στη συνέχεια προστίθενται κόμβοι στον φορέα, σε θέσεις που απέχουν 0.01m από τα άκρα των γραμμικών στοιχείων, με την εντολή *Draw* → *Add Special Joint* σε επίπεδο *xz*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.2 (αριστερά). Για να γίνει δυνατή η σχεδίαση θα πρέπει να είναι ορατές οι βοηθητικές γραμμές (ενεργό το *View* → *Show Grid*) και να χρησιμοποιηθούν οι εντολές *zoom* του προγράμματος (*Rubber Band Zoom* και *Restore Full View*), καθώς οι αποστάσεις των νέων κόμβων από τους υφιστάμενους είναι πολύ μικρές για να εμφανιστούν στην πλήρη προβολή του φορέα. Στους συνολικά έξι (6) νέους κόμβους δίνονται οι παρακάτω ονομασίες (τροποποίηση της ονομασίας με δεξί *click* στον κάθε κόμβο), ώστε να διευκολυνθεί στη συνέχεια ο επανακαθορισμός των δομικών στοιχείων:

- Στους νέους κόμβους στο αριστερά υποστυλωμα δίνονται ονομασίες *C1b* (βάση) και *C1t* (κορυφή).
- Στους νέους κόμβους στο δεξιά υποστυλωμα δίνονται ονομασίες *C2b* (βάση) και *C2t* (κορυφή).
- Στη δοκό, καθώς είναι διακριτοποιημένη σε δυο επιμέρους τμήματα, απαιτείται νέος κόμβος στο αριστερά άκρο της αριστερά δοκού (ονομασία κόμβου *BL*) και στο δεξί άκρο της δεξιάς δοκού (ονομασία κόμβου *BR*).

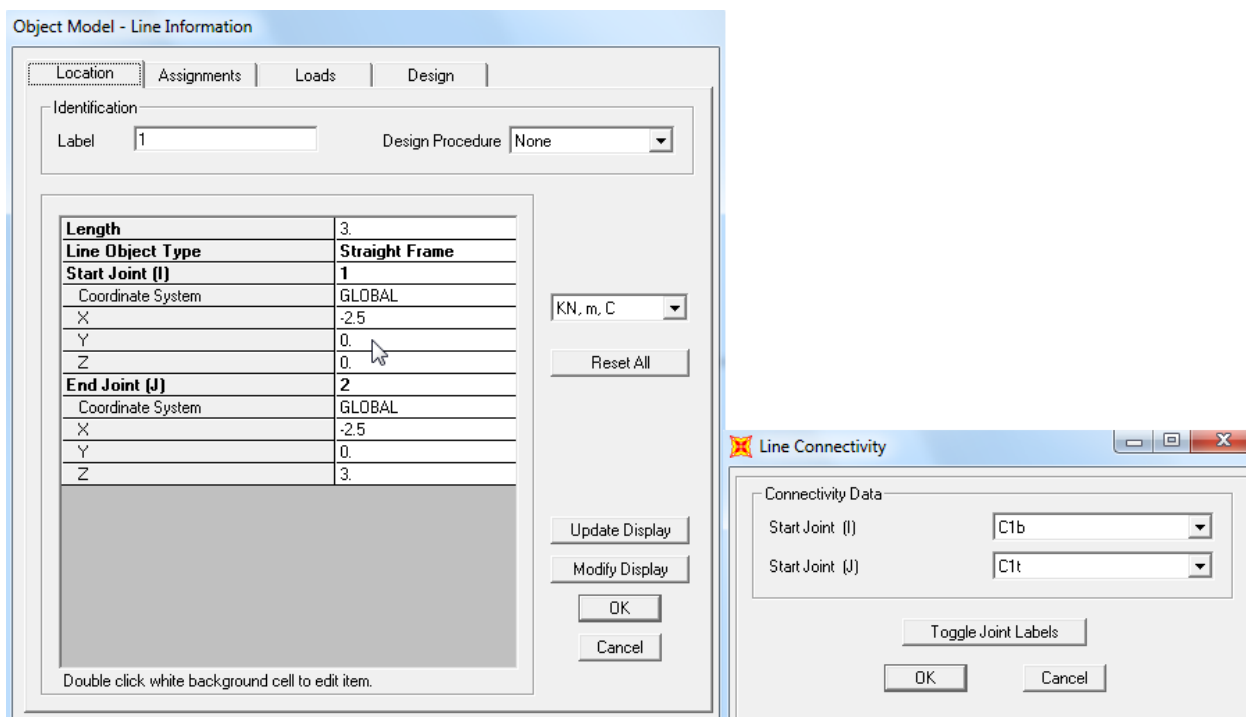
Η παραπάνω διαδικασία σχεδίασης και μετονομασίας, ενδεικτικά για το σημείο σύνδεσης του αριστερά υποστυλώματος με τη δοκό, φαίνεται στο Σχήμα 13.2.



Σχήμα 13.2 Προσθήκη νέων κόμβων στα σημεία διασταύρωσης με τις βοηθητικές γραμμές (αριστερά) και μετονομασία νέων κόμβων (δεξιά).

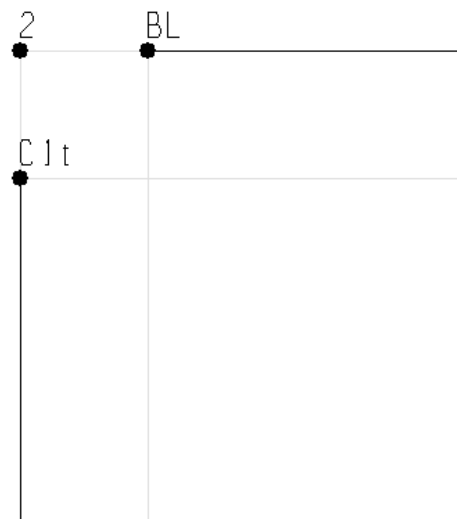
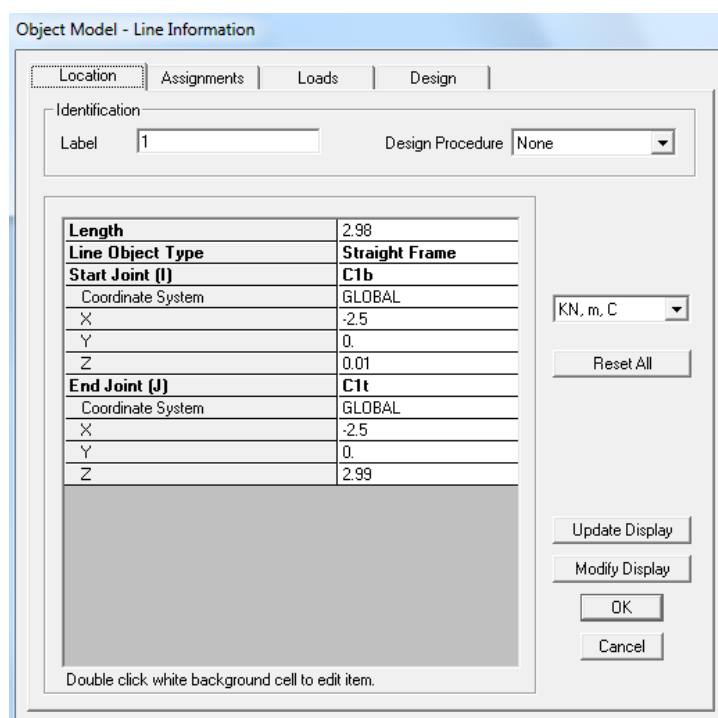
Το επόμενο βήμα είναι η αλλαγή των κόμβων που ορίζουν τα άκρα των δομικών στοιχείων, ώστε να προκύψουν τα κενά του 0.01m στα οποία θα σχεδιαστούν οι σύνδεσμοι (*Links*). Αυτό μπορεί να γίνει με δεξιά *click* σε κάθε γραμμικό στοιχείο, και στη συνέχεια διπλό *click* στο σημείο που εμφανίζονται οι συντεταγμένες των κόμβων αρχής/τέλους του στοιχείου, οπότε μπορούν να αντικατασταθούν από τους νέους κόμβους. Η διαδικασία εμφανίζεται στο Σχήμα 13.3 ενδεικτικά για το αριστερά υποστύλωμα, ενώ τα άκρα των δομικών στοιχείων του φορέα πλέον επανακαθορίζονται ως εξής:

- Αριστερά υποστύλωμα: *C1b* (κόμβος *I*) και *C1t* (κόμβος *J*).
- Δεξιά υποστύλωμα: *C2b* (κόμβος *I*) και *C2t* (κόμβος *J*).
- Αριστερά δοκός: *BL* (κόμβος αρχής *I*), καθώς ο κόμβος *J* (τέλος) βρίσκεται στο μέσον του πλαισίου και δεν μεταβάλλεται.
- Δεξιά δοκός: *BR* (κόμβος τέλους *J*), καθώς ο κόμβος *I* (αρχής) βρίσκεται στο μέσον του πλαισίου και δεν μεταβάλλεται.



Σχήμα 13.3 Επιλογή (διπλό *click*) των κόμβων αρχής/τέλους του γραμμικού στοιχείου (αριστερά) και αλλαγή τους με τους νέους κόμβους που δημιουργήθηκαν (δεξιά).

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας μεταβάλλονται οι κόμβοι αρχής ή/και τέλους των γραμμικών στοιχείων, οπότε και επανακαθορίζεται το μήκος του στοιχείου (*Length*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.4 για το αριστερά υποστυλωμα. Παράλληλα, στις θέσεις σύνδεσης των γραμμικών στοιχείων και στις βάσεις των υποστυλωμάτων, υπάρχουν πλέον κενά τμήματα όπου θα σχεδιαστούν τα στοιχεία συνδέσμου (*Links*).



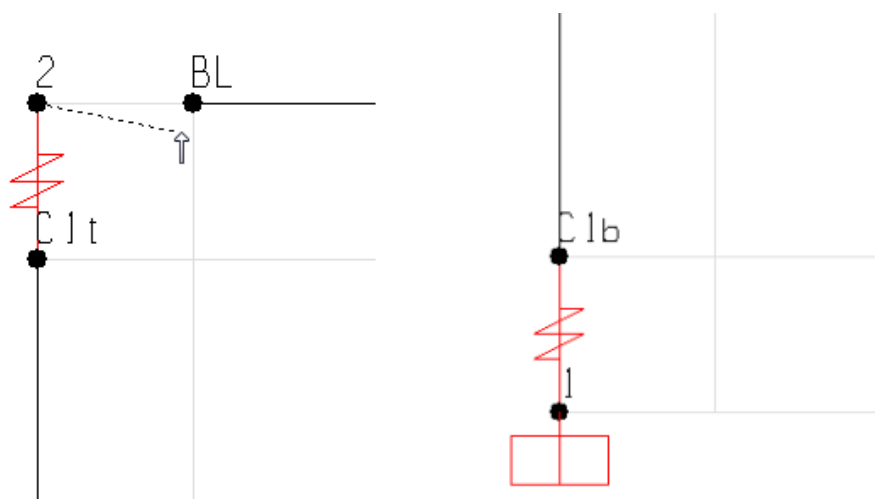
Σχήμα 13.4 Ενημέρωση των χαρακτηριστικών του γραμμικού στοιχείου μετά την αλλαγή των κόμβων αρχής/τέλους (αριστερά) και εικόνα με κενό τμήμα στα σημεία σύνδεσης των στοιχείων (δεξιά).

Τελευταίο βήμα στον καθορισμό της γεωμετρίας αποτελεί η σχεδίαση των συνδέσμων από την εντολή *Draw* → *Draw 2 Joint Links*. Η σχεδίαση γίνεται ακολουθώντας τη φορά των αξόνων (προς τα πάνω κατά *Z* και δεξιά κατά *X*), όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.5. Δίδεται προσοχή στη διατήρηση της πάκτωσης στον κάτω κόμβο των στοιχείων *Link* που σχεδιάστηκαν στις βάσεις των υποστυλωμάτων (δεξιά στο Σχήμα 13.5). Συνολικά σχεδιάζονται στον φορέα έξι (6) στοιχεία συνδέσμου (*Links*).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εισαγωγής των συνδέσμων ακολουθεί η αλλαγή των ονομάτων (*Labels*) σε γραμμικά στοιχεία και συνδέσμους, προκειμένου να είναι εύκολος ο εντοπισμός τους κατά την ανάγνωση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τα παρακάτω:

- Αριστερά υποστυλωμα: Όνομα γραμμικού στοιχείου *C1*, όνομα συνδέσμου βάσης *C1b* και όνομα συνδέσμου κορυφής *C1t*.
- Δεξιά υποστυλωμα: Όνομα γραμμικού στοιχείου *C2*, όνομα συνδέσμου βάσης *C2b* και όνομα συνδέσμου κορυφής *C2t*.
- Αριστερά δοκός: Όνομα γραμμικού στοιχείου *BL* και όνομα συνδέσμου στο αριστερά άκρο επίσης *BL* (το δεξί άκρο της συγκεκριμένης δοκού βρίσκεται στο μέσον του πλαισίου όπου δεν ορίζεται στοιχείο συνδέσμου).
- Δεξιά δοκός: Όνομα γραμμικού στοιχείου *BR* και όνομα συνδέσμου στο δεξί άκρο επίσης *BR* (το αριστερό άκρο της συγκεκριμένης δοκού βρίσκεται στο μέσον του πλαισίου όπου δεν ορίζεται στοιχείο συνδέσμου).

Η μετονομασία μπορεί να γίνει με δεξιά *click* στο κάθε στοιχείο και αλλαγή του πεδίου *Assignments: Label*, ενώ απαιτείται η χρήση των εργαλείων μεγέθυνσης για την επιλογή και μετονομασία των στοιχείων συνδέσμων.



Σχήμα 13.5 Φορά σχεδίασης των συνδέσεων (αριστερά) και μορφή συνδέσμου στη βάση υποστυλώματος με πάκτωση του κόμβου βάσης (δεξιά).

13.4. Ιδιότητες υλικού φορέα

Η κατηγορία οπλισμένου σκυροδέματος του πλαισίου ορίζεται ως *C20/25*, συνεπώς προκύπτει τιμή μέτρου ελαστικότητας ίση με $E=3 \cdot 10^7 \text{ kPa}$ (*EC2, Table 3.1*). Η συγκεκριμένη τροποποίηση (τύπου υλικού, ονόματος και τιμής του μέτρου ελαστικότητας) γίνεται με *Define* → *Materials* και *Modify/Show* στο υλικό *MATERIAL* που προϋπήρχε στο συγκεκριμένο αρχείο. Ο δείκτης *Poisson* παραμένει μηδενικός (ρηγματωμένο σκυρόδεμα), ενώ δεν τίθεται πυκνότητα και ειδικό βάρος βάσει των δεδομένων της εκφώνησης. Η τελική εικόνα του υλικού εμφανίζεται στο Σχήμα 13.6.

Ιδιότητες ανελαστικής συμπεριφοράς υλικού κατά τη δυναμική ανελαστική ανάλυση με μη-γραμμικά στοιχεία συνδέσμου (*Nonlinear Links*)

Κατά τον ορισμό των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στο Κεφάλαιο 12 (ανελαστική στατική ανάλυση), χρησιμοποιήθηκαν οι πλήρεις ιδιότητες του υλικού (*Advanced Properties*) όπου ορίστηκαν χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης, ώστε να ληφθούν καταλλήλως υπόψη κατά τον υπολογισμό της ανελαστικής συμπεριφοράς των διατομών από το πρόγραμμα.

Στην περίπτωση του τρέχοντος παραδείγματος αυτό δεν απαιτείται, καθώς η ανελαστική συμπεριφορά των διατομών ορίζεται από τον χρήστη εντός των στοιχείων μη-γραμμικών συνδέσμων (*Nonlinear Links*) και όχι ως συνδυασμός ιδιοτήτων όπλισης και υλικού σε κάθε διατομή. Για τον ίδιο λόγο δεν απαιτείται ούτε ο προσδιορισμός του οπλισμού στις διατομές δοκού και υποστυλωμάτων, ενώ και η τιμή θλιπτικής αντοχής που τέθηκε για το σκυρόδεμα *C20/25* δεν θα χρησιμοποιηθεί από το πρόγραμμα για τον προσδιορισμό παραμέτρων ανελαστικής συμπεριφοράς του υλικού.

Σχήμα 13.6 Τελική ονομασία και ιδιότητες υλικού σκυροδέματος κατηγορίας C20/25.

13.5. Ιδιότητες πλαστικών αρθρώσεων

Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων στο συγκεκριμένο παράδειγμα γίνεται με την εισαγωγή συνδέσμων (*Links*), οι οποίοι προσομοιώνουν σημειακές πλαστικές αρθρώσεις σε κατάλληλες διατομές των εν λόγω στοιχείων. Η συνήθης περίπτωση είναι η εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στην αρχή και στο τέλος των δομικών στοιχείων, θέσεις όπου είναι πιθανότερη η εμφάνιση ανελαστικής συμπεριφοράς όταν ο φορέας υποβάλλεται σε σεισμική καταπόνηση.

Οι πλαστικές αρθρώσεις στην κάθε διατομή ενεργοποιούνται μόνο όταν η τιμή της αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής ξεπεράσει την αντίστοιχη της ροπής διαρροής. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο συμπεριφέρεται ελαστικά και οι πλαστικές αρθρώσεις που έχουν τοποθετηθεί δεν επηρεάζουν την απόκρισή του.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των πλαστικών αρθρώσεων είναι η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών και της όπλισης των αντίστοιχων διατομών. Οι τιμές της ροπής διαρροής που δίδονται στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αντιστοιχούν στις τιμές που έχουν προκύψει από την αναλυτική εισαγωγή των στοιχείων της κάθε διατομής στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 12 και τον αυτόματο υπολογισμό που έγινε από το πρόγραμμα. Επισημαίνεται πως οι τιμές για τη ροπή διαρροής των υποστυλωμάτων προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη αξονικό φορτίο από το συνδυασμό φόρτισης των κατακόρυφων φορτίων ($G+0.3Q$).

Ο ορισμός των ιδιοτήτων των μη-γραμμικών συνδέσμων γίνεται από την εντολή *Define* → *Section Properties* → *Link/Support Properties* όπου προστίθενται νέοι σύνδεσμοι με το *Add New Property*. Δημιουργούνται

δύο ομάδες μη-γραμμικών συνδέσμων, *NLBEAM* για τη δοκό και *NLCOL* για τα υποστυλώματα, χρησιμοποιώντας τον τύπο συνδέσμου *Multilinear Plastic*.

Ενδεικτικά, στην περίπτωση της δοκού (*NLBEAM*), οι βασικές παράμετροι του στοιχείου συνδέσμου (*Link*), όπως και οι ιδιότητες του στις διευθύνσεις *U1* και *U2* που παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά, εμφανίζονται στο Σχήμα 13.7. Όμοιες είναι οι τιμές και στις αντίστοιχες ιδιότητες του στοιχείου συνδέσμου για τα υποστυλώματα (*NLCOL*).

Η παράμετρος που θα προσδώσει τη ζητούμενη ανελαστική συμπεριφορά σε κάμψη αφορά τη διεύθυνση *R3* (γύρω από τοπικό άξονα *3*, δηλαδή τον άξονα *Y*). Τα σημεία του διαγράμματος πλαστικής στρώσης - ροπής κάμψης για τις διατομές της δοκού και των υποστυλωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.1. Η μεταφορά τους στο πρόγραμμα γίνεται με συμπλήρωση του πεδίου *Multi-Linear Force Deformation Definition*, προσθέτοντας όταν χρειάζεται νέες γραμμές με την εντολή *Add Row*. Επισημαίνεται ότι για λόγους συμφωνίας με την ανελαστική στατική ανάλυση του προηγούμενου Κεφαλαίου (Σχήματα 12.23 και 12.25), χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχες τιμές πλαστικής στρώσης, όπως προβλέπονται από τη *FEMA 356 (Tables 6.7-6.8)*. Η μεταφορά των στοιχείων του Πίνακα στις ιδιότητες του συνδέσμου κατά τη διεύθυνση *R3* εμφανίζεται στο Σχήμα 13.8 για τη δοκό και στο Σχήμα 13.9 για τα υποστυλώματα. Δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην τιμή της ενεργού δυσκαμψίας του συνδέσμου (*Effective Stiffness=1000000* στη συγκεκριμένη περίπτωση), καθώς θα πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να μην αλλοιωθεί η συμπεριφορά του φορέα.

Μετά τον καθορισμό των ιδιοτήτων των στοιχείων *Link*, γίνεται προσεκτικά η επιλογή τους από το παράθυρο σχεδίασης και η ανάθεση στο καθένα από αυτά του κατάλληλου τύπου συνδέσμου (*Assign → Link/Support → Link/Support Properties*). Έτσι, ανατίθεται ιδιότητα *NLBEAM* για τους συνδέσμους στα άκρα της δοκού και *NLCOL* για τους συνδέσμους στη βάση και κορυφή των υποστυλωμάτων.

Στροφή (δοκός) (rad)	Ροπή (δοκός) (kNm)	Στροφή (στύλοι) (rad)	Ροπή (στύλοι) (kNm)
-0.05	-29.60	-0.025	-44.00
-0.025	-29.60	-0.015	-44.00
-0.0249	-162.78	-0.0149	-242.00
-0.0001	-147.98	-0.0001	-220.00
0	0	0	0
0.0001	101.22	0.0001	220.00
0.0249	111.34	0.0149	242.00
0.025	20.24	0.015	44.00
0.05	20.24	0.025	44.00

Πίνακας 13.1 Τιμές ιδιοτήτων πλαστικής στρώσης - ροπής κάμψης για τις διατομές δοκού και υποστυλωμάτων.

Καθορισμός βασικών ιδιοτήτων στοιχείων συνδέσμων (*Links*)

Τα στοιχεία *Link* ορίζονται με τοπικούς άξονες όμοια με τους τοπικούς άξονες των γραμμικών στοιχείων. Έτσι, στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου επιλύεται πλαίσιο σε επίπεδο *XZ*, ενεργοποιούνται οι άξονες *1* (πάντα κατά μήκος του στοιχείου), *2* (κατά *Z* για τη δοκό και κατά *X* για τους στύλους) και γύρω από τον *3* (δηλαδή γύρω από τον άξονα *Y* τόσο για τη δοκό όσο και για τους στύλους).

Όπως φαίνεται στα σχήματα, για την ορθή λειτουργία του στοιχείου ορίζονται κάποιες μικρές τιμές στη μάζα και τη ροπή αδράνειας μάζας. Ακόμη, κατά τους βαθμούς ελευθερίας που δεν εμφανίζουν μη-γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή *U1* και *U2*, θα πρέπει να δοθεί κάποια μεγάλη τιμή στην ενεργό δυσκαμψία (π.χ *Effective Stiffness=10⁷*). Αυτό οφείλεται στο ότι το στοιχείο-σύνδεσμος καταλαμβάνει ένα μικρό μήκος ως τμήμα της δοκού ή του στύλου, οπότε θα πρέπει η δυσκαμψία του να μην μεταβάλλει τη δυσκαμψία του δομικού στοιχείου στο οποίο ανήκει. Μικρή τιμή δυσκαμψίας σε αυτό θα προσέδιδε

λανθασμένα μειωμένη δυσκαμψία στα άκρα του δομικού στοιχείου, αλλάζοντας τις συνθήκες πλευρικής του στήριξης και άρα μεταβάλλοντας τα δυναμικά χαρακτηριστικά του φορέα γενικότερα. Καθώς η ανάλυση αφορά φορέα στο επίπεδο XZ , η συμπεριφορά στους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας δεν εμπλέκεται στην ανάλυση και δεν διαφοροποιείται περαιτέρω ($U3$, $R1$, $R2$).

Καθορισμός μη-γραμμικών ιδιοτήτων στοιχείων συνδέσμων (Links)

Η χρήση του στοιχείου μη-γραμμικού συνδέσμου *Multilinear Plastic* έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- δυνατότητα διαφορετικής τιμής ροπής διαρροής σε θετικό και αρνητικό κλάδο,
- δυνατότητα καθορισμού του τύπου υστερητικής συμπεριφοράς της πλαστικής άρθρωσης (*Kinematic*, *Takeda*, *Pivot*),
- δυνατότητα πλήρους ορισμού της ανελαστικής συμπεριφοράς της διατομής, με βάση το διάγραμμα του Σχήματος 12.14 του Κεφαλαίου 12 (*KAN.ΕΠΕ. §7.1.2.2 και ASCE 41-13 Figure 10-1*).

Η αυξημένη τιμή ροπής αστοχίας σε σχέση με τη ροπή διαρροής (κράτυνση), πέρα από την αποτύπωση της πραγματικής συμπεριφοράς διατομών οπλισμένου σκυροδέματος, συχνά απαιτείται για λόγους ευστάθειας της αριθμητικής ανάλυσης (*KAN.ΕΠΕ. §57.1.2.3*). Οι τιμές ροπής αστοχίας του Πίνακα 13.1 έχουν προκύψει με προσαύξηση των ροπών διαρροής κατά 10% λόγω κράτυνσης, σύμφωνα με τα δεδομένα του παραδείγματος.

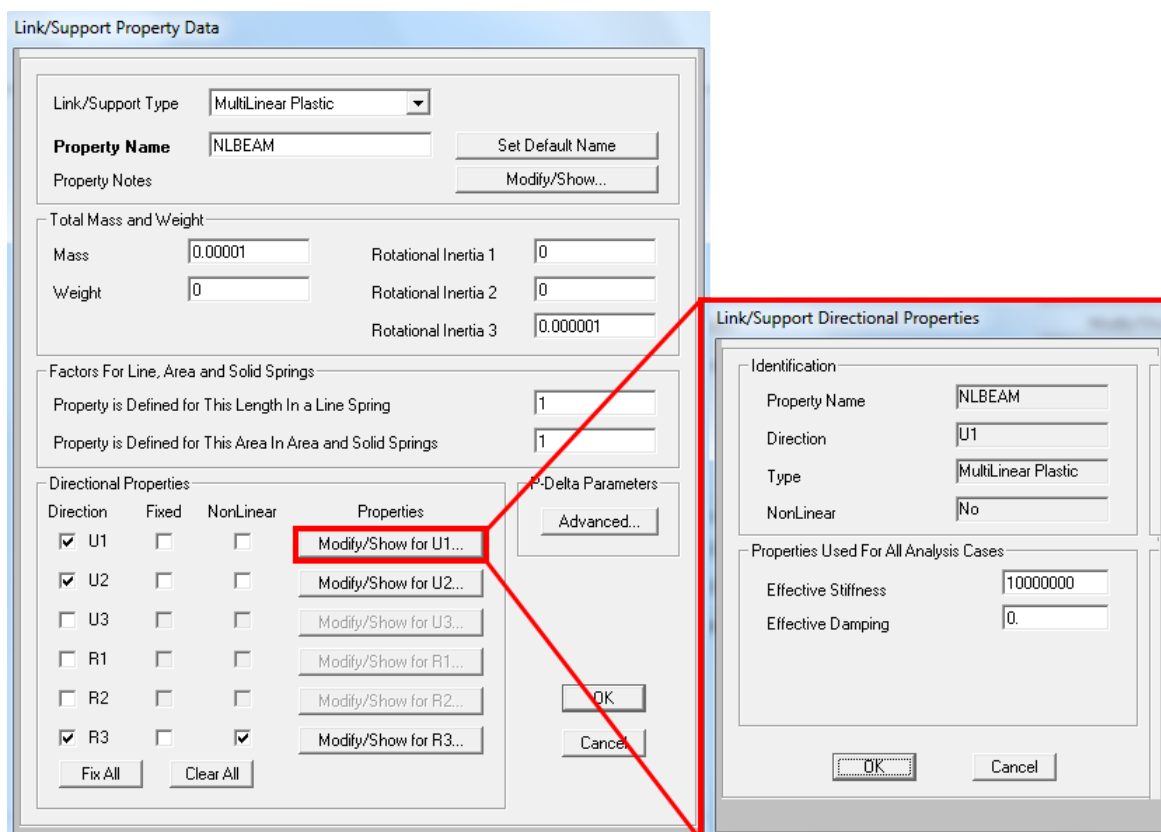
Ως τύπος υστέρησης επιλέγεται το μοντέλο *Takeda* (Takeda, Sozen, & Nielsen, 1970) που είναι κατάλληλο για την περιγραφή της ανελαστικής συμπεριφοράς διατομών οπλισμένου σκυροδέματος με κυρίαρχη καμπτική καταπόνηση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Karros & Penelis, 2010).

Κατά τον ορισμό των μη-γραμμικών παραμέτρων ($R3$ στο παράδειγμα), υπάρχουν δυο διακριτές ομάδες δεδομένων (Σχήμα 13.8 και 13.9):

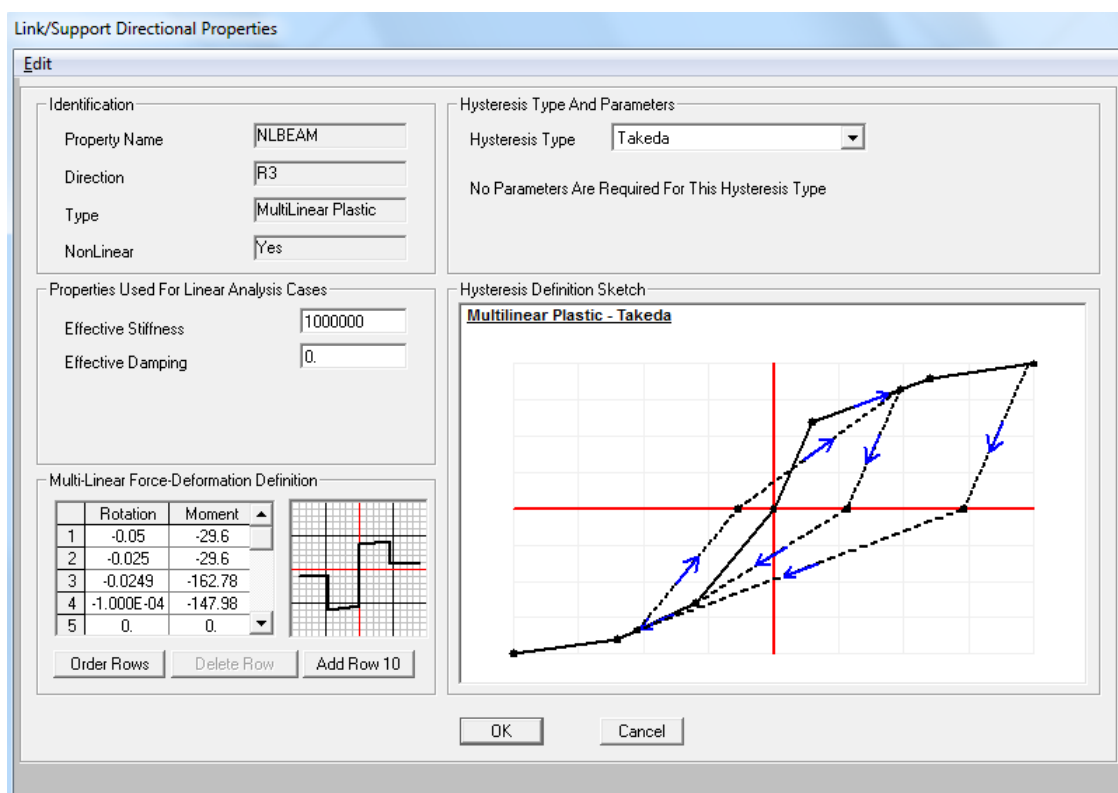
- Παράμετροι για γραμμικές ελαστικές αναλύσεις (*Properties Used for Linear Analysis Cases*): Ορίζεται ενεργός δυσκαμψία με σημαντική τιμή, για να μην αλλοιώσει τη συνολική δυσκαμψία του γραμμικού στοιχείου που ανήκει ο σύνδεσμος κατά την εκτέλεση ελαστικών αναλύσεων (π.χ. ιδιομορφικής ανάλυσης). Δίδεται όμως προσοχή η τιμή που θα επιλεγεί να μην είναι υπερβολική, για να μην διαφοροποιεί σημαντικά την απόκριση του φορέα. Η συγκεκριμένη παράμετρος ενδέχεται να απαιτεί δοκιμαστικές αναλύσεις για τον βέλτιστο καθορισμό της τιμής της, όπως θα αναφερθεί και σε επόμενη παράγραφο.
- Παράμετροι για μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις (*Properties Used for Nonlinear Analysis Cases*): Ορίζεται με ζεύγη τιμών το διάγραμμα πλαστικής στροφής – ροπής κάμψης για την κάθε διατομή.

Κατά τον ορισμό των ιδιοτήτων της ανελαστικής συμπεριφοράς των διατομών (διάγραμμα ροπής-στροφής), επισημαίνεται πως δεν επιτρέπεται να δοθεί ίδια τιμή στροφής σε διαδοχικά σημεία. Για τον λόγο αυτόν, στις θέσεις αλλαγής κλάδου του διαγράμματος ροπής-στροφής θα πρέπει να δίνονται διπλά σημεία με ελάχιστα διαφορετική τιμή πλαστικής στροφής, σύμφωνα με τον Πίνακα 13.1. Με τον τρόπο αυτόν το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται σωστά τη διαδρομή των ροπών-στροφών που ορίζεται από τον χρήστη.

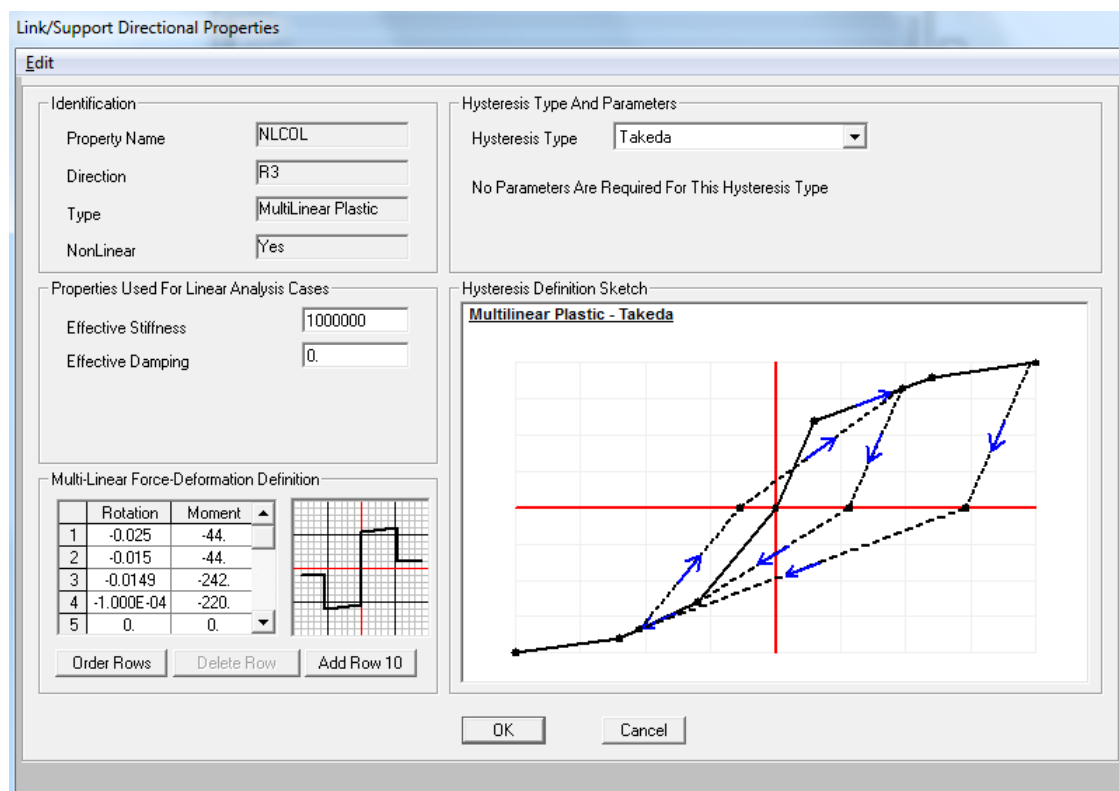
Σημειώνεται πως υπάρχουν κάποιες αδυναμίες στον συγκεκριμένο τρόπο χαρακτηρισμού της ανελαστικής συμπεριφοράς μιας διατομής. Έτσι, αναπόφευκτα, κατά τον υπολογισμό της ροπής διαρροής για ένα στοιχείο *Link* που αναφέρεται σε διατομή υποστυλώματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κάποια συγκεκριμένη τιμή αξονικού αλλά και ταυτόχρονης τιμής ροπής στην άλλη διεύθυνση, καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών μεγεθών. Εδώ επιλέγεται η χρήση της τιμής του αξονικού φορτίου που αφορά τις κατακόρυφες δράσεις στον φορέα $G+0.3Q$. Η ροπή διαρροής του στοιχείου πλέον θεωρείται σταθερή, παρόλο που το επίπεδο του αξονικού φορτίου στα υποστυλώματα μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης.



Σχήμα 13.7 Ορισμός Link τύπου *MultiLinear Plastic* για τη δοκό (αριστερά) και ιδιότητες κατά τις διευθύνσεις γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς U1-U2 (δεξιά). Με όμοιο τρόπο ορίζονται οι αντίστοιχες ιδιότητες του Link για τα υποστυλώματα (ονομασία *NLCOL*)



Σχήμα 13.8 Ιδιότητες ανελαστικής συμπεριφοράς στο στοιχείο συνδέσμου (Link) για τη διατομή δοκού (ορισμός διαγράμματος στροφής-ροπή).



Σχήμα 13.9 Ιδιότητες ανελαστικής συμπεριφοράς στο στοιχείο συνδέσμου (Link) για τη διατομή υποστυλώματος (ορισμός διαγράμματος στροφής-ροπής).

13.6. Ορισμός ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης στο SAP 2000

Όπως αναλύθηκε στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 11, η δυναμική ανάλυση ενός φορέα με χρονοϊστορία επιταχύνσεων μπορεί να γίνει τόσο με τη μέθοδο της επαλληλίας των ιδιομορφών όσο και με απευθείας αριθμητική ολοκλήρωση στο πεδίο του χρόνου. Στην περίπτωση της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης στο *SAP 2000*, προτείνεται από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος η μέθοδος επαλληλίας των ιδιομορφών. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου θα αναλυθεί η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, ενώ θα παρουσιαστούν μεμονωμένα σχόλια αναφορικά με τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο. Σημειώνεται πως στην περίπτωση της μεθόδου επαλληλίας των ιδιομορφών θα πρέπει να προηγηθεί ο ορισμός μιας ιδιομορφικής ανάλυσης, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

Μέθοδοι δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης

Η μέθοδος που συνήθως χρησιμοποιείται για τη διενέργεια δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης ενός φορέα με χρονοϊστορία επιταχύνσεων είναι η προσέγγιση της απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο (Κεφάλαιο 11). Καθώς ο προσδιορισμός σταθερών ιδιομορφών δεν είναι δυνατός σε φορέα που επιδεικνύει ανελαστική συμπεριφορά, λόγω της συνεχώς μειούμενης δυσκαμψίας σε κάθε βήμα της ανάλυσης, η μέθοδος επαλληλίας των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκε κατά τη δυναμική ελαστική ανάλυση θεωρείται αρχικά ακατάλληλη. Ειδικά όμως για περιπτώσεις στατικών συστημάτων με προκαθορισμένες θέσεις σημειακής πλαστιμότητας, έχει αναπτυχθεί μια τροποποιημένη προσέγγιση της μεθόδου επαλληλίας των ιδιομορφών η οποία χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα *SAP 2000*, οδηγώντας μάλιστα ευκολότερα σε σύγκλιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (Ibrahimbegovic & Wilson, 1989; Wilson, 1993). Για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή της μεθόδου συνιστάται η εύρεση των ιδιομορφών μέσω των διανυσμάτων *Ritz* (*Ritz vectors*), τα οποία εξαρτώνται από την επιβαλλόμενη φόρτιση (Computers and Structures Inc., 2010). Η παρουσίαση της διαδικασίας γίνεται στις επόμενες παραγράφους.

13.6.1. Υπολογισμός ιδιομορφών με διανύσματα Ritz (Ritz modes)

Για τη χρήση της μεθόδου επαλληλίας των ιδιομορφών, απαιτείται ο ορισμός μιας νέας ιδιομορφικής ανάλυσης (*Define* → *Load Cases* → *Add New Load Case* με τύπο *Load Case Type: Modal*) που ονομάζεται *RITZMODES* και χρησιμοποιεί διανύσματα τύπου *Ritz* (*Type of Modes: Ritz Vectors*) σύμφωνα με το Σχήμα 13.10.

Καθορισμός παραμέτρων ιδιομορφικής ανάλυσης με διανύσματα Ritz

Κατά τον ορισμό της ιδιομορφικής κατάστασης με διανύσματα *Ritz*, ορίζονται ως αρχικά διανύσματα φόρτισης τα φορτία στατικού τύπου ή/και οι επιταχύνσεις που αντιστοιχούν στις δράσεις που εφαρμόζονται στον φορέα. Ειδικά στην περίπτωση της δυναμικής ανελαστική ανάλυσης, θα πρέπει να δοθούν και διανύσματα φόρτισης που διεγείρουν την ανελαστική συμπεριφορά των συνδέσμων (*Links*). Αυτό μπορεί να γίνει με την αυτοματοποιημένη επιλογή *Link-All*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.10. Τα υπόλοιπα φορτία που δρουν στον φορέα καλύπτονται από τη μορφή φόρτισης *G* (για τα κατακόρυφα) και από την επιτάχυνση κατά *X* (*Accel UX*) για τη δυναμική φόρτιση. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 13.10, δεν χρειάζεται να οριστούν τα μεταβλητά φορτία *Q*, καθώς αρκεί να περιλαμβάνεται ένα μόνο φορτίο από τον κάθε τύπο φόρτισης (εδώ τα κατακόρυφα κατανεμημένα φορτία εκπροσωπούνται από τα *G*).

Λαμβάνοντας υπόψη πως σε κάθε στοιχείο συνδέσμου (*Link*) έχει οριστεί τιμή μεταφορικής μάζας και ροπής αδράνειας μάζας, ο αριθμός των ζητούμενων ιδιομορφών (*Maximum number of modes*) τίθεται σκοπίμως αυξημένος ώστε να συμπεριλάβει τυχόν πρόσθετους δυναμικούς βαθμούς ελευθερίας που προκύπτουν.

Για τον καθορισμό του μέγιστου αριθμού διανυσμάτων *Ritz* που θα δημιουργηθούν για την κάθε φόρτιση (πεδίο *Maximum Cycles*), απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις και σχετική εμπειρία του μελετητή. Η μηδενική τιμή που τίθεται στο παρόν δεν καθορίζει κάποιο άνω όριο διανυσμάτων που θα υπολογιστούν, κάτι που ενδεχομένως αποδειχθεί υπολογιστικά δυσχερές για περιπτώσεις σύνθετων φορέων με μεγάλο αριθμό πιθανών πλαστικών αρθρώσεων. Τέλος, το πεδίο *Target Dynamic Participation Ratio* δεν είναι ενεργό στην έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιείται.

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dynamic Participation Ratios (%)
Load Pattern	G	0	0.
Accel	UX	0	0.
Link	All	0	0.
Load Pattern	G	0	0.

Σχήμα 13.10 Ιδιομορφική ανάλυση με διανύσματα Ritz.

13.6.2 Ορισμός ανάλυσης για την επιβολή κατακόρυφων φορτίων (ταυτόχρονων με τα σεισμικά)

Κατά τη διάρκεια της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, θα πρέπει ταυτόχρονα με τα σεισμικά να ασκούνται στον φορέα και τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας του συνδυασμού $G+0.3Q$. Για την επιβολή των στατικών φορτίων με τον συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος (CSI, 2010), θα πρέπει πριν τη δυναμική ανελαστική ανάλυση με τη χρονοϊστορία επιταχύνσεων να προηγηθεί μια επίσης ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας για τα κατακόρυφα φορτία.

Αρχικά, δημιουργείται από την εντολή *Define → Functions → Time History* μια χρονοϊστορία τύπου *RAMPTH* (ή τροποποιείται η υφιστάμενη), ώστε η αύξηση της φόρτισης που περιγράφεται από αρχική τιμή 0 έως τιμή 1 (επιβολή πλήρους φορτίου) να ολοκληρώνεται σε χρονικό διάστημα αρκετά μεγαλύτερο της ιδιοπεριόδου του φορέα. Τιμές δεκαπλάσιες της ιδιοπεριόδου (*Ramp Time=10*) θεωρούνται κατάλληλες προκειμένου η επιβολή της φόρτισης να είναι ψευδοστατική. Η συνάρτηση συνεχίζει με σταθερή τιμή μονάδα για τουλάχιστο άλλο τόσο χρονικό διάστημα, ώστε να σταθεροποιηθούν τα αποτελέσματα της κατακόρυφης φόρτισης στον φορέα.

Καθώς η διάρκεια επιβολής της παραπάνω χρονοϊστορίας εξαρτάται από την τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής, θα πρέπει να ληφθούν τα αποτελέσματα μιας κλασσικής ιδιομορφικής ανάλυσης (*Load Case Type: Modal* με χρήση *Eigen Vectors*). Μια τέτοια ανάλυση υπάρχει στο συγκεκριμένο αρχείο από την εφαρμογή του παραδείγματος στο Κεφάλαιο 11, διαφορετικά μπορεί να οριστεί εκ νέου και να εκτελεστεί άμεσα καθώς έχουν ήδη ανατεθεί τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και οι μάζες του πλαισίου. Εκτέλεση της ιδιομορφικής ανάλυσης δίνει τιμή θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ίση με $T=0.143s$. Σημειώνεται πως η ανάλυση θα πρέπει απαραίτητως να οριστεί σε επίπεδο *XZ*, καθώς δεν έχουν προβλεφθεί δεσμεύσεις στην απόκριση των συνδέσμων εκτός επιπέδου.

Από τα παραπάνω προκύπτει χρονικό διάστημα επιβολής της κατακόρυφης φόρτισης προσεγγιστικά ίσο με $1.5s$, περίπου δεκαπλάσιο της ιδιοπεριόδου, ενώ στη συνέχεια επιλέγεται να διαρκέσει άλλο τόσο ώστε να σταθεροποιηθεί ο φορέας (Σχήμα 13.11).

Συνδυασμοί φορτίων κατά την ανελαστική δυναμική ανάλυση

Στην περίπτωση γραμμικής ελαστικής ανάλυσης με χρονοϊστορία φόρτισης, ο συνδυασμός κατακόρυφων με τα οριζόντια φορτία μπορεί να γίνει με τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των αντίστοιχων φορτιστικών καταστάσεων μετά το πέρας της ανάλυσης, μέσω της εντολής *Load Combinations* (Κεφάλαιο 11).

Στην περίπτωση όμως ανελαστικής ανάλυσης η παραπάνω διαδικασία δεν είναι κατάλληλη, καθώς δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Αντίθετα, η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στον φορέα έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή τροποποίηση του φέροντος οργανισμού και την ανακατανομή των εντατικών μεγεθών, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη εφαρμογή των κατακόρυφων στατικών δράσεων και των οριζόντιων δυναμικών φορτίων. Με τον τρόπο αυτόν, η συμπεριφορά του φορέα σε κάθε βήμα ανελαστικής απόκρισης καθορίζεται από τις συνδυασμένες δράσεις που δρουν στο φέροντα οργανισμό, όπως άλλωστε συμβαίνει στην πραγματικότητα κατά τη σεισμική καταπόνηση μιας κατασκευής.

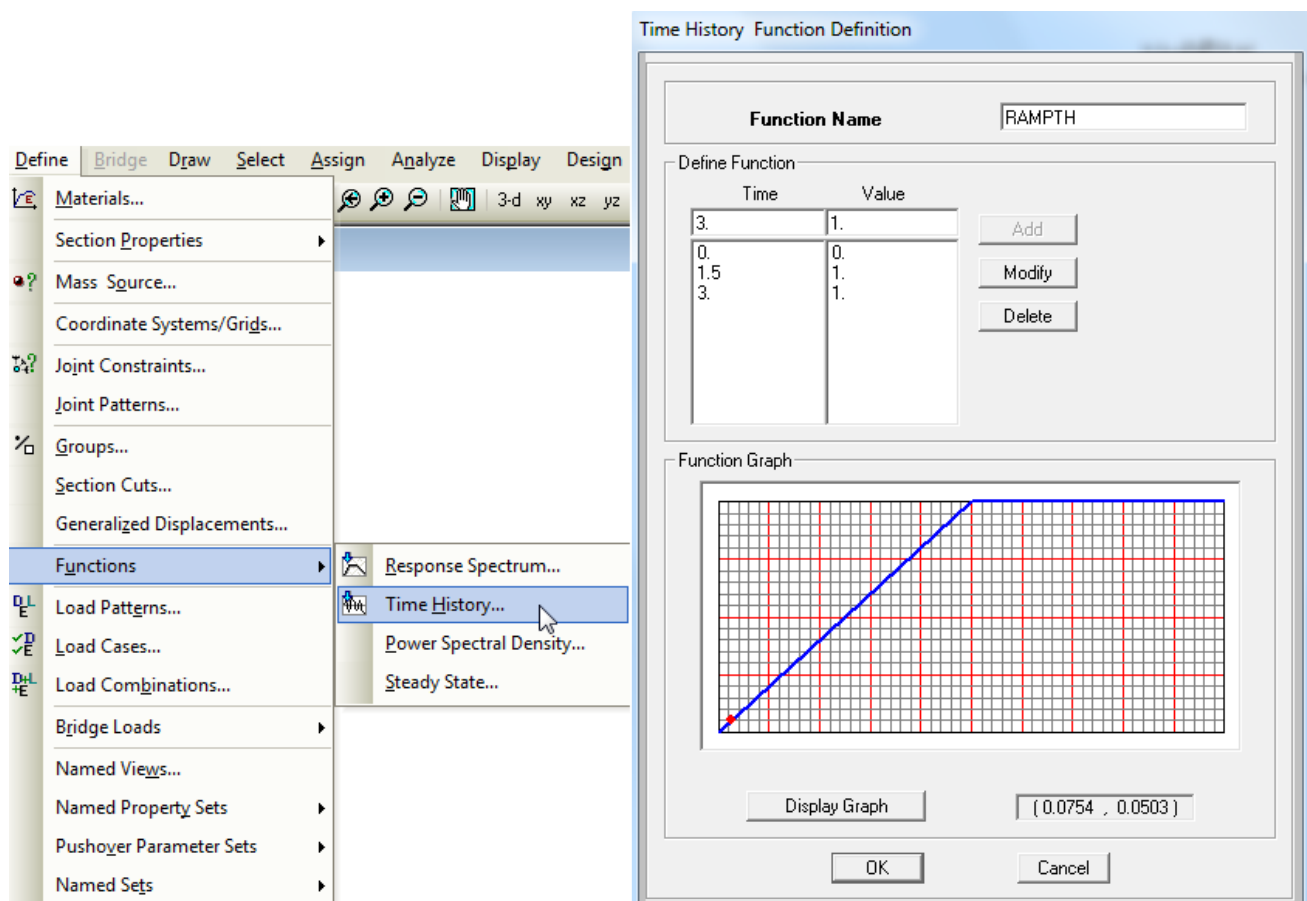
Κατά τη χρήση του προγράμματος *SAP 2000*, ειδικά για την ανελαστική δυναμική ανάλυση με τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών, απαιτείται η επιβολή των κατακόρυφων φορτίων να έχει γίνει με μια προηγούμενη ανάλυση του ίδιου τύπου (*FNA-Fast Nonlinear Analysis*).

Επιβολή φόρτισης στατικού τύπου μέσω ανελαστικής ανάλυσης χρονοϊστορίας

Για την επιβολή μιας φόρτισης στατικού χαρακτήρα, όπως αυτή που αφορά τα κατακόρυφα μόνιμα και μεταβλητά φορτία, μέσω ανελαστικής ανάλυσης χρονοϊστορίας, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα σταδιακής εφαρμογής της στον φορέα ώστε να μην προκαλέσει ανεπιθύμητη αδρανειακή απόκριση. Θα πρέπει συνεπώς, κατά τον καθορισμό των παραμέτρων της ανάλυσης, ο ρυθμός επιβολής των φορτίων να είναι σημαντικά μικρότερος της ιδιοπεριόδου του φορέα. Παράλληλα, μετά την επιβολή της πλήρους τιμής των

κατακόρυφων φορτίων, θα πρέπει να ακολουθεί ένα χρονικό διάστημα σταθεροποίησής τους με παράλληλο καθορισμό μεγάλης τιμής απόσβεσης, ώστε να «σβήσουν» όποιες ενδεχόμενες παρασιτικές ταλαντώσεις έχουν προκληθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Χρονική διάρκεια δεκαπλάσια της ιδιοπεριόδου του φορέα για την επιβολή της φόρτισης, όπως και αντίστοιχο χρονικό διάστημα για τη σταθεροποίησή της, θεωρούνται ασφαλείς επιλογές για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων.

Σημειώνεται πως κατά την ιδιομορφική ανάλυση που γίνεται στο παρόν, προκύπτει τιμή ιδιοπεριόδου ελάχιστα διαφορετική από την τιμή που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 11. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φορέα, καθώς τα γραμμικά δομικά στοιχεία έχουν πλέον μικρότερο μήκος, ενώ τμήμα της δυσκαμψίας τους αναπαρίσταται από τις τιμές δυσκαμψίας που έχουν οριστεί στα στοιχεία συνδέσμου. Στο σημείο αυτό, με σύγκριση των επιμέρους ιδιοπεριόδων, είναι δυνατός και ο έλεγχος των τιμών που έχουν τεθεί στο πεδίο *Effective Stiffness (Properties Used for Linear Analysis Cases)* των μη γραμμικών συνδέσμων, στον βαθμό ελευθερίας που αφορά την κάμψη του δομικού στοιχείου (*R3*). Τυχόν σημαντική απόκλιση της ιδιοπεριόδου που υπολογίστηκε στο παρόν σε σχέση με αυτή που είχε υπολογιστεί για τον φορέα δίχως τα στοιχεία συνδέσμου (*Links*), θα αποτελούσε ένδειξη εσφαλμένης επιλογής παραμέτρων προσομοίωσης των συνδέσμων που τοποθετήθηκαν στα άκρα των γραμμικών στοιχείων.



Σχήμα 13.11 Ορισμός χρονιοστορίας τύπου *RAMPTH* για την επιβολή κατακόρυφων στατικών φορτίων μέσω ανάλυσης χρονιοστορίας.

Η χρονιοστορία *RAMPTH* που ορίστηκε προηγουμένως, θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την επιβολή των κατακόρυφων στατικών φορτίων στον φορέα. Η φορτιστική κατάσταση ορίζεται από το *Define* → *Load Cases*, όπου προστίθεται μια ανάλυση τύπου *Time History* με ονομασία *NL-GRAVM* για τα κατακόρυφα φορτία *G+0.3Q* που συνυπάρχουν με το σεισμό (Σχήμα 13.12). Γίνεται χρήση των *RITZMODES* που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως, ενώ δίνεται προσοχή ώστε η απόσβεση κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης

ανάλυσης να λαμβάνει πολύ μεγάλη τιμή (π.χ. **0.99** από το *Modify/Show* στο *Modal Damping*). Ο συνολικός χρόνος της ανάλυσης (αριθμός χρονικών βημάτων **300** πολλαπλασιασμένος με τη διάρκεια του κάθε βήματος **0.01s**) θα πρέπει να συμπίπτει με τη συνολική διάρκεια της χρονοϊστορίας **RAMPTH**.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: NL-GRAVM [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Modal History []

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

Time History Type:

- Modal
- Direct Integration

Time History Motion Type:

- Transient
- Periodic

Modal Load Case: Use Modes from Case: RITZMODES

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	G	RAMPTH	1.
Load Pattern	G	RAMPTH	1.
Load Pattern	Q	RAMPTH	0.3

[Add] [Modify] [Delete]

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

- Number of Output Time Steps: 300
- Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters:

- Modal Damping: Constant at 0.99 [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Σχήμα 13.12 Ανάλυση για την επιβολή στατικών φορτίων.

13.6.3. Ορισμός δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα (μέθοδος επαλληλίας ιδιομορφών)

Για τον ορισμό της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης θα πρέπει να έχει προηγηθεί η εισαγωγή της επιθυμητής χρονοϊστορίας επιταχύνσεων. Η συγκεκριμένη διαδικασία για το αρχείο του παραδείγματος έχει γίνει στο Κεφάλαιο 11, συνεπώς το επιταχυνσιογράφημα υπάρχει ήδη στα δεδομένα, όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από το *Define* → *Functions* → *Time History* (αναζήτηση χρονοϊστορίας με την ονομασία **OAKLWHAF-1**).

Επιλογή χρονοϊστορίας επιταχύνσεων για τη δυναμική ανελαστική ανάλυση βάσει EC8

Ο **EC8** (§4.3.3.4.3) δίνει τη δυνατότητα μελέτης μιας κατασκευής με τη χρήση δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης, αν και στην περίπτωση της Ελλάδας το **Εθνικό Προσάρτημα του EC8** επιτρέπει τη χρήση μη γραμμικών μεθόδων μόνο συμπληρωματικά (§4.3.3.1(4)). Από τις επιμέρους παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων, αναφέρονται οι παρακάτω που αφορούν τη χρήση καταγραφών σεισμικών γεγονότων (**EC8 §3.2.3.1.2(4)** και **§3.2.3.1.3**):

- Θα πρέπει να επιλεγούν τουλάχιστο 3 επιταχυνσιογραφήματα ή περισσότερα.

- Οι καταγραφές που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να αφορούν αντίστοιχο σεισμοτεκτονικό περιβάλλον και εδαφικές συνθήκες με τη θέση μελέτης.
- Τα επιταχυνσιογραφήματα που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να κανονικοποιηθούν στην τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης της σεισμικής ζώνης που ανήκει η υπό εξέταση περιοχή.
- Στο εύρος περιόδων μεταξύ $0.2T_1$ και $2T_1$ (όπου T_1 η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της υπό μελέτη κατασκευής στη διεύθυνση σεισμικής φόρτισης), δεν θα πρέπει να υπάρχει τιμή του μέσου φάσματος των επιλεγμένων επιταχυνσιογραφημάτων που να είναι μικρότερη του 90% της τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης του **EC8** (αφορά πάντα φάσματα με 5% απόσβεση).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν επτά (7) ή περισσότερα επιταχυνσιογραφήματα κατά τη μελέτη, επιτρέπεται στο στάδιο της διαστασιολόγησης να ληφθεί υπόψη η μέση τιμή του μεγέθους απόκρισης που προκύπτει (**EC8 §4.3.3.4.3(3)**). Διαφορετικά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η δυσμενέστερη τιμή των επιμέρους αναλύσεων για το κάθε επιταχυνσιογράφημα.

Μια ενδιαφέρουσα ανάλυση της διαδικασίας επιλογής κατάλληλων επιταχυνσιογραφημάτων για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών γίνεται από τους Katsanos, Sextos and Manolis (2010), ενώ μια ανάλυση της βλαπτικότητας της κάθε καταγραφής σε όρους απορροφούμενης ενέργειας μπορεί να βρεθεί στους Koliopoulos and Kirtas (2002) και Koliopoulos, Panagoroulos and Mouratidis (2004). Παράλληλα, αν και δεν αναλύεται περαιτέρω στον **EC8**, θα πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή στην επιλογή της διεύθυνσης εφαρμογής των επιταχυνσιογραφημάτων, καθώς έχει αποδειχθεί πως μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη σεισμική απόκριση (Athanatoroulou, 2005· Kostinakis, Athanatoroulou, & Avramidis, 2013· Sextos, Pitilakis, Kirtas, & Fotaki, 2005).

Η μέθοδος δυναμικής ελαστικής ανάλυσης με επαλληλία ιδιομορφών παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 11. Η δυναμική ανελαστική ανάλυση ορίζεται από το *Define → Load Cases → Add New Case*, όπου επιλέγεται *Analysis Case Type: Time History* και *Analysis Type: Nonlinear* (Σχήμα 13.13). Στην ανάλυση δίνεται η ονομασία *NL-OAKLANDM-GQ*, ώστε να γίνεται άμεσα αντιληπτό πως αφορά ανελαστική ανάλυση (*NL*), με τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών (*MODES-M*) που περιλαμβάνει και τη δράση των κατακόρυφων φορτίων (*GQ*). Επιλέγεται η χρήση ιδιομορφών τύπου *Ritz* (*Use Modes From Case: RITZMODES*).

Η συγκεκριμένη δυναμική ανελαστική ανάλυση ξεκινά τη στιγμή που έχει ολοκληρωθεί η επιβολή των κατακόρυφων φορτίων. Ορίζεται συνεπώς η ανάλυση *NL-GRAVM* ως η αρχική κατάσταση πάνω στην οποία θα εφαρμοστεί η χρονοϊστορία επιταχύνσεων, επιτυγχάνοντας έτσι τη συνύπαρξη των κατακόρυφων φορτίων στην κατασκευή (πεδίο *Continue From State at End of Modal History*).

Καθώς ο στόχος του συγκεκριμένου παραδείγματος είναι η ανελαστική ανάλυση του φορέα, ζητήθηκε στα δεδομένα η χρήση ενός πολλαπλασιαστή 5 για τη συγκεκριμένη χρονοϊστορία, προκειμένου να ενισχυθεί η μέγιστη επιτάχυνση και να δώσει πλαστικοποίηση σε κάποια από τα δομικά στοιχεία. Ο τελικός πολλαπλασιαστής που θα χρησιμοποιηθεί στο πεδίο *Scale Factor* θα πρέπει να ισούται με 0.05, καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη και η μετατροπή των μονάδων της χρονοϊστορίας από cm/s^2 σε m/s^2 (υπενθυμίζεται πως οι τιμές επιταχύνσεων στο αρχείο από το οποίο έγινε εισαγωγή της χρονοϊστορίας δινόταν σε cm/s^2).

Από την επιλογή *Show Advanced Load Parameters* εμφανίζονται περισσότερες δυνατότητες καθορισμού της δυναμικής ανάλυσης. Σημειώνεται πως ο χρόνος έναρξης του σεισμικού φορτίου (*Arrival Time*) ορίζεται στα 0.0s, δεν απαιτείται δηλαδή καθορισμός χρονικής στιγμής που να περιλαμβάνει και τη διάρκεια επιβολής των κατακόρυφων φορτίων, καθώς η ανάλυση ξεκινά αυτόματα με αρχικές συνθήκες που έχουν προκύψει από την φορτιστική κατάσταση *NL-GRAVM*.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στον προσδιορισμό του χρονικού βήματος, στο πεδίο *Output Time Step Size*. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 11, το χρονικό βήμα θα πρέπει να αποτελεί πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο του βήματος με το οποίο δόθηκε η συνάρτηση της χρονοϊστορίας. Υπενθυμίζεται πως πρόκειται για το χρονικό βήμα εμφάνισης των αποτελεσμάτων και όχι το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στην εσωτερική διαδικασία της επίλυσης, το οποίο καθορίζεται με διαφορετικό τρόπο από το πρόγραμμα ώστε να επιτυγχάνεται σύγκλιση στην περίπτωση ανελαστικής συμπεριφοράς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ορίζεται χρονικό βήμα ίσο με 0.005s. Συχνά χρειάζεται επαναληπτική διαδικασία

ανάλυσης με διαφορετικό χρονικό βήμα, προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσον επιτυγχάνεται σύγκλιση και υπάρχει συνέπεια των αποτελεσμάτων κατά τις διαδοχικές αναλύσεις.

Ο συντελεστής απόσβεσης διατηρείται στην προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα τιμή, ίσος με **0.05 (5%)**. Υπενθυμίζεται πως στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι δυνατή η χρήση ενιαίου συντελεστή απόσβεσης για όλες τις ιδιομορφές.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: NL-OAKLANDM-GQ [Set Def Name] [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Modal History [NL-GRAVM]

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case [RITZMODES]

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

 Time History Type:

- Modal
- Direct Integration

 Time History Motion Type:

- Transient
- Periodic

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	OAKLWH	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.
Accel	U1	OAKLWHAF	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.

Show Advanced Load Parameters [Add] [Modify] [Delete]

Time Step Data:

- Number of Output Time Steps: 8000
- Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters:

- Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

 [OK] [Cancel]

Σχήμα 13.13 Δυναμική ανελαστική ανάλυση για τη σεισμική φόρτιση λαμβάνοντας υπόψη τη δράση των κατακόρυφων φορτίων (μέθοδος επαλληλίας ιδιομορφών).

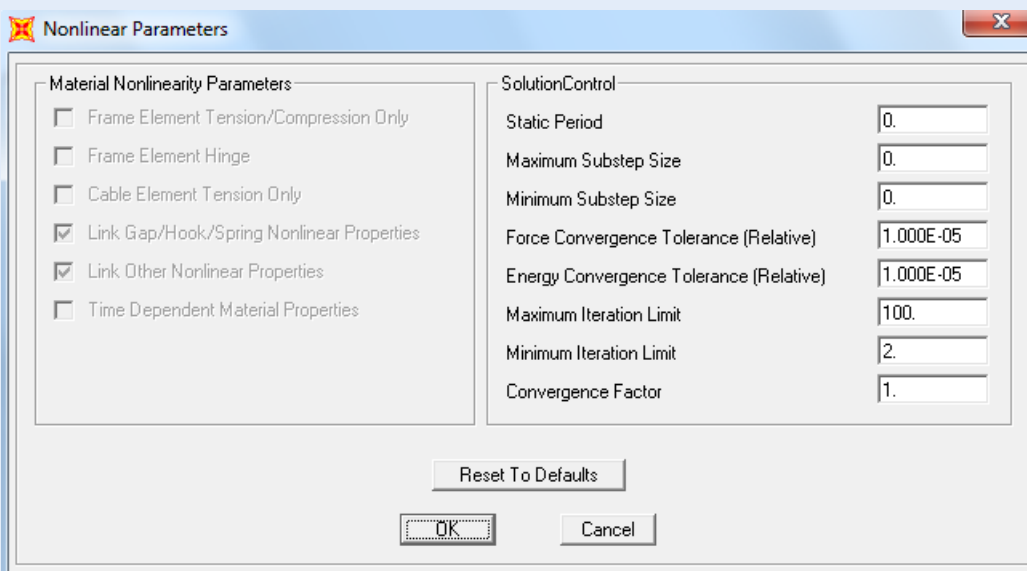
Παράμετροι ανελαστικής συμπεριφοράς κατά τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών

Κατά τη δυναμική ανελαστική ανάλυση με τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών, μπορούν να καθοριστούν οι παράμετροι ανελαστικής συμπεριφοράς (*Nonlinear Parameters*) που συμμετέχουν στη διαδικασία της επίλυσης (Σχήμα 13.14). Σημειώνεται πως οι προεπιλεγμένες τιμές είναι συνήθως κατάλληλες για την επίτευξη σύγκλισης. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες παράμετροι, η τροποποίηση των οποίων μπορεί να βελτιώσει ή να επιταχύνει τη διαδικασία επίλυσης:

- **Maximum Substep Size** (μέγιστο χρονικό βήμα): Συνήθως δεν επηρεάζει την ακρίβεια της ανάλυσης στην περίπτωση της μεθόδου επαλληλίας ιδιομορφών. Η μηδενική προεπιλεγμένη τιμή σημαίνει πως θα χρησιμοποιηθεί το χρονικό βήμα που τέθηκε στο πεδίο **Output Time Step Size**.
- **Minimum Substep Size** (ελάχιστο χρονικό βήμα): Όταν σε κάποιο χρονικό βήμα δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση, το πρόγραμμα αυτομάτως μειώνει το χρονικό βήμα και επαναλαμβάνει τη διαδικασία. Αν τεθεί τιμή ελάχιστου χρονικού βήματος, η ανάλυση θα σταματήσει εφόσον το πρόγραμμα επιχειρήσει να ορίσει χρονικό βήμα μικρότερο από αυτό.

- **Force Convergence Tolerance (Relative)** (ανοχή σφάλματος δύναμης για σύγκλιση): Στο πεδίο αυτό ορίζεται το ποσοστό σφάλματος, στην ισορροπία δυνάμεων, που γίνεται δεκτό κατά την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης, ώστε να θεωρηθεί πως στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα έχει επιτευχθεί σύγκλιση και η ανάλυση μπορεί να προχωρήσει σε επόμενο βήμα.
- **Energy Convergence Tolerance (Relative)** (ανοχή σφάλματος ενέργειας για σύγκλιση): Στο πεδίο αυτό ορίζεται το ποσοστό σφάλματος στη διαφορά του έργου εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων κατά την ανελαστική ανάλυση. Εξετάζεται αφού πρώτα στο δεδομένο χρονικό βήμα έχει επιτευχθεί σύγκλιση δυνάμεων. Στόχος της παραμέτρου είναι ο περιορισμός της ανελαστικής συμπεριφοράς που επιτρέπεται σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

Κατά την εκπόνηση ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, χρειάζεται συχνά η διενέργεια ενδιάμεσων «δοκιμαστικών» αναλύσεων ευαισθησίας, προκειμένου να καθοριστεί η επιρροή κάποιων παραμέτρων στην εκτέλεση της ανάλυσης και να ελεγχθεί η επίτευξη σύγκλισης. Πολύ μικρές μεταβολές παραμέτρων δεν δικαιολογούν σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων και μπορεί να αποτελούν ένδειξη αδυναμίας του προγράμματος να τρέξει κάποια συγκεκριμένη ανάλυση με τα δεδομένα που ορίζονται.



Σχήμα 13.14 Παράμετροι δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης κατά τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών.

13.6.4. Ορισμός δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με επιταχυνσιογράφημα (μέθοδος απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο)

Εναλλακτικά της προηγούμενης μεθόδου, η δυναμική ανελαστική ανάλυση με ιστορία επιταχύνσεων μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση της μεθόδου απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο (*direct integration method*). Στοιχεία της μεθόδου δυναμικής ελαστικής ανάλυσης με απευθείας ολοκλήρωση στο χρόνο παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 11. Εκτός από την περίπτωση των μη-γραμμικών συνδέσμων (*Links*), η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης, σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με χρήση των πλαστικών αρθρώσεων (*Hinges*). Καθώς η προτεινόμενη μέθοδος ανελαστικής ανάλυσης στο *SAP 2000* είναι αυτή της επαλληλίας ιδιομορφών, η χρήση της μεθόδου απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και αναλυτικούς ελέγχους για την επίτευξη σύγκλισης κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω δίνονται κάποιες πρόσθετες πληροφορίες στην περίπτωση που ο μελετητής επιλέξει να χρησιμοποιήσει και αυτή τη μέθοδο ανάλυσης.

Δυναμική ανελαστική ανάλυση με μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο

Η δυναμική ανελαστική ανάλυση με απευθείας ολοκλήρωση στο χρόνο μπορεί να οριστεί από το *Define* → *Load Cases* → *Add New Case*, όπου επιλέγεται *Analysis Case Type: Time History* και *Analysis Type: Nonlinear*. Η εικόνα μιας τέτοιας ανάλυσης φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 13.15. Όπως γίνεται αντιληπτό, όμοια με την περίπτωση της μεθόδου επαλληλίας ιδιομορφών, για τον ταυτόχρονο υπολογισμό των κατακόρυφων δράσεων πρέπει να προηγηθεί μια ανελαστική ανάλυση επιβολής των κατακόρυφων φορτίων (ενδεικτική ονομασία στο *NL-GRAVDI* στο Σχήμα 13.15).

Κατά τον ορισμό της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με τη μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο, ισχύουν οι γενικές αρχές που περιγράφηκαν στην περίπτωση της αντίστοιχης δυναμικής ελαστικής ανάλυσης του φορέα (Κεφάλαιο 11). Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις παραμέτρους που έχουν να κάνουν με το χρονικό βήμα της ανάλυσης, τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης, αλλά και τις γενικότερες ανελαστικές παραμέτρους, καθώς ενδέχεται να υπάρχει πρόβλημα σύγκλισης και ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 11, κατάλληλο χρονικό βήμα στην περίπτωση μη γραμμικών ανελαστικών αναλύσεων θεωρείται το $\Delta t = T_{min}/20$, αν και απαιτείται πάντα προσεκτική επιλογή βάσει του προβλήματος που εξετάζεται (Cook, Malkus, & Plesha, 1989). Συνήθως η μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος για έργα μηχανικού λαμβάνεται περίπου στα 12-15Hz, οπότε το χρονικό βήμα μπορεί να προσδιοριστεί:

$$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{20} = \frac{1}{f_{max} \cdot 20} = \frac{1}{12 \cdot 20} = 0.00416s \quad (13.1)$$

Καθώς υπάρχει η πρόσθετη απαίτηση για βήμα υποπολλαπλάσιο του βήματος της χρονοϊστορίας, στο παρόν θα μπορούσε να επιλεγεί η τιμή *0.005s*.

Η απόσβεση είναι μορφής *Rayleigh* (*Other Parameters: Damping*), και προσδιορίζεται σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 11 (Σχήμα 11.14). Λαμβάνοντας υπόψη την ακριβή τιμή ιδιοπεριόδου του φορέα, γίνεται αντιληπτό πως η απόσβεση που θα επιτευχθεί με τις παραμέτρους του Σχήματος 11.14 θα έχει τιμή λίγο μεγαλύτερη από 4%.

Στο πεδίο *Time Integration* ορίζεται η διαδικασία αριθμητικής ολοκλήρωσης που θα ακολουθηθεί κατά την επίλυση. Σε περίπτωση που παρουσιάζεται πρόβλημα σύγκλισης, προτείνεται από εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης *Hilber-Hughes-Taylor*, αρχικά με τιμή συντελεστή *Alpha=-1/3* για μια πρώτη προσέγγιση. Στη συνέχεια μπορεί να επιχειρηθεί συνεχής μείωση του χρονικού βήματος ανάλυσης και της τιμής του *Alpha*, για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων (συνήθως έως ότου υπάρξει σύγκλιση με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κύκλου). Σημειώνεται πως η παράμετρος *Alpha* λαμβάνει τιμές από 0 έως -1/3, ενώ η τιμή 0 αντιστοιχεί στη μέθοδο *Newmark* με παραμέτρους $\gamma=0.5$ και $\beta=0.25$ που αποτελεί τη μέθοδο μέσης επιτάχυνσης ή τον κανόνα τραπεζίου (*trapezoidal rule*). Για τιμή *Alpha=0* επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων κατά την ανάλυση, ενώ όσο μεγαλύτερες γίνονται οι αρνητικές τιμές του *Alpha* τόσο δημιουργείται τεχνητή απόσβεση των υψίσυχνων συστατικών της απόκρισης.

Τέλος, η διαδικασία της επίλυσης μπορεί να διαφοροποιηθεί από μια σειρά παραμέτρων ανελαστικής ανάλυσης (*Nonlinear Parameters*). Σημειώνεται όμως πως η τροποποίηση των προτεινόμενων τιμών για τις συγκεκριμένες παραμέτρους απαιτεί προσεκτική διερεύνηση της επιρροής τους και σχετική εμπειρία του μελετητή.

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: NL-OAKLANDDI-GQ [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case [NL-GRAVDI]

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

Time History Type:

- Modal
- Direct Integration

Modal Load Case: Use Modes from Case [RITZMODES]

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	OAKLWH	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.
Accel	U1	OAKLWHAF	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.

Show Advanced Load Parameters [Add] [Modify] [Delete]

Time Step Data:

- Number of Output Time Steps: 8000
- Output Time Step Size: 5.000E-03

Time History Motion Type:

- Transient
- Periodic

Other Parameters:

- Damping: [Proportional Damping] [Modify/Show...]
- Time Integration: [Hilber-Hughes-Taylor] [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: [Default] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Σχήμα 13.15 Δυναμική ανελαστική ανάλυση για τη σεισμική φόρτιση λαμβάνοντας υπόψη τη δράση των κατακόρυφων φορτίων (μέθοδος απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο).

13.6.5. Ορισμός πρόσθετων δυναμικών αναλύσεων

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράφηκε η διαδικασία ορισμού της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης, με τρόπο ώστε να λαμβάνονται υπόψη και τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στον φορέα, όπως άλλωστε συμβαίνει στην πραγματικότητα κατά τη σεισμική καταπόνηση μιας κατασκευής. Για λόγους ελέγχου της ορθότητας των ανελαστικών αναλύσεων, συνηθίζεται ο ορισμός πρόσθετων δυναμικών ελαστικών και ανελαστικών αναλύσεων δίχως τη συνύπαρξη των κατακόρυφων φορτίων, ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός ανελαστικής συμπεριφοράς του φορέα και να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερη εξαγωγή συμπερασμάτων από τις διάφορες συγκρίσεις.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ορίζεται μια επιπλέον δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας με ονομασία *NL-OAKLANDM* (Σχήμα 13.16), που αφορά τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών και είναι παρόμοια με αυτή που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 13.6.3 δίχως όμως την ύπαρξη των κατακόρυφων φορτίων (επιλέγεται *Zero Initial Conditions – Start From Unstressed State* για μηδενικές αρχικές συνθήκες).

Παράλληλα, για την επισκόπηση των αποτελεσμάτων του επιταχυνσιογραφήματος σε συνθήκες ελαστικής απόκρισης φορέα, τροποποιούνται οι δυο υφιστάμενες καταστάσεις δυναμικής ελαστικής ανάλυσης *OAKLANDM* και *OAKLANDI* που προϋπήρχαν από το αρχείο του Κεφαλαίου 11, θέτοντας πολλαπλασιαστή *Scale Factor=0.05* ώστε να είναι συγκρίσιμες με τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων που ορίστηκαν προηγουμένως.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: NL-OAKLANDM Notes:

Load Case Type: Time History

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type: Linear Nonlinear
 Time History Type: Modal Direct Integration

Modal Load Case: Use Modes from Case: RITZMODES

Time History Motion Type: Transient Periodic

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	OAKLWH	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.
Accel	U1	OAKLWHAF	0.05	1.	0.	GLOBAL	0.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 8000
 Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05
 Nonlinear Parameters: Default

Σχήμα 13.16 Δυναμική ανελαστική ανάλυση για τη σεισμική φόρτιση (δίχως κατακόρυφα φορτία) με τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών.

13.7. Ανάλυση φορέα και ανάγνωση αποτελεσμάτων

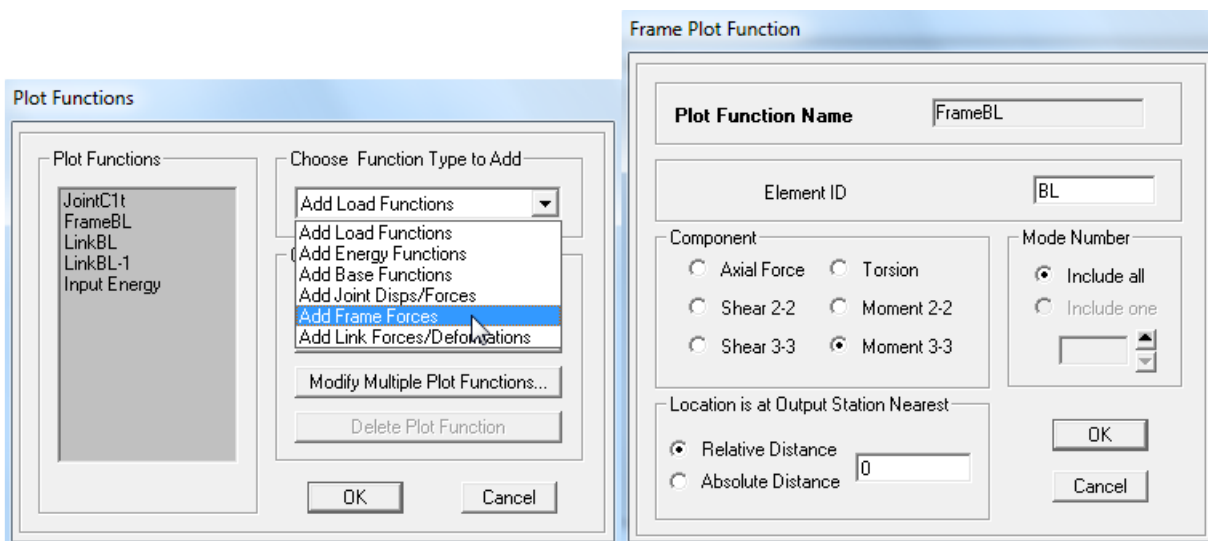
Ο φορέας είναι πλέον έτοιμος για ανάλυση από την εντολή *Analyze* → *Run Analysis* και *Run Now*. Καθώς η διαδικασία περιλαμβάνει ανελαστικές αναλύσεις με χρονοϊστορία μεγάλου αριθμού βημάτων, ο χρόνος ολοκλήρωσης αναμένεται να είναι σημαντικός, αναλόγως και του βαθμού πλαστικοποίησης του φορέα.

Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων εμφανίζονται αναλυτικά από το *Display* → *Show Plot Functions*, όμοια με την περίπτωση δυναμικής ελαστικής ανάλυσης (Κεφάλαιο 11, §11.5.1), ενώ με την επιλογή *Define Plot Functions* μπορούν να καθοριστούν τα προς εμφάνιση μεγέθη. Κατά τη δυναμική ανελαστική ανάλυση διαπιστώνονται οι εξής διαφοροποιήσεις:

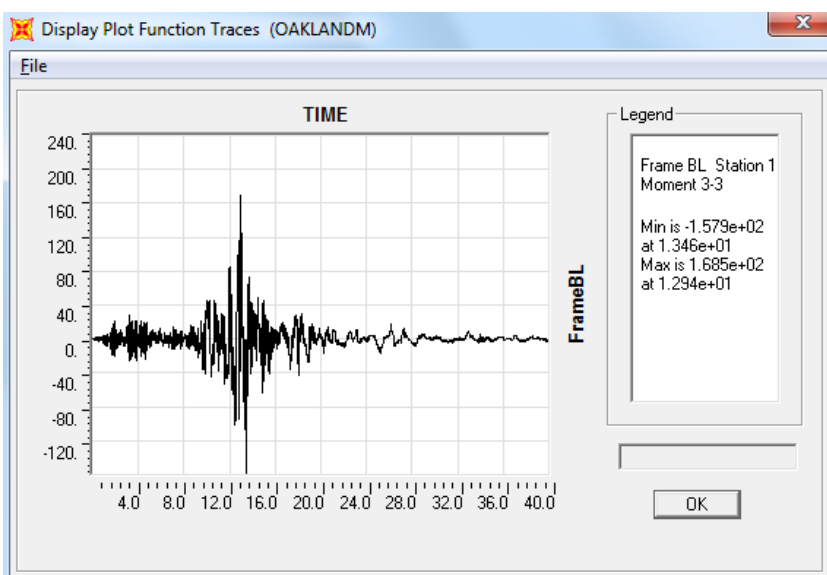
- **Add Energy Functions:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες διαφόρων τύπων ενέργειας κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στην περίπτωση δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφών, συμπεριλαμβάνεται και η υστερητική ενέργεια (*Link Hysteretic*) που καταναλώνεται κατά το σχηματισμό των πλαστικών αρθρώσεων στα στοιχεία συνδέσμων.
- **Add Link Forces/Deformations:** Εμφανίζονται οι χρονοϊστορίες των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων (επιλογή *Deformation*) και των εντατικών μεγεθών (επιλογή *End-I Force* και *End-J Force* για την αρχή ή το τέλος του στοιχείου συνδέσμου αντίστοιχα).

Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα της αναπτυσσόμενης ροπής στο αριστερά άκρο της δοκού (στοιχείο *BL* όπου ζητείται *Relative Distance=0*) σε μορφή χρονοϊστορίας, καθορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 13.17. Οι σχετικές χρονοϊστορίες αναπτυσσόμενης ροπής που προκύπτουν στην περίπτωση της ελαστικής και ανελαστικής ανάλυσης με το σεισμικό φορτίο (δίχως τα κατακόρυφα φορτία), παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 13.18 και 13.19. Παρατηρούνται τα εξής:

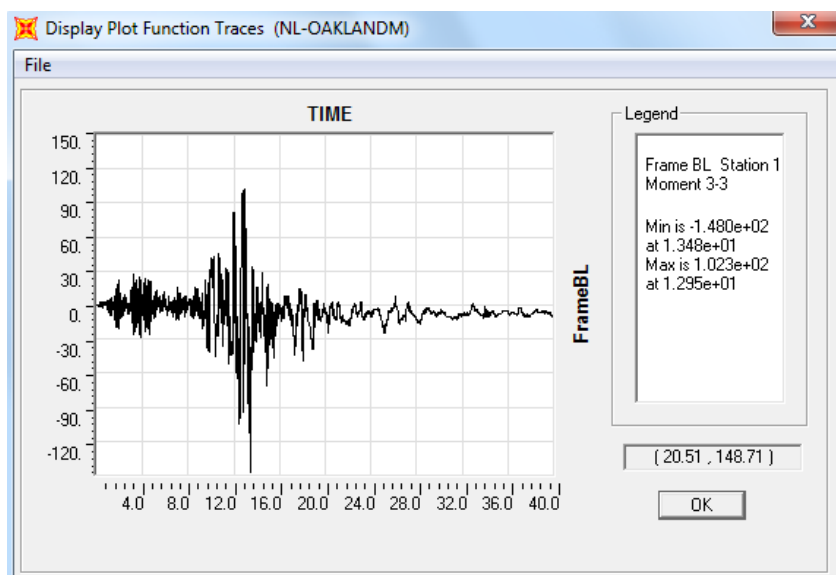
- Κατά την ελαστική ανάλυση έχουν αναπτυχθεί τιμές ροπής κάμψης που αγγίζουν τα -158KNm και $+169\text{KNm}$, τιμές που υπερβαίνουν σημαντικά τη ροπή διαρροής που τέθηκε στις ιδιότητες συνδέσμου της συγκεκριμένης διατομής (περίπου -148KNm και $+101\text{KNm}$, όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 13.1).
- Ειδικότερα στην περίπτωση της θετικής ροπής, η τιμή $+169\text{KNm}$ που εμφανίζεται στην ελαστική ανάλυση, υπερβαίνει και τη ροπή αστοχίας που τέθηκε ίση με $+111\text{KNm}$.
- Οι αναπτυσσόμενες ροπές κατά την ανελαστική ανάλυση δεν υπερβαίνουν τις τιμές -148KNm και $+102\text{KNm}$, σε συμφωνία με τα όρια που έχουν τεθεί για το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στη διατομή. Καθώς η τιμή της ροπής βρίσκεται κοντά στο όριο διαρροής και όχι στο όριο αστοχίας, συμπεραίνεται πως η διατομή έχει πιθανότητα πλαστικοποιηθεί, όχι όμως σε έντονο βαθμό.
- Η χρονοϊστορία ροπής στην περίπτωση της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης όπου λαμβάνονται υπόψη τα κατακόρυφα φορτία (Σχήμα 13.20), φαίνεται να ξεκινά από μη μηδενική τιμή τη χρονική στιγμή $t=0.0\text{s}$. Η αρχική αυτή τιμή αντιστοιχεί στην καμπτική ροπή που αναπτύσσεται λόγω της δράσης των κατακόρυφων φορτίων ($G+0.3Q$), πριν την έναρξη της σεισμικής φόρτισης στον φορέα.



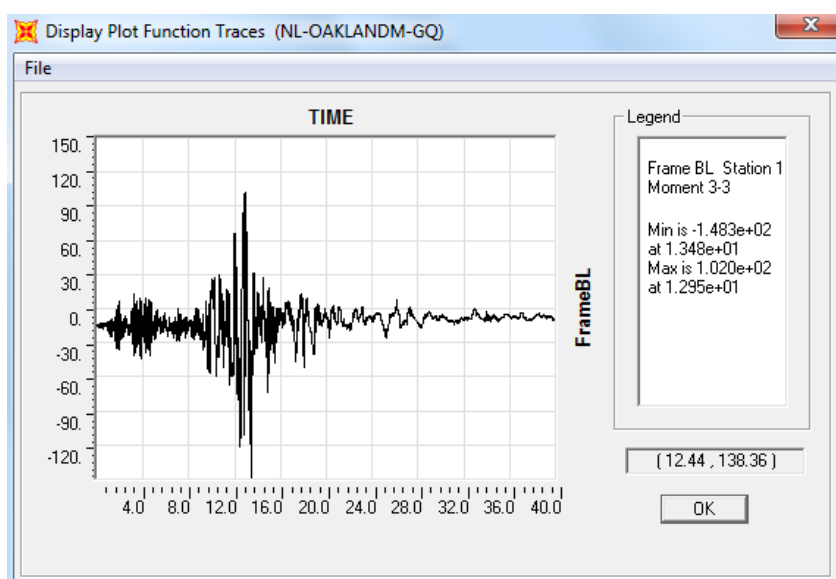
Σχήμα 13.17 Καθορισμός χρονοϊστορίας αναπτυσσόμενης ροπής στο αριστερά άκρο της δοκού BL (Relative Distance=0).



Σχήμα 13.18 Ροπή στο αριστερά άκρο της δοκού (ελαστική ανάλυση OAKLANDM δίχως κατακόρυφα φορτία).



Σχήμα 13.19 Ροπή στο αριστερά άκρο της δοκού (ανελαστική ανάλυση NL-OAKLANDM δίχως κατακόρυφα φορτία).



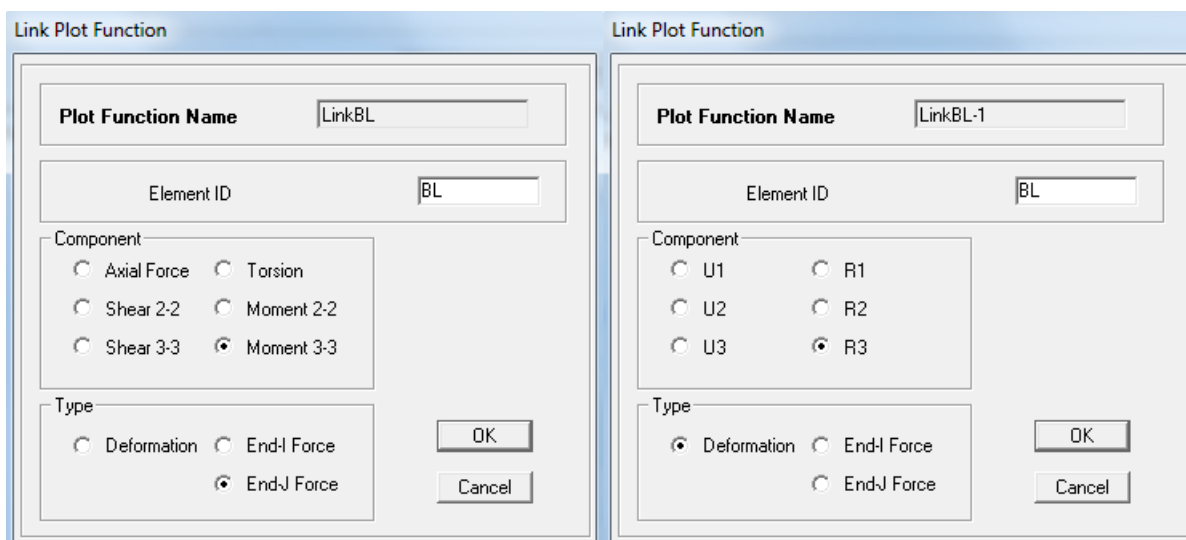
Σχήμα 13.20 Ροπή στο αριστερά άκρο της δοκού (ανελαστική ανάλυση NL-OAKLANDM-GQ με κατακόρυφα φορτία).

Ένα πολύ ενδιαφέρον στοιχείο, που μπορεί να εμφανιστεί σε μορφή διαγράμματος, είναι ο βαθμός πλαστικοποίησης στις πλαστικές αρθρώσεις. Η εμφάνιση των σχετικών διαγραμμάτων απαιτεί τον καθορισμό της αναπτυσσόμενης ροπής (Σχήμα 13.21, αριστερά) και της πλαστικής στροφής (Σχήμα 13.21, δεξιά) εντός του εξεταζόμενου στοιχείου συνδέσμου ([Link](#)). Στη συνέχεια, ορίζοντας στον οριζόντιο άξονα ([Horizontal Plot Function](#)) αντί του χρόνου ([TIME](#)) το μέγεθος της αναπτυσσόμενης πλαστικής στροφής στον σύνδεσμο, και στον κατακόρυφο άξονα ([Vertical Functions](#)) την αναπτυσσόμενη ροπή κάμψης στον σύνδεσμο (Σχήμα 13.22), προκύπτει η εικόνα του Σχήματος 13.23.

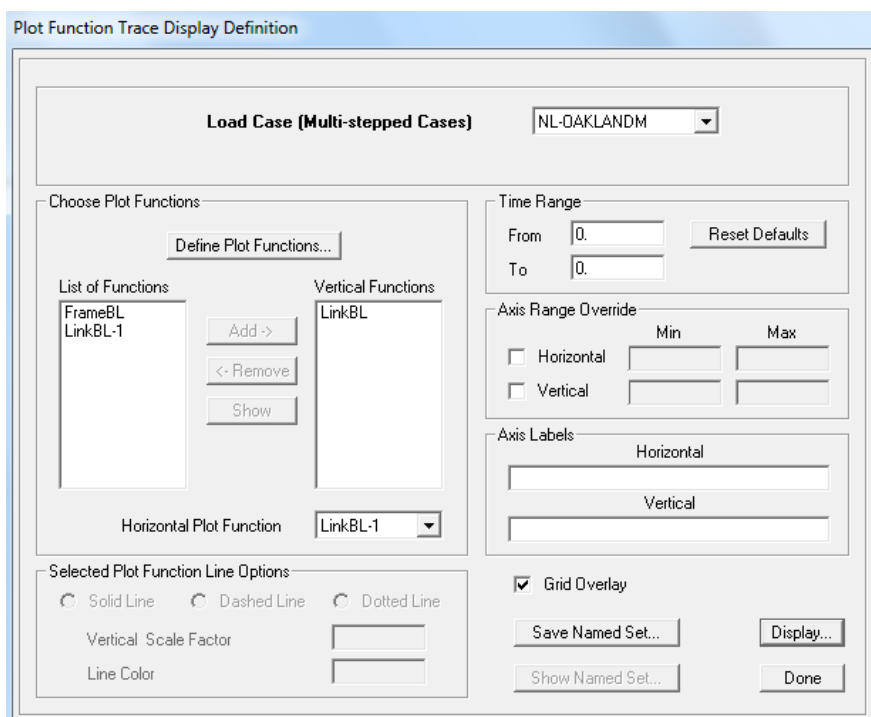
Οι βρόχοι που σχηματίζονται στο διάγραμμα καμπτικής ροπής – πλαστικής στροφής, όπως ενδεικτικά φαίνεται για την περίπτωση της σεισμικής φόρτισης δίχως κατακόρυφες δράσεις στο Σχήμα 13.23, είναι γνωστοί ως βρόχοι υστέρησης. Παρατηρείται πως η ανελαστική παραμόρφωση της διατομής ακολουθεί τη μορφή υστερητικής συμπεριφοράς που ορίστηκε στο στοιχείο συνδέσμου (Σχήμα 13.8). Η μέγιστη τιμή πλαστικής στροφής ισούται με 0.00267rad, επιβεβαιώνοντας πως η διατομή βρίσκεται ακόμη κοντά στο όριο διαρροής, καθώς το όριο αστοχίας εντοπίζεται σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα πλαστικής στροφής (0.025rad σύμφωνα με τον Πίνακα 13.1).

Σημειώνεται πως η αναπτυσσόμενη ροπή στο στοιχείο *LinkBL* του Σχήματος 13.23 θα πρέπει να συμπίπτει με την αναπτυσσόμενη ροπή στο αριστερό άκρο της δοκού που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 13.19, κάτι που αποτελεί και έναν έλεγχο της σύγκλισης η οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί κατά την ανελαστική ανάλυση.

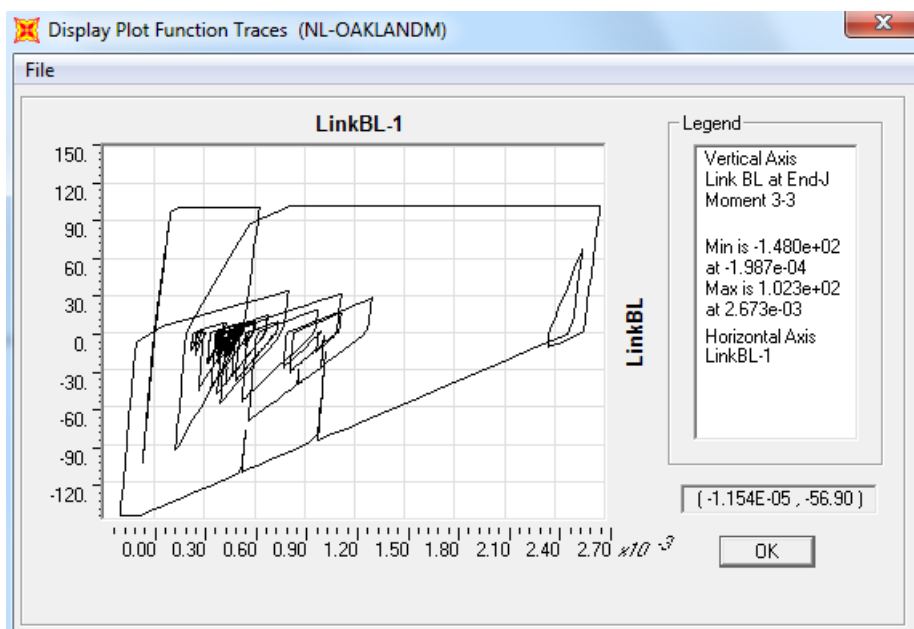
Μια εποπτικότερη εικόνα των βρόχων μπορεί να προκύψει με την εξαγωγή των τιμών σε αρχείο *txt* (εντολή *File → Print Tables to File..* στο παράθυρο του Σχήματος 13.23) και επεξεργασία τους σε κατάλληλο λογισμικό. Στο Σχήμα 13.24 γίνεται η σύγκριση των βρόχων υστέρησης για τις περιπτώσεις δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης με και χωρίς τον ταυτόχρονο υπολογισμό των κατακόρυφων φορτίων. Η διαφοροποίηση που επέρχεται λόγω της μόνιμης δράσης των κατακόρυφων φορτίων στους αναπτυσσόμενους βρόχους υστέρησης είναι εμφανής.



Σχήμα 13.21 Ορισμός αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής (αριστερά) και πλαστικής στροφής (δεξιά) στο στοιχείο συνδέσμου (*Link*).

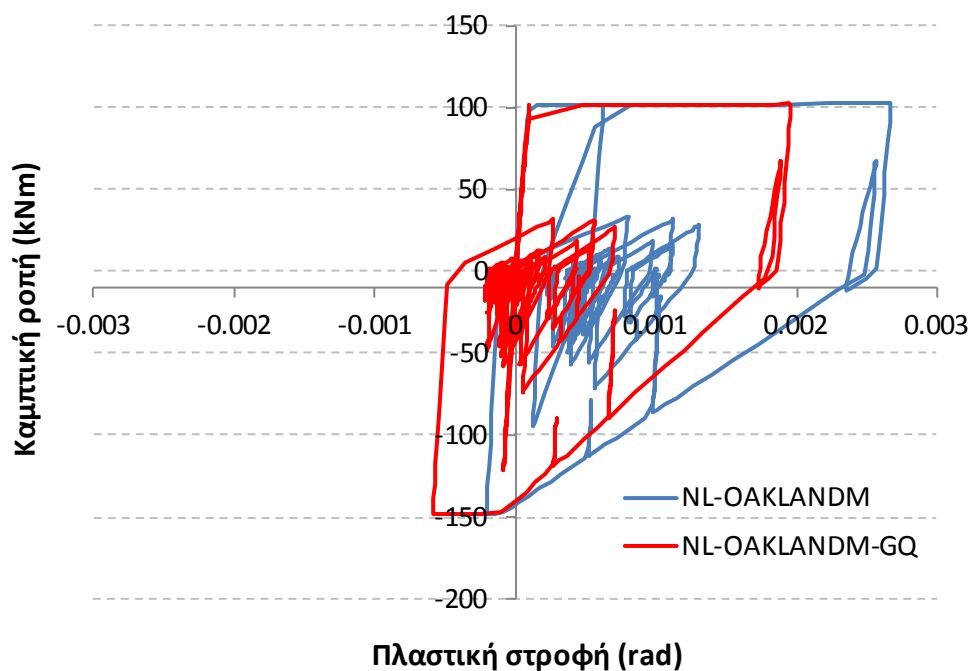


Σχήμα 13.22 Τροποποίηση διαγράμματος με αλλαγή των μεγεθών απόκρισης σε κάθε άξονα για την εμφάνιση βρόχων υστέρησης.



Σχήμα 13.23 Βρόχοι αναπτυσσόμενης ροπής - πλαστικής στροφής στο σύνδεσμο στο αριστερά άκρο της δοκού (ανελαστική ανάλυση NL-OAKLANDM δίχως κατακόρυφα φορτία).

Βρόχοι ροπής-στροφής στο αριστερά άκρο δοκού



Σχήμα 13.24 Σύγκριση βρόχων υστέρησης στη διατομή στο αριστερά άκρο της δοκού για δυναμική ανελαστική ανάλυση με και χωρίς τα κατακόρυφα φορτία.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 13^{ου} Κεφαλαίου

- ASCE (2000). *FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- ASCE/SEI (2013). *ASCE 41-13 - Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.
- Athanatopoulou, A. (2005). Critical orientation of three correlated seismic components. *Engineering Structures*, 27(2), 301-312. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.10.011
- CEN (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- CEN (2004). *EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Computers and Structures Inc. (2010). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA: CSI.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (1989). *Concepts and applications of finite element analysis* (Third ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Ibrahimbegovic, A., & Wilson, E. (1989). Simple numerical algorithms for the mode superposition analysis of linear structural systems with non-proportional damping. *Computers & Structures*, 33(2), 523-531.
- Kappos, A., & Penelis, G. (2010). *Earthquake resistant concrete structures*: CRC Press.
- Katsanos, E. I., Sextos, A. G., & Manolis, G. D. (2010). Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(4), 157-169. doi: 10.1016/j.soildyn.2009.10.005
- Koliopoulos, P., & Kirtas, E. (2002). *Plastic energy demand of the September 1999 Athens earthquake: Empirical predictions vs numerical results*. Paper presented at the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, England.
- Koliopoulos, P., Panagopoulos, G., & Mouratidis, E. (2004). *Empirical predictions of plastic energy demand of Greek earthquakes*. Paper presented at the 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (ICSDEE), Berkeley, USA.
- Kostinakis, K., Athanatopoulou, A., & Avramidis, I. (2013). Evaluation of inelastic response of 3D single-story R/C frames under bi-directional excitation using different orientation schemes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(2), 637-661. doi: 10.1007/s10518-012-9392-5
- Sextos, A., Pitilakis, K., Kirtas, E., & Fotaki, V. (2005). *A Refined Computational Framework for the Assessment of the Inelastic Response of an Irregular Building that was Damaged During the Lefkada Earthquake*. Paper presented at the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, Thessaloniki, Greece.
- Takeda, T., Sozen, M., & Nielsen, N. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 96(12), 2557-2573.
- Wilson, E. L. (1993). *An efficient computational method for the base isolation and energy dissipation analysis of structural systems*. Paper presented at the ATC17-1, Proceedings of the Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Applied Technology Council, Redwood City, Calif.
- ΟΑΣΠ (2000). *ΚΑΝ.ΕΠΕ. - Κανονισμός επεμβάσεων (1^η Αναθεώρηση)*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.

Τοπικοί άξονες συντεταγμένων στο SAP 2000 Συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων στοιχείων Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Σύνοψη

Στο Παράρτημα, το οποίο αποτελείται από 3 επιμέρους τμήματα, αναπτύσσονται στοιχεία που αφορούν τα παρακάτω αντικείμενα: τοπικοί άξονες σε γραμμικά και επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, εισαγωγή δεδομένων και ανάγνωση αποτελεσμάτων βάσει τοπικών αξόνων, συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων βάσει Κανονισμών και για απλές επιλύσεις. Στο τελευταίο τμήμα του Παραρτήματος παρατίθεται πίνακας απόδοσης ξενόγλωσσων όρων.

Προαπαιτούμενη γνώση

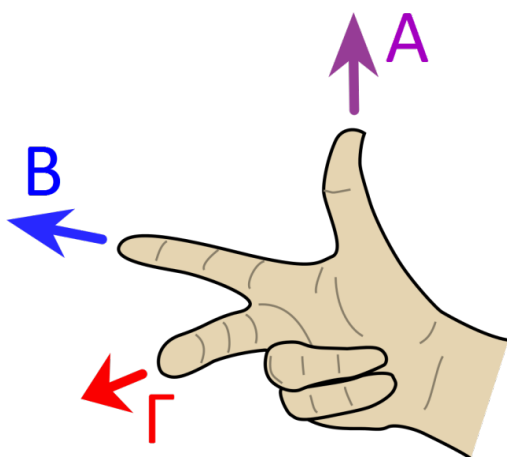
Το Παράρτημα δεν περιλαμβάνει κάποιο αυτοτελές μαθησιακό αντικείμενο, αλλά λειτουργεί συνοδευτικά και διευκρινιστικά προς τα μαθησιακά αντικείμενα που αναπτύσσονται στα επιμέρους Κεφάλαια του συγγράμματος.

Παράρτημα Α: Τοπικοί άξονες συντεταγμένων στο SAP 2000

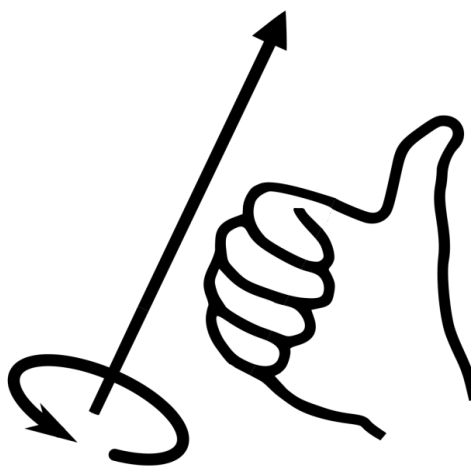
Κατά τη χρήση του προγράμματος *SAP 2000*, όπως και όλων σχεδόν των προγραμμάτων στατικής ανάλυσης, γίνεται αναφορά σε δυο συστήματα συντεταγμένων: το γενικό (*Global*) και το τοπικό (*Local*). Το γενικό σύστημα συντεταγμένων συνήθως χαρακτηρίζεται από τους άξονες *XYZ* και αφορά τους άξονες που φαίνονται κατά την εισαγωγή των δεδομένων στην επιφάνεια σχεδίασης στο πρόγραμμα. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα οι *X* και *Y* άξονες είναι οριζόντιοι, ενώ ο άξονας *Z* κατακόρυφος. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων έχει διαφορετική αρίθμηση (στο *SAP 2000* χαρακτηρίζεται από τους άξονες *123*), και αφορά το κάθε στοιχείο ή κόμβο χωριστά. Η αντιστοίχιση συνεπώς που μπορεί να γίνει μεταξύ των δυο συστημάτων δεν είναι πάντα η ίδια, αλλά διαφέρει από στοιχείο σε στοιχείο.

Η σειρά των αξόνων ενός συστήματος συντεταγμένων τύπου *XYZ*, *KLM*, *123* κτλ, είναι πάντα σαφώς ορισμένη, ενώ ο πλήρης ορισμός του συστήματος συνήθως επιβάλλει τον καθορισμό των δυο από τους άξονες, με τον τρίτο άξονα να προκύπτει βάσει του κανόνα του δεξιού χεριού. Ενδεικτικά, σε ένα σύστημα τύπου *ABΓ*, ακολουθείται η λογική: Αντίχειρας-άξονας *A*, Δείκτης-άξονας *B* και Μέσος-άξονας *Γ*, των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού (Σχήμα Α.1). Επίσης, η θετική φορά ροπής ή στροφής γύρω από έναν άξονα δίδεται από τα δάκτυλα μιας κλειστής παλάμης του δεξιού χεριού, όταν ο αντίχειρας δείχνει τη θετική φορά του συγκεκριμένου άξονα (Σχήμα Α.2).

Η γνώση του συστήματος τοπικών αξόνων των διαφόρων στοιχείων έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η εισαγωγή αρκετών δεδομένων στον φορέα, αλλά και η ανάγνωση των αποτελεσμάτων, γίνονται συχνά με βάση το τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε πεπερασμένου στοιχείου.



Σχήμα A.1 Κανόνας του δεξιού χεριού για τον ορισμό του προσανατολισμού συστήματος αξόνων (Adapted from Right hand rule cross product, In Wikimedia, n.d., Retrieved April 03, 2015, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right_hand_rule_cross_product.svg, User:Acdx, licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license).



Σχήμα A.2 Κανόνας του δεξιού χεριού για τον ορισμό της θετικής φοράς ροπής και στροφής (Reprinted from Right hand grip rule, In Wikimedia, n.d., Retrieved April 03, 2015, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right-hand_grip_rule.svg, Το παρόν έργο αποτελεί κοινό κτήμα (public domain)).

A.1. Τοπικό σύστημα αξόνων σε κόμβους

Οι τοπικοί άξονες στους κόμβους ορίζονται με το σύστημα 123 και ταυτίζονται κατά σειρά με αυτούς του γενικού συστήματος συντεταγμένων, δηλαδή ισχύει πάντα:

- άξονας 1 = άξονας X ,
- άξονας 2 = άξονας Y ,
- άξονας 3 = άξονας Z .

Σε ορισμένα σημεία του προγράμματος, όπως π.χ. ο καθορισμός της φοράς δράσης μιας σεισμικής δύναμης σε δυναμική φασματική κατάσταση ανάλυσης, υπάρχει επίσης η αρίθμηση 123 στους άξονες που προσφέρονται. Στις περιπτώσεις αυτές που αφορούν το σύνολο του προσομοιώματος, η αντιστοίχιση που ακολουθείται είναι ίδια με αυτή των κόμβων που αναφέρεται παραπάνω. Η συγκεκριμένη αντιστοίχιση αφορά τόσο την εισαγωγή των δεδομένων όσο και την ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

A.2. Τοπικό σύστημα αξόνων σε γραμμικά στοιχεία

Ένα γραμμικό στοιχείο στο *SAP 2000* θεωρείται κατακόρυφο όταν η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του στοιχείου με τον άξονα *Z* έχει ημίτονο μικρότερο από 10^{-3} . Αν η προϋπόθεση αυτή δεν ισχύει, τότε το στοιχείο θεωρείται οριζόντιο (πρακτικά κάθε στοιχείο που έχει απόκλιση πάνω από 0.1° από την κατακόρυφο, θεωρείται οριζόντιο στοιχείο).

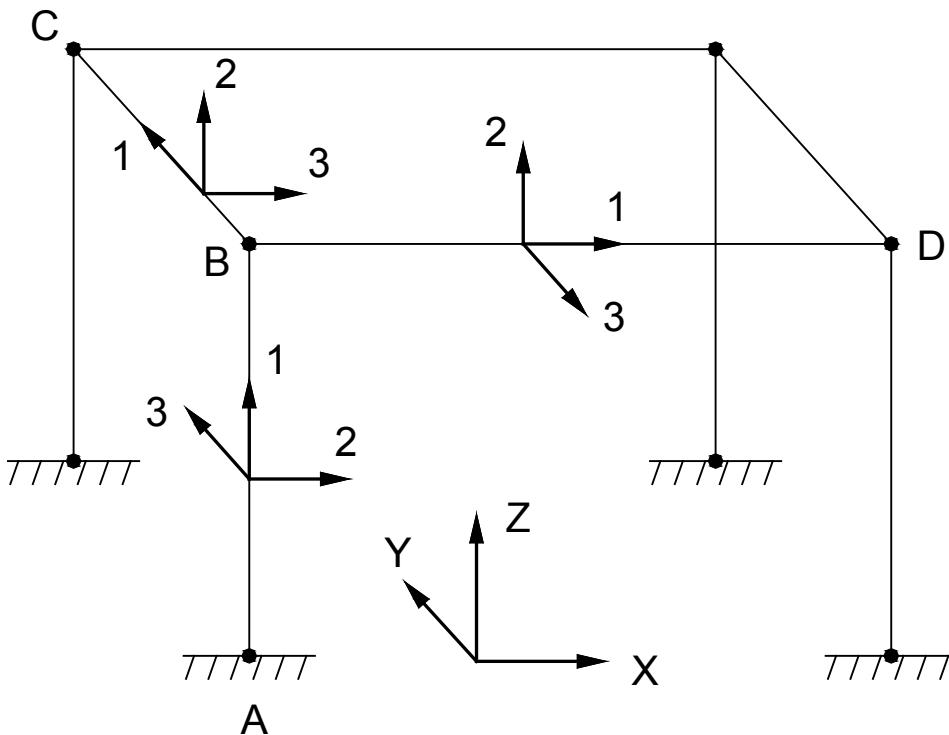
Οι τοπικοί άξονες στα γραμμικά στοιχεία ορίζονται ως εξής:

- Ο τοπικός άξονας *1* ταυτίζεται με τον άξονα του στοιχείου, με θετική φορά από τον κόμβο αρχής προς τον κόμβο τέλους.
- Ο τοπικός άξονας *2* έχει μια κατεύθυνση προς τα *+Z*, εκτός αν πρόκειται για κατακόρυφο στοιχείο οπότε έχει μια κατεύθυνση προς τα *+X*.
- Ο τοπικός άξονας *3* ορίζεται με βάση τους δυο προηγούμενους άξονες και είναι γενικά οριζόντιος (δηλαδή σε επίπεδο *XY*).

Έστω το παράδειγμα ενός απλού χωρικού φορέα που φαίνεται στο Σχήμα A.3. Το γενικό σύστημα συντεταγμένων *XYZ* του προγράμματος φαίνεται στο κάτω μέρος του Σχήματος. Τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων για τα διάφορα γραμμικά στοιχεία φαίνονται σχεδιασμένα στο Σχήμα A.3. Ειδικότερα για τον κάθε τύπο δομικού στοιχείου ισχύουν τα εξής:

- Δοκοί κατά *X*: Αντιστοιχία αξόνων $1=X, 2=Z, 3=Y$.
- Δοκοί κατά *Y*: Αντιστοιχία αξόνων $1=Y, 2=Z, 3=X$.
- Υποστυλώματα – Τοιχώματα: Αντιστοιχία αξόνων $1=Z, 2=X, 3=Y$.

Προϋπόθεση για την εμφάνιση των τοπικών αξόνων, όπως φαίνονται στο Σχήμα A.3, αποτελεί η υιοθέτηση της σχεδίασης γραμμικών στοιχείων σύμφωνα με την προεπιλεγμένη μέθοδο του προγράμματος, δηλαδή η φορά του τοπικού άξονα *1* του κάθε στοιχείου να είναι όμοια με αυτή του παράλληλου άξονα του γενικού συστήματος *XYZ*. Συνεπώς, ενδεικτικά για τη δοκό *BC*, ως κόμβος αρχής ορίζεται ο *B* και ως κόμβος τέλους ο *C*, οπότε η φορά του τοπικού άξονα *1* συμπίπτει με τη φορά του παράλληλου του άξονα *Y*.



Σχήμα A.3 Χωρικός πλαισιακός φορέας στο *SAP 2000* όπου φαίνεται το γενικό και τα τοπικά συστήματα αξόνων σε κάθε γραμμικό δομικό στοιχείο.

A.3. Εισαγωγή δεδομένων γραμμικών στοιχείων και κόμβων

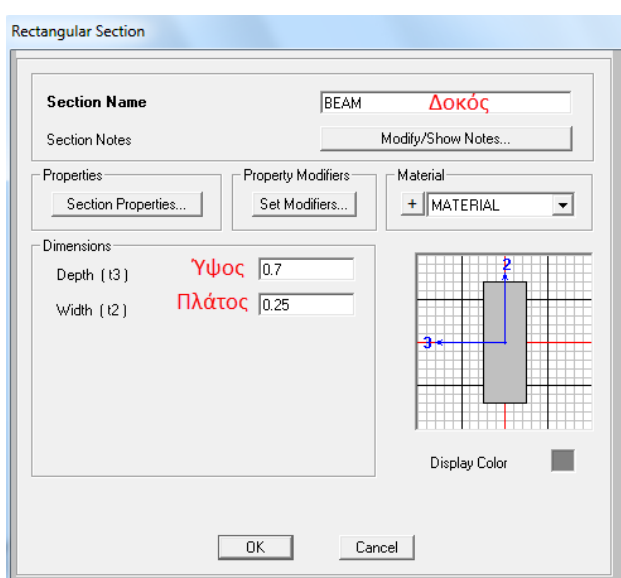
A.3.1. Εισαγωγή δεδομένων κόμβων

Με βάση τα παραπάνω, η εισαγωγή δεδομένων που αφορούν κόμβους ή το συνολικό φορέα σε τοπικό σύστημα αξόνων στο *SAP 2000*, μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι οι άξονες *123* ταυτίζονται κατά σειρά με τους *XYZ*.

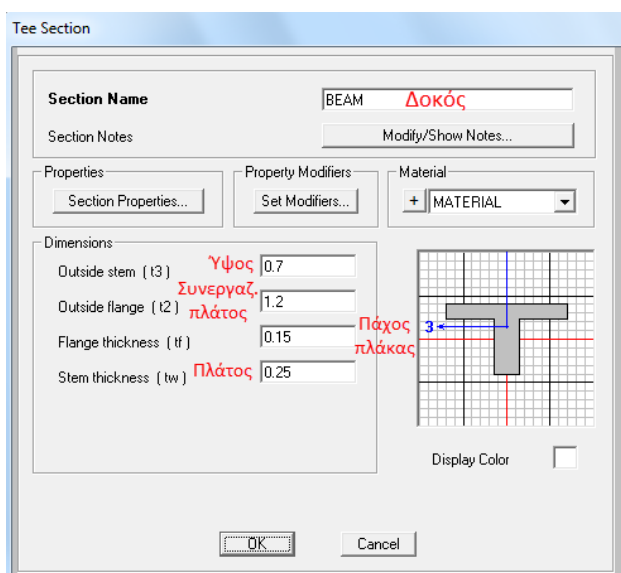
A.3.2. Εισαγωγή δεδομένων γραμμικών στοιχείων

Για τη διευκόλυνση της γρήγορης εισαγωγής δεδομένων σε γραμμικά στοιχεία που αφορούν δοκούς και υποστυλώματα, δίνονται κάποια κατατοπιστικά σκαριφήματα που καλύπτουν τις συνηθισμένες περιπτώσεις διατομών.

Η εισαγωγή των διαστάσεων σε δοκό ορθογωνικού σχήματος γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα A.4, ενώ σε δοκό μορφής πλακοδοκού σύμφωνα με το Σχήμα A.5.

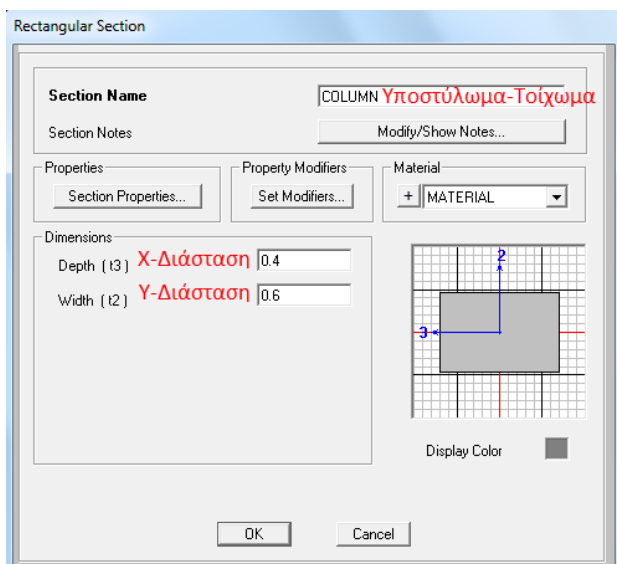


Σχήμα A.4 Εισαγωγή διαστάσεων διατομής ορθογωνικής δοκού στο SAP 2000.



Σχήμα A.5 Εισαγωγή διαστάσεων διατομής πλακοδοκού στο SAP 2000.

Η εισαγωγή των διαστάσεων στα υποστυλώματα-τοιχώματα γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα Α.6. Προφανώς η συγκεκριμένη αναφορά στα τοιχώματα αφορά τον ισοδύναμο κατακόρυφο στυλο κατά την προσομοίωση των τοιχωμάτων με γραμμικά στοιχεία.



Σχήμα Α.6 Εισαγωγή διαστάσεων διατομής υποστυλωμάτων-τοιχωμάτων στο SAP 2000.

A.4. Ανάγνωση αποτελεσμάτων γραμμικών στοιχείων και κόμβων

A.4.1. Ανάγνωση αποτελεσμάτων κόμβων

Η ανάγνωση αποτελεσμάτων σε κόμβους αφορά μετακινήσεις, αντιδράσεις στήριξης φορέα κτλ.

Η εμφάνιση της παραμορφωμένης μορφής του φορέα γίνεται από την εντολή *Display → Show Deformed Shape* και επιλογή της σχετικής φορτιστικής κατάστασης. Η ανάγνωση των μετακινήσεων γίνεται με δεξιά *click* σε κάθε κόμβο του παραμορφωμένου φορέα.

Η εμφάνιση των αντιδράσεων στις στηρίξεις του φορέα γίνεται από την εντολή *Display → Show Forces-Stresses → Joints* και επιλογή της σχετικής φορτιστικής κατάστασης.

Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων σε κόμβους ή στο συνολικό φορέα (π.χ. μετακινήσεις, επιταχύνσεις κτλ) σε τοπικό σύστημα αξόνων στο *SAP 2000*, μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι οι άξονες *123* ταυτίζονται κατά σειρά με τους *XYZ*.

A.4.2. Ανάγνωση αποτελεσμάτων γραμμικών στοιχείων

Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων εντατικών μεγεθών σε γραμμικά στοιχεία γίνεται διαφορετικά σε δοκούς και υποστυλώματα-τοιχώματα. Η εμφάνιση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών γίνεται από την εντολή *Display → Show Forces-Stresses → Frames/Cables* και επιλογή της σχετικής φορτιστικής κατάστασης και του επιθυμητού μεγέθους.

Ανάγνωση εντατικών μεγεθών σε Δοκούς

Ανεξαρτήτως της διεύθυνσης της δοκού, η ανάγνωση των αποτελεσμάτων των εντατικών μεγεθών γίνεται ως εξής:

- Αξονικά φορτία από το *Axial Force*.
- Καμπτικές ροπές από το *Moment 3-3*.
- Τέμνουσες από το *Shear 2-2*.
- Ροπή στρέψης από το *Torsion*.

Ανάγνωση εντατικών μεγεθών σε Υποστυλώματα

Η ανάγνωση των εντατικών μεγεθών σε υποστυλώματα εξαρτάται και από τη διεύθυνση του πλαισίου που συμμετέχουν, καθώς υπόκεινται σε διαξονική κάμψη και διάτμηση. Γενικά ισχύουν τα εξής:

- Αξονικά φορτία από το *Axial Force*.
- Ροπή στρέψης από το *Torsion*.
- Κάμψη γύρω από τον άξονα *Y* (ο στύλος ανήκει σε πλαίσιο κατά *X* και κάμπτεται εντός του επιπέδου *XZ*): η καμπτική ροπή δίνεται από το *Moment 3-3* και η τέμνουσα από το *Shear 2-2*.
- Κάμψη γύρω από τον άξονα *X* (ο στύλος ανήκει σε πλαίσιο κατά *Y* και κάμπτεται εντός του επιπέδου *YZ*): η καμπτική ροπή δίνεται από το *Moment 2-2* και η τέμνουσα από το *Shear 3-3*.

Ανάγνωση εντατικών μεγεθών σε επίπεδες τομές χωρικού φορέα

Με βάση τα παραπάνω, σε πλαίσια κατά *X* οι καμπτικές ροπές τόσο των δοκών όσο και των υποστυλωμάτων θα δίνονται ως *Moment 3-3*, ενώ οι τέμνουσες από το *Shear 2-2*. Άρα μπορούν να εμφανίζονται ταυτόχρονα σε όψη *xz* του φορέα.

Σε πλαίσια κατά *Y* όμως, ενώ οι καμπτικές ροπές και οι τέμνουσες των δοκών δίνονται ως *Moment 3-3* και *Shear 2-2*, αυτές των υποστυλωμάτων δίνονται ως *Moment 2-2* και *Shear 3-3*! Συνεπώς, δεν είναι δυνατή σε όψη *yz* η ταυτόχρονη εμφάνιση εντατικών μεγεθών δοκών και υποστυλωμάτων. Για τον λόγο αυτόν, προτείνεται η χρήση της τρισδιάστατης όψης για την ανάγνωση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών σε χωρικούς φορείς, ιδίως σε χρήστες που βρίσκονται στην αρχή της ενασχόλησης τους με προγράμματα ανάλυσης κατασκευών.

A.5. Τοπικό σύστημα αξόνων σε επιφανειακά στοιχεία

Τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τύπου *Shell* στο *SAP 2000* αφορούν 3-κομβά ή 4-κομβά στοιχεία. Στην περίπτωση των 4-κομβών στοιχείων θα πρέπει και οι 4 κόμβοι να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Οι παρακάτω κανόνες θα πρέπει να τηρούνται όσον αφορά το σχήμα των επιφανειακών στοιχείων.

- Κάθε εσωτερική γωνία θα πρέπει να είναι μικρότερη των 180°. Καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν οι γωνίες είναι κοντά στις 90° ή γενικότερα μεταξύ 45° και 135°.
- Ο λόγος μεταξύ των 2 διαστάσεων (μήκος προς πλάτος) θα πρέπει για καλύτερα αποτελέσματα να είναι κοντά στη μονάδα ή γενικότερα μικρότερος του 4. Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 10.

Σε κάθε περίπτωση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, ο τοπικός άξονας *3* είναι κάθετος στο επίπεδο του στοιχείου, ενώ οι δύο άλλοι άξονες βρίσκονται μέσα στο επίπεδο του στοιχείου. Το επίπεδο *3-2* είναι παράλληλο με τον άξονα *Z*, με τον τοπικό άξονα *2* να έχει κατεύθυνση προς τα πάνω (+*Z*) εκτός της περίπτωσης οριζόντιου στοιχείου όπου ο άξονας *2* είναι κατά *Y*. Τέλος, ο τοπικός άξονας *1* είναι οριζόντιος (στο επίπεδο *XY*). Πιο συνοπτικά μπορούν να αναφερθούν τα εξής

Τοπικοί άξονες για οριζόντια επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

- Τοπικός άξονας *3* παράλληλος με τον *Z*.
- Τοπικός άξονας *2* παράλληλος με τον *Y*.
- Τοπικός άξονας *1* παράλληλος με τον *X*.

Τοπικοί άξονες για κατακόρυφα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία σε επίπεδο *XZ*

- Τοπικός άξονας *3* παράλληλος με τον *Y*.
- Τοπικός άξονας *2* παράλληλος με τον *Z*.
- Τοπικός άξονας *1* παράλληλος με τον *X*.

Τοπικοί άξονες για κατακόρυφα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία σε επίπεδο YZ

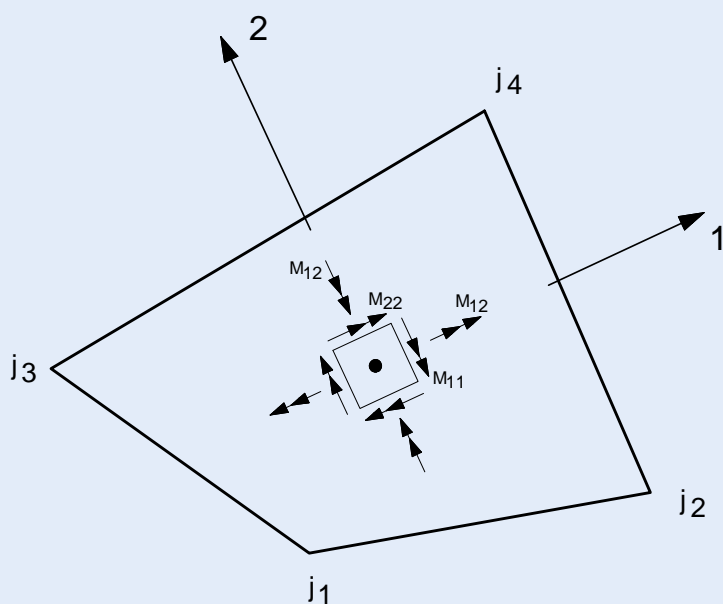
- Τοπικός άξονας 3 παράλληλος με τον X.
- Τοπικός άξονας 2 παράλληλος με τον Z.
- Τοπικός άξονας 1 παράλληλος με τον Y.

Ανάγνωση αποτελεσμάτων σε επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

Η ανάγνωση των εντατικών μεγεθών των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων γίνεται από την εντολή *Display → Show Forces-Stresses → Shells*. Οι δυνάμεις-ροπές εμφανίζονται από το *Resultant Forces* και οι τάσεις από το πεδίο *Shell Stresses*.

Ειδικότερα η ανάγνωση των καμπτικών ροπών σε πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (οριζόντια πλάκα σε κάμψη εκτός επιπέδου) γίνεται από τα πεδία *M11* και *M22* και πιο συγκεκριμένα (Σχήμα A.7) σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος (Computers and Structures Inc., 2010):

- Για όπλιση κατά τον άξονα 1 (X-X) ενδιαφέρουν οι τιμές *M11*.
- Για όπλιση κατά τον άξονα 2 (Y-Y) ενδιαφέρουν οι τιμές *M22*.



Σχήμα A.7 Καμπτικές ροπές επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο SAP 2000 .

Παράρτημα Β: Συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων στοιχείων

Κατά την επίλυση ενός φορέα, προκειμένου να υπολογιστούν η εντατική κατάσταση και οι μετακινήσεις του, λαμβάνονται υπόψη τα έργα των εξωτερικών δυνάμεων (φορτίων, εξωτερικών ροπών, καταναγκασμών) και των εσωτερικών δυνάμεων (εντατικών μεγεθών M , V , N). Η αντίσταση που εμφανίζουν τα δομικά στοιχεία στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού όσο και από τη γεωμετρία της κάθε διατομής, και μπορεί να διακριθεί στα παρακάτω (Κίρτας & Λιαλιαμπής, 2013· Μητσοπούλου, 1995):

- Δυστένεια
- Δυσμησία
- Δυσκαμψία
- Δυστρεψία

Κατά την ανάλυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, υπάρχει συχνά απαίτηση των Κανονισμών για απομείωση κάποιων από τα παραπάνω μεγέθη, ώστε να ληφθούν υπόψη οι διατομές σε στάδιο II, λόγω ρηγματώσης. Στο πρόγραμμα *SAP 2000* είναι δυνατή μια τέτοια ενέργεια, μέσω της χρήσης συντελεστών τροποποίησης ιδιοτήτων διατομής (*Property modifiers*), που βρίσκονται στο στάδιο προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάθε διατομής. Η τιμή που τίθεται σε κάποιο πεδίο των *modifiers* πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη γεωμετρική ιδιότητα της διατομής, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της τελικής τιμής της συγκεκριμένης ιδιότητας που θα ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η τροποποίηση του συνυπολογισμού του έργου του κάθε εντατικού μεγέθους, σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Στη συνήθη περίπτωση των γραμμικών στοιχείων (*frame sections*), οι συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων διατομής και η συσχέτισή τους με τα παραπάνω μεγέθη αντίστασης της διατομής είναι:

- *Cross-section (axial) area* (Εμβαδόν διατομής): Σχετίζεται με τη δυνατότητα αυξομείωσης του μήκους του στοιχείου και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυστένεια* της διατομής.
- *Shear area in 2 direction* (Τεκμαρτό εμβαδόν διατομής σε διάτμηση κατά τον άξονα 2): Σχετίζεται με τη δυνατότητα διατμητικής παραμόρφωσης κατά τη διεύθυνση του άξονα 2 και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυσμησία* της διατομής στη συγκεκριμένη διεύθυνση.
- *Shear area in 3 direction* (Τεκμαρτό εμβαδόν διατομής σε διάτμηση κατά τον άξονα 3): Σχετίζεται με τη δυνατότητα διατμητικής παραμόρφωσης κατά τη διεύθυνση του άξονα 3 και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυσμησία* της διατομής στη συγκεκριμένη διεύθυνση.
- *Torsional constant* (Στρεπτική αδράνεια διατομής): Σχετίζεται με τη δυνατότητα στρέψης του στοιχείου και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυστρεψία* της διατομής.
- *Moment of inertia about 2 axis* (Ροπή αδράνειας διατομής γύρω από άξονα 2): Σχετίζεται με τη δυνατότητα κάμψης του στοιχείου γύρω από τοπικό άξονα 2 και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυσκαμψία* της διατομής γύρω από τον συγκεκριμένο άξονα.
- *Moment of inertia about 3 axis* (Ροπή αδράνειας διατομής γύρω από άξονα 3): Σχετίζεται με τη δυνατότητα κάμψης του στοιχείου γύρω από τοπικό άξονα 3 και μπορεί να μεταβάλλει τη *δυσκαμψία* της διατομής γύρω από τον συγκεκριμένο άξονα.
- *Mass* (μάζα): Σχετίζεται με τον υπολογισμό της ίδιας μάζας του στοιχείου που θα ληφθεί υπόψη.
- *Weight* (βάρος): Σχετίζεται με τον υπολογισμό του ίδιου βάρους του στοιχείου που θα ληφθεί υπόψη.

Οι άξονες 2 και 3 που αναφέρονται είναι οι τοπικοί άξονες των γραμμικών στοιχείων, όπως αναλύθηκαν στο μέρος Α του Παραρτήματος. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται οι κατάλληλες τιμές τροποποίησης των γεωμετρικών ιδιοτήτων για διατομές οπλισμένου σκυροδέματος, ώστε να υπάρχει συμφωνία με τις διατάξεις του *Ευρωκώδικα*. Συμπληρωματικά παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες απαιτήσεις του πρόσφατου *Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000)*, που σχετίζονται με τις τιμές των γεωμετρικών ιδιοτήτων των διατομών. Τέλος, γίνεται και μια αναφορά στις τιμές που θα πρέπει να επιλεγούν όταν επιδιώκεται με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος να προσεγγιστεί μια επίλυση που γίνεται «με το χέρι», ώστε να αγνοηθούν τα έργα των εντατικών μεγεθών που συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτέλεση απλών στατικών επιλύσεων.

Συνυπολογισμός ίδιου βάρους και μάζας διατομής

Σε προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση τεχνητά μεγάλων τιμών (π.χ. 1000) στο συντελεστή που αφορά το εμβαδόν της διατομής (*Cross-section area*), καθώς όταν συνυπολογίζεται το ίδιο βάρος και η μάζα του κάθε στοιχείου αυτόματα από το πρόγραμμα, τότε άθελα δινόταν αύξηση του ίδιου βάρους και της μάζας κατά 1000 φορές! Θα έπρεπε συνεπώς η συγκεκριμένη επιλογή να συνδυάζεται με μηδενικό ίδιο βάρος στον καθορισμό του υλικού ή στον καθορισμό των μορφών φόρτισης. Πλέον, στις πρόσφατες εκδόσεις του προγράμματος, έχουν προστεθεί δυο συντελεστές που αφορούν τη μάζα (*Mass*) και το ειδικό βάρος (*Weight*) που θα ληφθεί υπόψη στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο, καθιστώντας τον αυτόματο υπολογισμό της μάζας και του βάρους του στοιχείου ανεξάρτητο από την τιμή που θα τεθεί στο πεδίο *Cross-section area*.

Παρ' όλα αυτά, κατάλληλη μέριμνα μη συνυπολογισμού τους βάρους και της μάζας θα πρέπει να ληφθεί σε τυχόν βοηθητικά στοιχεία, τύπου στερεού βραχίονα ή άκαμπτης διατομής (περίπτωση προσομοίωσης τοιχωμάτων, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 6 και 7). Τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά ορίζονται με αυξημένα χαρακτηριστικά εμβαδού διατομής κατά την προσομοίωση, δίχως όμως να έχουν φυσική παρουσία, άρα και υπαρκτό βάρος, στην πραγματική κατασκευή.

B.1. Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων σε ρηγματωμένες διατομές O/Σ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η απομείωση των ιδιοτήτων των ρηγματωμένων διατομών σε στάδιο II που συμπεριλαμβάνεται στον *EC8 §4.3.1(7)* αφορά τα ελαστικά καμπτικά και διατμητικά χαρακτηριστικά τους, τα οποία πρέπει να ληφθούν ίσα με το ήμισυ της αντίστοιχης δυσκαμψίας των μη ρηγματωμένων στοιχείων. Στο παρόν κρίνεται σκόπιμο να τηρηθεί και η απομείωση της δυστρεψίας της διατομής στο 10% της αρχικής της τιμής, σύμφωνα με την ανάλυση που γίνεται από τους Αβραμίδη, Αθανατοπούλου, Μορφίδη και Σέξτο (2011).

Για την επίτευξη της απομείωσης των μεγεθών, βάσει των απαιτήσεων του *EC8*, μπορούν να τεθούν οι συντελεστές απομείωσης ιδιοτήτων (*Property modifiers*) που φαίνονται στον Πίνακα B.1.

Ιδιότητα	Δοκοί	Υποστυλώματα	Τοιχώματα
Cross-section (axial) area	1.0	1.0	1.0
Shear area in 2 direction	0.5	0.5	0.5
Shear area in 3 direction	0.5	0.5	0.5
Torsional constant	0.1	0.1	0.1
Moment of inertia about 2 axis	0.5	0.5	0.5
Moment of inertia about 3 axis	0.5	0.5	0.5

Πίνακας B.1 Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων διατομής γραμμικών στοιχείων βάσει *EC8* (η απομείωση στη δυστρεψία δεν προβλέπεται, προτείνεται όμως να διατηρηθεί βάσει της εμπειρίας εφαρμογής του *EAK 2000*).

Συντελεστές τροποποίησης ιδιοτήτων κατά την προσομοίωση τοιχωμάτων με επιφανειακά στοιχεία

Κατά την προσομοίωση των τοιχωμάτων με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, η απομείωση των σχετικών ιδιοτήτων μπορεί να γίνει πάλι μέσω της χρήσης αντίστοιχων συντελεστών. Στην περίπτωση αυτή, η απομείωση της δυσκαμψίας του τοιχώματος ορίζεται στους σχετικούς συντελεστές τροποποίησης (*modifiers*) στο πεδίο *f22* και η απομείωση της δυστρεψίας στο πεδίο *f12* (CSI, n.d.). Παράλληλα, αντίστοιχοι συντελεστές πρέπει να τεθούν και στα πεδία *m11*, *m22* και *m12*, για την απομείωση της εκτός επιπέδου δυσκαμψίας του τοιχώματος. Εφαρμογή των παραπάνω συντελεστών γίνεται στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 7.

Δυστένεια οριζόντιων στοιχείων (δοκών) κατά την ανάλυση

Πέρα από τους συντελεστές τροποποίησης του παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να σημειωθεί πως η αυξομείωση του μήκους των δοκών, όπως και η κάμψη τους εντός οριζοντίου επιπέδου, δεν είναι δυνατές, λόγω της ύπαρξης της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος. Η αδυναμία αυξομείωσης του μήκους των δοκών λαμβάνεται συνήθως αυτόματα υπόψη, μέσω της χρήσης διαφραγματικής λειτουργίας στα επίπεδα των ορόφων. Παράλληλα, η έλλειψη οριζόντιων φορτίων κατά μήκος των δοκών στις συνήθεις περιπτώσεις μελετών, αποτρέπει και την –εντός οριζοντίου επιπέδου– κάμψη τους, με αποτέλεσμα η παραπάνω απομείωση στο αντίστοιχο πεδίο *Moment of inertia about 2 axis* να μην έχει κάποια επιρροή κατά την ανάλυση, όπως άλλωστε θα ήταν το αναμενόμενο.

Οι αντίστοιχες διατάξεις του **EAK 2000 §3.2.3(2)** περιλαμβάνουν διαφορετικές τιμές για την απομείωση των ελαστικών ιδιοτήτων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα Β.2. Σημειώνεται πως σε παρένθεση δίνονται και οι προτεινόμενες τιμές που αναφέρονται στα σχόλια του **EAK 2000 §3.2.3[2]**.

Ιδιότητα	Δοκοί	Υποστυλώματα	Τοιχώματα
Cross-section (axial) area	1.0	1.0	1.0
Shear area in 2 direction	1.0	1.0	1.0
Shear area in 3 direction	1.0	1.0	1.0
Torsional constant	0.1	0.1	0.1
Moment of inertia about 2 axis	0.5 (0.4)	1.0 (0.60-0.80)	0.667
Moment of inertia about 3 axis	0.5 (0.4)	1.0 (0.60-0.80)	0.667

Πίνακας Β.2 Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων διατομής γραμμικών στοιχείων βάσει EAK 2000 (σε παρένθεση δίνονται οι τιμές που εμφανίζονται στα σχόλια του Κανονισμού, ενώ στο υποστυλίσμα οι δυο τιμές απομείωσης της ροπής αδράνειας αφορούν περιμετρικά και εσωτερικά υποστυλώματα αντίστοιχα).

Β.2. Παραδοχές επίλυσης επίπεδου φορέα οπλισμένου σκυροδέματος δίχως τη χρήση υπολογιστή (προσέγγιση αποτελεσμάτων επίλυσης με το χέρι)

Κατά την επίλυση ενός φορέα από ένα πρόγραμμα ανάλυσης, λαμβάνεται υπόψη το έργο όλων των εσωτερικών δυνάμεων και παραμορφώσεων των επιμέρους δομικών στοιχείων. Κάποια όμως από τα έργα των εσωτερικών εντατικών δυνάμεων, στις συνηθισμένες περιπτώσεις φορέων, έχουν μικρή επιρροή στην τελική τους απόκριση. Ενδεικτικά, οι αξονικές δυνάμεις προκαλούν ελάχιστη αυξομείωση του μήκους των δομικών στοιχείων σε μια κατασκευή και συνήθως δεν μεταβάλλουν ουσιαστικά τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης. Το ίδιο γίνεται και στην περίπτωση των τεμνουσών. Αντίθετα, η επιρροή των ροπών κάμψης και οι αντίστοιχες στροφές και καμπυλότητες που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση μιας κατασκευής είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

Έτσι, κατά την ανάλυση «με το χέρι» και για απλοποίηση των υπολογισμών, λαμβάνονται υπόψη μόνο τα έργα των εσωτερικών ροπών κάμψης και όχι αυτά των αξονικών και των τεμνουσών. Για να γίνει μια αντίστοιχη παραδοχή μηδενισμού της συνεισφοράς των έργων αξονικών και τεμνουσών στο πρόγραμμα **SAP 2000**, θα πρέπει κατά τον ορισμό των διατομών των δομικών στοιχείων να δοθούν οι συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων (*Property modifiers*) που φαίνονται στον Πίνακα Β.3. Στις τιμές του Πίνακα, για την περίπτωση δομικών στοιχείων δοκών, υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων, η τιμή ∞ μπορεί να δοθεί ως μια αρκούντως μεγάλη τιμή σε σχέση με τις κλασσικές ιδιότητες των στοιχείων. Ενδεικτικά, μια τιμή 1000 μπορεί να θεωρηθεί επαρκής, είτε πρόκειται για εμβαδόν είτε για επιφάνεια διάτμησης μιας διατομής. Θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση υπερβολικά μεγάλων τιμών, καθώς ενδέχεται να προκαλέσουν αριθμητική αστάθεια κατά την επίλυση.

Στην περίπτωση ύπαρξης στοιχείων ράβδου στο προσομοίωμα, δηλαδή αμφιαρθρωτού στοιχείου που φέρει μόνο αξονικό φορτίο, το μέγεθος το οποίο καθορίζει τη συμπεριφορά του είναι η αξονική παραμόρφωση που αναπτύσσεται. Συνεπώς, κατά την ανάλυση σε υπολογιστικό πρόγραμμα, είναι βασικό να διατηρηθεί η πραγματική τιμή εμβαδού της διατομής της ράβδου. Καθώς η ράβδος δεν καταπονείται σε κάμψη και διάτμηση, θα ήταν θεμιτό η επιρροή των παραγόντων αυτών να μηδενίζεται κατά την επίλυση (δηλαδή να δοθούν στα σχετικά πεδία μεγάλες τιμές *modifiers*). Σε κάθε περίπτωση όμως, λόγω της αρθρωτής σύνδεσης των ράβδων και της ύπαρξης μόνο επικόμβιων φορτίων σε αυτές, η στατική επίλυση θα δώσει ούτως ή άλλως μηδενικές τιμές ροπών και τεμνουσών. Συνεπώς, ακόμη και αν δεν αλλάξουν τα αντίστοιχα *modifiers* που δίνονται ως (1.0) στον Πίνακα Β.3, δεν πρόκειται να υπάρξει έργο ροπών ή τεμνουσών στα συγκεκριμένα στοιχεία κατά την ανάλυση στον υπολογιστή.

Ιδιότητα	Δοκός-Υποστύλωμα-Τοίχωμα	Ράβδος
Cross-section (axial) area	∞	1.0
Shear area in 2 direction	∞	(1.0)
Shear area in 3 direction	∞	(1.0)
Torsional constant	∞	(1.0)
Moment of inertia about 2 axis	1	(1.0)
Moment of inertia about 3 axis	1	(1.0)

Πίνακας Β.3 Συντελεστές τροποποίησης γεωμετρικών ιδιοτήτων διατομής γραμμικών στοιχείων για ταύτιση προσέγγισης επίλυσης «με το χέρι».

Παράρτημα Γ: Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Η φύση του συγγράμματος, με την χρήση ξενόγλωσσου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την εμβάθυνση σε θέματα προσομοίωσης κατασκευών, έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή εμφάνιση ξενόγλωσσων όρων και εντολών στο κείμενο του συγγράμματος. Παρακάτω δίνεται η απόδοση των ξενόγλωσσων όρων που σχετίζονται με τα βασικά επιστημονικά στοιχεία του γνωστικού αντικείμενου που αναπτύχθηκε όπως και με βασικές εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε.

Ξενόγλωσσος όρος	Απόδοση στα ελληνικά
absolute value	απόλυτη τιμή
acceptance criteria	κριτήρια (στάθμες) επιτελεστικότητας
analysis	ανάλυση
animation	κίνηση (εμφάνιση παραμόρφωσης φορέα με κίνηση)
area section	διατομή επιφανειακού στοιχείου
assignments	παράμετροι που έχουν ανατεθεί (σε κόμβο-στοιχείο του φορέα)
axial	αξονική (φόρτιση)
base reaction	αντίδραση (στήριξης) στη βάση
bay	άνοιγμα (δοκού)
beam	δοκός
bending	πάχος επιφανειακού στοιχείου για κάμψη εκτός επιπέδου
capacity	ικανότητα παραλαβής φορτίου
coefficient of thermal expansion	συντελεστής θερμικής διαστολής
column	υποστύλωμα
compression	θλίψη
concrete	σκυρόδεμα
confined concrete	περισφιγμένο σκυρόδεμα
confinement bars	συνδετήρες (εγκάρσιος οπλισμός)
constraint	καταναγκασμός (μετακίνησης)
convergence	σύγκλιση (κατά την ανάλυση)
coordinate system	σύστημα συντεταγμένων
CQC	πλήρης τετραγωνική επαλληλία
cross-section (axial) area	εμβαδόν διατομής
curvature	καμπυλότητα
damping	απόσβεση
dead load	μόνιμο φορτίο
deflection	απόκλιση (εδώ βύθιση π.χ. δοκού)

Ξενόγλωσσος όρος	Απόδοση στα ελληνικά
deformation	παραμόρφωση
deformed shape	παραμορφωμένη κατάσταση (μορφή) φορέα
design	διαστασιολόγηση
diagram	διάγραμμα (εντατικών μεγεθών)
diaphragm	διάφραγμα (διαφραγματική λειτουργία πλακών)
direct integration method	μέθοδος απευθείας ολοκλήρωσης στο χρόνο
displacement	μετακίνηση
display options	επιλογές απεικόνισης (στο πρόγραμμα)
distributed load	κατανεμημένο φορτίο
divide frames	διακριτοποίηση γραμμικών στοιχείων
dynamic analysis	δυναμική ανάλυση
dynamic soil-structure interaction	δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής
effective stiffness	ενεργός δυσκαμψία
elastic	ελαστικός (π.χ. ελαστική ανάλυση, συμπεριφορά)
end-I (start joint)	άκρο αρχής γραμμικού στοιχείου
end-J (end joint)	άκρο τέλους γραμμικού στοιχείου
envelope	περιβάλλουσα φορτίων/αποτελεσμάτων
explicit method	ρητή μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης
extrude view	εμφάνιση τρισδιάστατης απεικόνισης σχήματος διατομών
file	αρχείο
flange	συνεργαζόμενο πλάτος (σε διατομή πλακοδοκού)
force	δύναμη
frame	πλαίσιο (πλαισιακός φορέας)
frame section	διατομή γραμμικού στοιχείου
frequency	συχνότητα
geometric nonlinearity	γεωμετρική μη-γραμμικότητα
global coordinate system	γενικό σύστημα συντεταγμένων
gravity	βαρύτητα (χρησιμοποιείται ως δηλωτικό κατεύθυνσης)
grid lines	βοηθητικές γραμμές
hinge	πλαστική άρθρωση (στοιχείο του λογισμικού)
hinge length	μήκος πλαστικής άρθρωσης
implicit method	πεπλεγμένη μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης
inelastic	ανελαστικός (π.χ. ανελαστική ανάλυση, συμπεριφορά)
initial conditions	αρχικές συνθήκες

Ξενόγλωσσος όρος	Απόδοση στα ελληνικά
joints	κόμβοι
labels	ετικέτες (ονομασίες) στοιχείων φορέα
linear	γραμμικός (π.χ. γραμμική ανάλυση)
links	σύνδεσμος (στοιχείο του λογισμικού)
live load	κινητό φορτίο
load	φορτίο
load case	φορτιστική κατάσταση
load combination	συνδυασμός φόρτισης
load pattern	μορφή φόρτισης
local axes	τοπικοί άξονες
longitudinal bars	διαμήκεις ράβδοι οπλισμού
mass	μάζα
mass per unit volume	πυκνότητα (μάζα στη μονάδα του όγκου)
material	υλικό
membrane	πάχος επιφανειακού στοιχείου για δυνάμεις εντός επιπέδου
mesh	διακριτοποίηση
modal analysis	ιδιομορφική ανάλυση
modal participating mass ratio	ποσοστό ενεργοποίησης της μάζας σε ιδιομορφή
mode superposition method	μέθοδος επαλληλίας των ιδιομορφών
model	μοντέλο (προσομοίωμα)
modifier	τροποποιητικός συντελεστής (ιδιοτήτων στο λογισμικό)
modulus of elasticity	μέτρο ελαστικότητας
moment / bending moment	ροπή / ροπή κάμψης
moment of inertia	ροπή αδράνειας
nonlinear	μη-γραμμικός (π.χ. μη-γραμμική ανάλυση)
nonlinear static analysis	ανελαστική στατική ανάλυση (αλλιώς pushover analysis)
peak ground acceleration (PGA)	μέγιστη εδαφική επιτάχυνση
period	περίοδος
PMM interaction	αλληλεπίδραση ροπής-αξονικής (στα υποστυλώματα)
Poisson's ratio	δείκτης Poisson
pushover analysis	ανελαστική στατική ανάλυση ή υπερωθητική ανάλυση
pushover curve	καμπύλη αντίστασης φορέα
quake (load)	σεισμικό (φορτίο)
Rayleigh damping	απόσβεση τύπου Rayleigh

Ξενόγλωσσος όρος	Απόδοση στα ελληνικά
rectangular	ορθογώνιος
reinforcement	οπλισμός (σκυροδέματος)
relative value	σχετική τιμή
releases	απελευθέρωση κίνησης (π.χ. εσωτερική άρθρωση)
replicate	αναπαραγωγή στοιχείων φορέα (εντολή λογισμικού)
response spectrum	φάσμα απόκρισης
restraint	δέσμευση (βαθμού ελευθερίας)
rotation	στροφή
scale factor	συντελεστής κλίμακας (π.χ. μεγέθυνσης)
section	διατομή
self weight multiplier	πολλαπλασιαστής ιδίου βάρους
shear	τέμνουσα/διάτμηση
shear modulus	μέτρο διάτμησης
solid	χωρικό στοιχείο
springs	ελατήρια (συνθήκες στήριξης φορέα)
SRSS	τετραγωνική ρίζα αθροίσματος των τετραγώνων
static analysis	στατική ανάλυση
steel	χάλυβας
stem	κορμός πλακοδοκού
stiffness	δυσκαμψία
story	όροφος
strain	παραμόρφωση
stress	τάση
structure	κατασκευή
support	στήριξη (φορέα)
target displacement	μετακίνηση-στόχος (pushover analysis)
tension	εφελκυσμός
time history	χρονοϊστορία τιμών
time integration	ολοκλήρωση στο χρόνο
time step	χρονικό βήμα (ανάλυσης – αποτελεσμάτων)
torsional constant	στρεπτική αδράνεια διατομής
translation	μεταφορική (συνιστώσα κίνησης)
unconfined concrete	απερίσφιγκτο σκυρόδεμα
undeformed shape	απαραμόρφωτη κατάσταση (μορφή) φορέα

Ξενόγλωσσος όρος	Απόδοση στα ελληνικά
uniform load	ομοιόμορφο φορτίο
weight	βάρος
weight per unit volume	ειδικό βάρος (βάρος στη μονάδα του όγκου)
yield	διαρροή (διατομής)

Βιβλιογραφικές Αναφορές Παραρτήματος

- CEN (2004). *EN 1998–1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Computers and Structures Inc. (2010). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA: CSI.
- Computers and Structures, Inc. (n.d.). *Modeling cracked section properties for shear wall and slab*. CSI Knowledge Base. Retrieved from <https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Modeling+cracked+section+properties+for+shear+wall+and+slab>
- Right hand grip rule (n.d.). In *Wikimedia*. Retrieved April 03, 2015, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right-hand_grip_rule.svg
- Right hand rule cross product (n.d.). In *Wikimedia*. Retrieved April 03, 2015, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right_hand_rule_cross_product.svg (User:Acdx)
- Αβραμίδης, Ι., Αθανατοπούλου, Α., Μορφίδης, Κ., & Σέξτος, Α. (2011). *Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες*. Θεσσαλονίκη.
- Κίρτας, Ε., & Λιαλιαμπής, Ι. (2013). *Σημειώσεις θεωρίας: Ειδικά Κεφάλαια Στατικής*. Σέρρες: Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Σερρών.
- Μητσοπούλου, Ε. Ν. (1995). *Στατική των Γραμμικών Φορέων*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων ΑΠΘ.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).