

ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**"Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και
Αειφόρος Ανάπτυξη"**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Αθανασίου Τσάρα

Επιβλέπων

Γεώργιος Μαγείρου, Καθηγητής, Πολιτικών Μηχανικών

Αθήνα, Ιούνιος 2019

	Περίληψη	11
	1^ο Κεφάλαιο	
	Αρχές σχεδιασμού μεθόδου αναλύσεων	
1.1	Εισαγωγή	14
1.2	Στόχοι μη γραμμικής στατικής ανάλυσης	15
1.3	Πλεονεκτήματα ανελαστικής ανάλυσης	15
1.4	Χρήση Pushover σε νέα και υφιστάμενα κτίρια	16
1.4.1	Νέα Κτίρια	16
1.4.2	Υφιστάμενα Κτίρια	16
1.5	Φορτία και μέλη της κατασκευής	17
1.6	Κατανομή σεισμικών φορτίων	17
1.6.1	Οριζόντια Κατανομή Φορτίων	17
1.6.2	Καθ' ύψος Κατανομή	18
1.7	Οριακές καταστάσεις	19
1.8	Δράσεις	19
1.9	Φορτία Χιονιού	20
1.10	Φορτίο Ανέμου	20
1.10.1	Απόκριση των κατασκευών	21
1.10.2	Προσομοίωση της δράσης του ανέμου	21
1.11	Περιγραφή της μεθόδου ανελαστικής στατικής ανάλυσης (PUSHOVER)	21
1.12	Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης	24
1.13	Πλαστικές αρθρώσεις	25
1.14	Εφαρμογή πλευρικής ώθησης	26

1.14.1	Αδυναμίες της μεθόδου	26
1.14.2	Πεδίο χρήσης	27

2^ο Κεφάλαιο

Δυναμικές αναλύσεις

2.1	Εισαγωγή	27
2.2	Ανελαστική Δυναμική Ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας)	28
2.3	Ελαστική δυναμική ανάλυση (φασματική ή χρονοϊστορίας)	29
2.3.1	Μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης	29
2.4	Ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση	30

3^ο Κεφάλαιο

Στοχευόμενη μετατόπιση μέθοδος N2 EC8

3.1	Περιγραφή των βασικών διατάξεων του EC8 σχετικά με την εφαρμογή της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης Pushover	32
3.2	Μετατροπή του πολυβάθμιου συστήματος σε ισοδύναμο μονοβάθμιο.	32
3.3	Ευρωκώδικας 8 – Οριζόντιο ελαστικό φάσμα απόκρισης (§3.2.2.2)	36
3.4	Ευρωκώδικας 8 – Φάσμα σχεδιασμού (§3.2.2.5)	38
3.5	Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακίνησης	40
3.6	Εδαφική μετακίνηση σχεδιασμού	41
3.7	Εναλλακτικές αναπαραστάσεις της σεισμικής δράσης	41
3.7.1	Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα	41
3.7.2	Καταγραφές ή προσομοιώσεις επιταχυνσιογραφημάτων	41
3.8	Συνδυασμοί δράσεων	42
3.8.1	Οριακές καταστάσεις αστοχίας	42
3.8.2	Μάζες	43

4° Κεφάλαιο

Κατάταξη των διατομών

4.1	Βασικές αρχές	44
4.1.1	Κατάταξη	44
4.2	Οριακές καταστάσεις αστοχίας	49
4.3	Αντοχή διατομών	49
4.4	Ιδιότητες διατομής	51
4.4.1	Πλήρης διατομή	51
4.4.2	Καθαρή διατομή	51
4.5	Εξασφαλίσεις σε στρεφόμενες πλαστικές αρθρώσεις	53

5° Κεφάλαιο

Ανάλυση και παρουσίαση του μοντέλου

5.1	Δεδομένα κατασκευής μοντέλου	55
5.2	Βήματα μοντελοποίησης της κατασκευής	56
5.3	Ιδιομορφική φασματική ανάλυση	80
5.4	Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης	86
5.5	Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)	91
5.6	Αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης	100
5.7	Ισοδύναμη στατική ανάλυση	104

6° Κεφάλαιο

Συμπεράσματα

6	Συμπέρασμα	106
	Βιβλιογραφία	107

Παραρτήματα

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1	Διευθύνσεις φόρτισης διαφράγματος χωρίς τυχηματική εκκεντρότητα και με τυχηματική εκκεντρότητα	18
Εικόνα 1.2	Τριγωνική κατανομή φόρτισης καθ' ύψος	18
Εικόνα 1.3	Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης καθ' ύψος	19
Εικόνα 1.4	Ορισμός στροφής χορδής θ	22
Εικόνα 1.5	Σκελετικό διάγραμμα συμπεριφοράς	23
Εικόνα 1.6	Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη αντίστασης	24
Εικόνα 1.7	Διγραμμικοποίηση καμπύλης αντίστασης	25
Εικόνα 3.1	Μετατροπή της καμπύλης αντίστασης του πολυβάθμιου συστήματος σε φάσμα ικανότητας του μονοβάθμιου ισοδύναμου συστήματος	34
Εικόνα 3.2	Μετατροπή μεγεθών από το πολυβάθμιο σύστημα για τη δημιουργία του διαγράμματος ADRS	35
Εικόνα 4.1	Οπές ζικ-ζακ και κρίσιμες γραμμές θραύσης 1 και 2	52
Εικόνα 4.2	Γωνιακά με οπές και στα δύο σκέλη	52
Εικόνα 4.3	Τυπική δύσκαμπτη στρεπτική εξασφάλιση	53
Εικόνα 4.4	Τυπική πλευρική και στρεπτική εξασφάλιση του θλιβόμενου πέλματος με πλάκα σκυροδέματος	53
Εικόνα 5.1	Αρχικό παράθυρο προγράμματος	56
Εικόνα 5.2	Δημιουργία νέου αρχείου	56
Εικόνα 5.3	Αρχικές ρυθμίσεις	57
Εικόνα 5.4	Αρχικές ρυθμίσεις	57
Εικόνα 5.5	Κάνναβος	58
Εικόνα 5.6	Ιδιότητες υλικών	58
Εικόνα 5.7	Παράθυρο ορισμού υλικών	59
Εικόνα 5.8	Ιδιότητες νέου υλικού	59

Εικόνα 5.9	Ιδιότητες νέου υλικού	60
Εικόνα 5.10	Διατομές μελών	60
Εικόνα 5.11	Τύπος σχήματος διατομής ανάλογα με το υλικό	61
Εικόνα 5.12	Τύπος σχήματος διατομής ανάλογα με το υλικό	61
Εικόνα 5.13	Σχεδιασμός δοκών/υποστυλωμάτων	62
Εικόνα 5.14	Κατασκευή	62
Εικόνα 5.15	Επιλογή υποστυλωμάτων	63
Εικόνα 5.16	Επιλογή διατομής για τα υποστυλώματα	63
Εικόνα 5.17	Επιλογή διατομής για τα υποστυλώματα	64
Εικόνα 5.18	(α) Διατομές μετά τον ορισμό των υποστυλωμάτων, επιλογή των δοκών και (β) επιλογή διατομής και για τις δοκούς	64
Εικόνα 5.19	Επιλογή κόμβων στηρίξεων για να ορίσουμε πακτώσεις	65
Εικόνα 5.20	Βαθμοί ελευθερίας στήριξης	65
Εικόνα 5.21	Πακτώσεις στην βάση της θεμελίωσης	66
Εικόνα 5.22	Τροποποιούμε τις ιδιότητες του στοιχείου πλάκας	66
Εικόνα 5.23	Ιδιότητες πλάκας	67
Εικόνα 5.24	Στοιχείο πλάκας σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση	67
Εικόνα 5.25	Ορισμός διαφράγματος	68
Εικόνα 5.26	Τροποποίηση στοιχείων διαφράγματος	68
Εικόνα 5.27	Επιλογή άκαμπτου διαφράγματος	69
Εικόνα 5.28	Επιλογή κόμβων και ορισμός διαφράγματος	69
Εικόνα 5.29	Επιλογή διαφράγματος	70
Εικόνα 5.30	Διάφραγμα στην στάθμη της πλάκας	70
Εικόνα 5.31	Ορισμός μαζών από ίδια βάρη, πρόσθετες μάζες και συνδυασμό φορτίσεων	71
Εικόνα 5.32	Ορισμός φορτίσεων	71
Εικόνα 5.33	Φορτίσεις. Το ίδιο βάρος συμπεριλαμβάνεται στα μόνιμα (dead) φορτία	72

Εικόνα 5.34	Ορισμός load case	72
Εικόνα 5.35	Περιπτώσεις φορτίσεων	73
Εικόνα 5.36	Επιλογή συνδυασμού φορτίσεων	73
Εικόνα 5.37	Ορισμός του συνδυασμού 1.35g + 1.50q	74
Εικόνα 5.38	Ορισμός φορτίου της πλάκας	74
Εικόνα 5.39	Επιλογή κατανεμημένου φορτίου στις δοκούς	75
Εικόνα 5.40	Ορισμός κατανεμημένου φορτίου γραμμικού στοιχείου	75
Εικόνα 5.41	Ακαμπτοι κόμβοι - End length offsets	76
Εικόνα 5.42	Ορισμός ενεργών βαθμών ελευθερίας	76
Εικόνα 5.43	Ενεργοί βαθμοί ελευθερίας	77
Εικόνα 5.44	Επιλογή περιπτώσεων φόρτισης για να τρέξει στην ανάλυση	77
Εικόνα 5.45	Ορισμός περιπτώσεων φορτίσεων για να πραγματοποιήσει την ανάλυση	78
Εικόνα 5.46	Αποτελέσματα ανάλυσης – παραμορφωμένος φορέας από τα μόνιμα φορτία	78
Εικόνα 5.47	Διάγραμμα ροπών περί τον τοπικό άξονα 3 της διατομής των στοιχείων	79
Εικόνα 5.48	Διάγραμμα ροπών στην πλάκα από τα μόνιμα φορτία	79
Εικόνα 5.49	Εισαγωγή φάσματος απόκρισης	80
Εικόνα 5.50	Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8	80
Εικόνα 5.51	Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8	81
Εικόνα 5.52	Ορισμός load case	81
Εικόνα 5.53	Ορισμός νέου load case	82
Εικόνα 5.54	Νέο load case για δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση X	82
Εικόνα 5.55	Νέο load case για δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση Y	83
Εικόνα 5.56	Ορισμός συνδυασμών φορτίσεων	83
Εικόνα 5.57	Συνδυασμοί φορτίσεων	84

Εικόνα 5.58	Βασικός συνδυασμός φορτίσεων	84
Εικόνα 5.59	Σεισμικός συνδυασμός	85
Εικόνα 5.60	Ορισμός νέου Load Pattern	86
Εικόνα 5.61	Ορισμός νέου Load Pattern	86
Εικόνα 5.62	Τροποποίηση του σεισμικού Load Pattern	87
Εικόνα 5.63	Load Cases	87
Εικόνα 5.64	Load Case Data Ex	88
Εικόνα 5.65	Ορισμός συνδυασμών φορτίσεων	88
Εικόνα 5.66	Συνδυασμοί φορτίσεων	89
Εικόνα 5.67	Εισαγωγή φάσματος απόκρισης	89
Εικόνα 5.68	Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8	90
Εικόνα 5.69	Δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση x	90
Εικόνα 5.70	Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων	91
Εικόνα 5.71	Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων	91
Εικόνα 5.72	Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων	92
Εικόνα 5.73	Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων	93
Εικόνα 5.74	Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων	93
Εικόνα 5.75	Ορισμός διαγράμματος ροπών – στροφών	94
Εικόνα 5.76	Ορισμός διαγράμματος ροπών – στροφών	95
Εικόνα 5.77	Απόδοση πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη	95
Εικόνα 5.78	Απόδοση πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη	96
Εικόνα 5.79	Επιλογή εμφάνισης πλαστικών αρθρώσεων	96
Εικόνα 5.80	Ορισμός νέου Load Case για την μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover)	97
Εικόνα 5.81	Load application control for nonlinear static analysis	98
Εικόνα 5.82	Nonlinear parameters	98
Εικόνα 5.83	Nonlinear parameters	99
Εικόνα 5.84	Επιλογή καμπύλης pushover	100

Εικόνα 5.85	Επιλογή καμπύλης pushover	101
Εικόνα 5.86	Επιλογή για εξαγωγή τιμών καμπύλης pushover	101
Εικόνα 5.87	Τιμές καμπύλης pushover	102
Εικόνα 5.88	Καμπύλη ADRS και σημείο επιτελεστικότητας (performance point)	102
Εικόνα 5.89	Επιλογές για τις πλαστικές αρθρώσεις για την φόρτιση pushover στον παραμορφωμένο φορέα	103
Εικόνα 5.90	Πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή	103
Εικόνα 5.91	Define load patterns	104
Εικόνα 5.92	Seismic Load Pattern – Eurocode 8 2004	104

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1	Βασικές απαιτήσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τα μέλη και τις φορτίσεις της κατασκευής	17
Πίνακας 3.1	Ζώνες επικινδυνότητας	36
Πίνακας 3.2	Κατηγορία σπουδαιότητας	36
Πίνακας 3.3	Κατηγορία εδάφους	36
Πίνακας 3.4	Ζώνες επικινδυνότητας	38
Πίνακας 3.5	Κατηγορία σπουδαιότητας	38
Πίνακας 3.6	Κατηγορία εδάφους	39
Πίνακας 3.7	Εδαφικός τύπος	40
Πίνακας 4.1	Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα	46
Πίνακας 4.2	Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα	47
Πίνακας 4.3	Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα	48

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 3.1	Ελαστικό φάσμα απόκρισης σε οριζόντια διεύθυνση	37
Σχήμα 3.2	Ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 2 για εδάφη A-E (με απόσβεση 5%)	37
Σχήμα 3.3	Ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 1 για εδάφη A-E (με 5% απόσβεση)	39
Σχήμα 3.4	Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακίνησης	40

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Αθανάσιος Τσάρας
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Γεώργιος Μαγείρου, Καθηγητής, Πολιτικών Μηχανικών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2018-19

Περίληψη

Οι σύγχρονες κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε ένα μεγάλο αριθμό φορτίσεων που θα δεχτούν κατά την διάρκεια ζωής τους. Η ακριβής εξέλιξη των θερμομηχανικών αυτών φορτίσεων μέσα στον χρόνο δεν μπορεί να είναι γνωστή, βέβαια μπορούν να εκτιμηθούν κάποια όρια εντός των οποίων θα μεταβάλλεται. Ο συνήθης τρόπος αντιμετώπισης της μη-γραμμικής, μη-ελαστικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής είναι οι ανελαστικές βηματικές αναλύσεις στα πλαίσια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με τη γραμμικοποίηση του βήματος μεταβολής της φόρτισης. Στην περίπτωση όμως που τα φορτία μεταβάλλονται κατά άγνωστο τρόπο, εντός κάποιων ορίων θα έπρεπε να εκτελεστεί μια πληθώρα βηματικών αναλύσεων για να καλυφθούν όλα τα πιθανά σενάρια φόρτισης αποφόρτισης. Εφόσον μια κατασκευή πληρεί κάποιες προϋποθέσεις πλαστικότητας (μέταλλα όπως ο χάλυβας την ικανοποιούν) οι έμμεσες μέθοδοι της πλαστικότητας προσφέρουν μια εναλλακτική. Οι πολλές βηματικές αναλύσεις του φορέα αντικαθίστανται με ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, συνήθως μεγάλης κλίμακας. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορίζουν τα μετελαστικά περιθώρια ασφαλείας του φορέα υπό φορτία μεταβαλλόμενα εντός γνωστών ορίων. Η υλοποίηση τέτοιων μεθόδων πραγματοποιείται με το συνδυασμό της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με τεχνικές μαθηματικής βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν τα βασικά σημεία στα οποία βασίζεται η ανελαστική μέθοδος αποτίμησης ή ανασχεδιασμού, Pushover. Η μέθοδος έχει ως στόχο να αναδείξει κατά πολύ καλή προσέγγιση, την απόκριση μίας κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, κατά κύριο λόγο, καθώς δίνει τη δυνατότητα στον μελετητή μηχανικό να έχει πλήρη γνώση της συμπεριφοράς της σε κάθε χρονική στιγμή. Παρουσιάζονται επίσης τα σημεία εκείνα τα οποία χρήζουν προσοχής όσον αφορά το πεδίο χρήσης της καθώς και αδυναμίες οι οποίες έχουν εντοπιστεί. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διαδικασία σχεδιασμού και διαστασιολόγησης ενός έργου με χαλύβδινο φέροντα οργανισμό με πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, με χρήση ενός εμπορικά διατιθέμενου προγράμματος. Το κτίριο που επιλέχθηκε προς μελέτη είναι ένα εξαώροφο κτίριο μεγάλων ανοιγμάτων για εμπορική χρήση. Οι διαστάσεις του κτιρίου είναι είναι 52 m x 30 m. Η ανάλυση και η διαστασιολόγηση του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με βάση τους Ευρωκώδικες. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι κανονισμοί: - Ευρωκώδικας 0: Βάσεις σχεδιασμού - Ευρωκώδικας 1: Γενικές δράσεις (Μέρος 1-1) Φορτία χιονιού (Μέρος 1-3) Δράσεις ανέμου (Μέρος 1-4) - Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών (Μέρος 1-1) Σχεδιασμός κόμβων (Μέρος 1-8) - Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα (Μέρος 1-1) - Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός (Μέρος 1-1) Η επίλυση του κτιρίου έγινε με το στατικό πρόγραμμα ETABS. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές σχεδιασμού των μεθόδων αναλύσεων, τα φορτία και η κατανομή τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις δυναμικές αναλύσεις. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η στοχευόμενη μετατόπιση με την μέθοδο N2 του EC8, καθώς και η περιγραφή των βασικών διατάξεων του EC8 σχετικά με την εφαρμογή της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης Pushover. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πίνακες, σύμφωνα με τους οποίους γίνεται η κατάταξη και η αντοχή των διατομών. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του μοντέλου και τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

POST-GRADUATE THESIS: **«INVESTIGATION OF SEISMIC BEHAVIOR OF METAL INSTITUTE WITH STABILIZED CONNECTIONS»**

STUDENT: **Athanasios Tsaras**

SUPERVISOR: **George Magiroy, Professor, civil Engineers**

ACADEMIC YEAR: **2018-19**

Summary

Modern structures are designed to be able to handle a large number of loads that they will receive during their lifetime. The exact evolution of these thermo-mechanical loads over time can not be known, of course some limits within which it will change. The usual way of dealing with the non-linear, non-elastic behavior of a structure is the inelastic step analyzes in the finite element method with the linearization of the charge change step. However, in the case where loads are altered in an unknown way, a number of stepwise analyzes should be performed within some limits to cover all possible loading scenarios. If a structure meets certain plasticity requirements (metals such as steel satisfy it), indirect methods of plasticity offer an alternative. Multiple step analyzes of the vector are replaced by an optimization problem, usually on a large scale. Indirect methods determine the carrier's metaplastic safety margins under varying loads within known limits. The implementation of such methods is carried out by combining the finite element method with mathematical optimization techniques. In the present paper we will present the basic points on which the inelastic method of valuation or redesign is based, Pushover. The method is designed to show a very good approach to the response of a construction during an earthquake, primarily as it enables the mechanical engineer to have full knowledge of its behavior at any time. There are also those points that need attention in terms of its scope and weaknesses that have been identified. The subject of this diploma thesis is the process of designing and designing a work with a steel structure with reinforced concrete slabs, using a commercially available program. The building that was selected for study is a six-storey building with large openings for commercial use. The dimensions of the building are 52 m x 30 m. The analysis and sizing of the building was carried out on the basis of the Eurocodes. In particular, the following regulations were used: - Eurocode 0: Design bases - Eurocode 1: General actions (Part 1-1) Loads of snow (Part 1-3) Wind actions (Part 1-4) - Eurocode 3: 1-1) Design of joints (Part 1-8) - Eurocode 4: Design of composite structures made of steel and concrete (Part 1-1) - Eurocode 8: Earthquake design (Part 1-1) Resolving the building was done with the static program ETABS. The first chapter presents the principles of designing analysis methods and the distribution of loads. In the second chapter, reference is made to dynamic analyzes. In the third chapter we analyze the targeted displacement with the N8 method of EC8 as well as the description of the basic EC8 provisions regarding the application of non-linear static Pushover analysis. In the fourth chapter are presented the tables, according to which the classification and the strength of the sections are made. In the fifth chapter we present the model design process and the results of the analyzes.

Δήλωση περί μη λογοκλοπής

Δηλώνω ότι είμαι ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας με τίτλο “ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ” που συντάχθηκε στα πλαίσια του μαθήματος “Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη” και παραδόθηκε το μήνα Ιούνιο 2019. Η αναφερόμενη εργασία δεν αποτελεί αντιγραφή ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σαφώς στη βιβλιογραφία και στο κείμενο ενώ κάθε εξωτερική βοήθεια, αν υπήρξε, αναγνωρίζεται ρητά.

Όνομα: ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΤΣΑΡΑΣ

ΑΜ: 74

Υπογραφή

Ημερομηνία: 10/06/2019



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Ένα πρόβλημα εξαιρετικής σημασίας στη δομοστατική μηχανική είναι ο υπολογισμός της απόκρισης ελαστοπλαστικών φορέων υπό στατική ή δυναμική φόρτιση. Οι ισοδύναμες στατικές αναλύσεις που προτεινόνταν από τους κανονισμούς τα προηγούμενα χρόνια, αδυνατούσαν να αποκαλύψουν την πραγματική συμπεριφορά των κατασκευών. Η ραγδαία εξέλιξη των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών και των αλγορίθμων επίλυσης έχει καταστήσει πλέον δυνατή την εφαρμογή των ανελαστικών μεθόδων υπολογισμού από τους μηχανικούς της πράξης. Η μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών εξελίσσεται όλο ένα και περισσότερο σε ένα αναγκαίο εργαλείο του δομοστατικού σχεδιασμού. Όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί, όπως ο Ευρωπαϊκός κανονισμός για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών (Ευρωκώδικας 8, 2004), τα πρότυπα του Αμερικάνικου συλλόγου πολιτικών μηχανικών για τη σεισμική αποκατάσταση υπάρχουσων κατασκευών (ASCE, 2007) και ο Ελληνικός κανονισμός επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ, 2012) προτείνουν ότι η διαθέσιμη πλαστιμότητα μιας κατασκευής θα πρέπει να προσδιορίζεται μέσω μιας στατικής, ανελαστικής ανάλυσης Pushover. Αντίθετα, μια δυναμική, ελαστοπλαστική ανάλυση χρονοϊστορίας δεν προτείνεται ακόμα, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας και του υπέρογκου υπολογιστικού κόστους που αυτή απαιτεί. Η προτίμηση των κανονισμών στην ανάλυση Pushover αποδίδεται στο συνδυασμό της ακριβέστερης προσέγγισης της συμπεριφοράς των μελών μέσω της ενσωμάτωσης μη-γραμμικών προσομοιωμάτων των υλικών, ενώ η σεισμική ένταση εκφράζεται απλά μέσω μίας αυξανόμενης οριζόντιας στατικής φόρτισης. Η οριζόντια φόρτιση κατανέμεται ανάλογα με τις αδρανειακές δυνάμεις και αυξάνεται σταδιακά μέχρι την κατάρρευση του δομήματος. Ως κατάρρευση ορίζεται η δημιουργία πλαστικού μηχανισμού, ή η αδυναμία του φορέα να αναλάβει τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας. Οι προκύπτουσες παραμορφώσεις της κατασκευής συγκρίνονται έπειτα με τα όρια παραμόρφωσης που ορίζουν οι στάθμες επιτελεστικότητας. Πρώτο βήμα για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας ενός κτηρίου είναι η προσομοίωση του φορέα στο υπολογιστικό πρόγραμμα που είναι διαθέσιμο. Με τον όρο ‘φορέας’ νοείται το στατικό σύστημα που αναλαμβάνει τις κύριες δράσεις που ενεργούν και καταπονούν το κτήριο. Το στατικό σύστημα μπορεί να αποτελείται μόνο από τα κύρια στοιχεία ή σε συνδυασμό με τα δευτερεύοντα (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ §5.1.2). Ανάλογα τώρα με τα διαθέσιμα δεδομένα αλλά και την εγκυρότητά τους ορίζονται τρεις στάθμες αξιοπιστίας δεδομένων (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ §3.6.2): υψηλή, ικανοποιητική, ανεκτή. Στη συνέχεια με βάση τα υπάρχοντα σχέδια της στατικής μελέτης, ορίζονται οι διατομές των δομικών στοιχείων με τον αντίστοιχο οπλισμό, ποιότητα υλικών (σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού, δομικού χάλυβα κλπ.). Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των κατακόρυφων φορτίσεων οι οποίες δρουν στην κατασκευή. Οι φορτίσεις αυτές θα ενταχθούν ως ομοιόμορφα κατανεμημένες ανά τρέχον μέτρο στις δοκούς, προερχόμενες από τις επιφάνειες επιρροής των πλακών, λόγω μη προσομοίωσης των τελευταίων. Τυχόν συγκεντρωμένες δράσεις (δυνάμεις, ροπές) εισάγονται στις θέσεις που ενεργούν δημιουργώντας αντίστοιχους κόμβους. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τυπικές παραδοχές (υλικά, φορτίσεις, συντελεστές ασφάλειας κλπ.). Αν θέλουμε να λάβουμε υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης γίνεται χρήση ελαστικών ελατηρίων (οριζόντιας μετακίνησης, κατακόρυφης μετακίνησης, στροφής) τα οποία χαρακτηρίζονται από ανάλογες δυσκαμψίες, καθώς επίσης εισάγεται και ο αντίστοιχος δείκτης συμπίεστικότητας του εδάφους. Τέλος, οι πλάκες διαμορφώνονται ως διαφράγματα με τρεις βαθμούς ελευθερίας (δύο οριζόντιας μετάθεσης και ενός στροφής). Επιπλέον παράμετροι που πρέπει να συνεκτιμηθούν στην προσομοίωση του φορέα είναι τα φαινόμενα στρέψης, η μορφολογία του δομήματος, αν χαρακτηρίζεται δηλαδή ως κανονικό ή μη (καθ’ ύψος, σε κάτοψη), οι επιρροές 2ης τάξης (στατικές και δυναμικές) καθώς επίσης να ληφθούν υπόψη οι ανάλογες παραδοχές για τις δυσκαμψίες και τις αντιστάσεις των δομικών στοιχείων.

1.2 Στόχοι μη γραμμικής στατικής ανάλυσης

Η μια εκ των δύο ανελαστικών ειδών ανάλυσης κατασκευών που προτείνονται στους σύγχρονους κανονισμούς είναι η ανελαστική στατική ανάλυση ή αλλιώς πιο γνωστή ως ανάλυση Pushover. Η χρήση της μεθόδου έχει μια σειρά στόχων:

- Τη δημιουργία της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης κορυφής. Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη βάση για όλους τους απαιτούμενους ελέγχους ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας.
- Την τεκμηρίωση της ύπαρξης επαρκούς υπεραντοχής στο κτίριο (λόγος $au/a1$).
- Την εποπτεία της συμπεριφοράς των μελών της κατασκευής ως προς τη σειρά και τα σημεία εμφάνισης των πλαστικών αρθρώσεων. Επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο η αποτύπωση της κατανομής των ζημιών στην κατασκευή και γίνεται κατανοητός ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας καθώς και ο έλεγχος σχεδιαστικών απαιτήσεων, όπως ο ικανοτικός σχεδιασμός ισχυρού υποστυλώματος-ασθενούς δοκού.
- Ο μελετητής μηχανικός έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τη μέθοδο Pushover τόσο στην αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό παλαιότερων κτιρίων όσο και στην ανάλυση νέων κατασκευών. Η χρήση της μεθόδου στον ανασχεδιασμό παλαιότερων κατασκευών και στη μελέτη νέων κατασκευών διαφοροποιείται σε ορισμένα σημεία όπως αναλύεται παρακάτω.
[1] [4]

1.3 Πλεονεκτήματα ανελαστικής ανάλυσης

Η μη γραμμική ανάλυση υπερέχει της κλασικής ελαστικής καθώς παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα.

- Είναι πιο ακριβής διότι δεν βασίζεται μόνο στη δυσκαμψία των μελών, αλλά συνεκτιμά και την αντοχή τους. Επίσης, καθιστά δυνατό τον έλεγχο της δυνατότητας παραμόρφωσης όπως αυτή διαμορφώνεται βάσει π.χ. της περίσφιγξης και της λεπτομέρειας όπλισης.
- Εξασφαλίζεται η εποπτεία κατανομής των βλαβών στον φορέα.
- Γίνεται απαλλαγή από ικανοτικά προσομοιώματα.
- Μπορεί να ελεγχθεί η επάρκεια του φορέα για πολλές επιτελεστικότητες ταυτόχρονα (*Άμεση χρήση, Προστασία ζωής, Αποφυγή κατάρρευσης*).
- Παρέχει πληροφόρηση σχετικά με την μορφή της δομικής ανεπάρκειας και βοηθάει να σχεδιαστεί η ενίσχυση είτε με αύξηση της αντοχής, είτε με αύξηση της πλαστιμότητας, είτε με συνδυασμό τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στο τέλος μιας στατικής μελέτης με βάση τη μη γραμμική ανάλυση επιτυγχάνεται ο πληρέστερος έλεγχος της συμπεριφοράς της κατασκευής, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η οικονομικότητα χωρίς υποχωρήσεις στην ασφάλεια. [4]

1.4 Χρήση Pushover σε νέα και υφιστάμενα κτίρια

Η μη γραμμική στατική ανάλυση είναι απαραίτητη όπως προαναφέρθηκε, για διαφορετικούς λόγους τόσο σε νέα όσο και σε παλιά κτίρια. Η διαφοροποίηση έγκειται στο σκοπό που επιδιώκεται να επιτευχθεί μέσω της ανάλυσης αυτής.

1.4.1 Νέα Κτίρια

Σε νέα κτίρια επιδιώκεται μέσω της ανάλυσης Pushover, η χάραξη της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής και εξ' αυτής ο προσδιορισμός του λόγου u/a_1 . Ο λόγος u/a_1 χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς q της κατασκευής. Οι απαραίτητοι έλεγχοι της κατασκευής παρόλα αυτά πραγματοποιούνται με βάση τα αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης. Θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης γνώση της γεωμετρίας του φορέα της κατασκευής, της θεωρητικής ποιότητας των χρησιμοποιούμενων υλικών και των κατασκευαστικών λεπτομερειών. [1] [12]

1.4.2 Υφιστάμενα Κτίρια

Σε παλαιές κατασκευές που αποτιμώνται ή ανασχεδιάζονται, στόχος της ανάλυσης Pushover είναι η χάραξη της καμπύλης αντίστασης και βάσει αυτής, ο προσδιορισμός του σημείου επιτελεστικότητας για δεδομένη σεισμική διέγερση. Με βάση το σημείο επιτελεστικότητας πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι σε όρους παραμορφώσεων ή δυνάμεων. Θεωρείται ότι υπάρχει γνώση της γεωμετρίας του φορέα της κατασκευής, της πραγματικής ποιότητας των χρησιμοποιούμενων υλικών και των κατασκευαστικών λεπτομερειών που μπορεί να κυμαίνεται από πλήρης έως περιορισμένη. [1] [12]

1.5 Φορτία και μέλη της κατασκευής

Αρχές προσομοίωσης	Διατάξεις
<p>A. Τα κατακόρυφα φορτία των στοιχείων θα συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα, ώστε να συνδυάζονται με τα οριζόντια φορτία σύμφωνα με το σεισμικό συνδυασμό του EC8-1 (§4.3.3.4.1 (5)P).</p> <p>B. Εφαρμογή των πλευρικών στατικών φορτίων στη στάθμη κάθε διαφράγματος σύμφωνα με την κατανομή των αδρανειακών σεισμικών δυνάμεων.</p> <p>C. Η εφαρμογή τους σε δύο αντίθετες διευθύνσεις («θετική» - «αρνητική»), θα οδηγήσει σε δυο αποτελέσματα για κάθε κρίσιμη διατομή, εκ των οποίων το δυσμενέστερο θα χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο.</p> <p>D. Στο προσομοίωμα θα συμπεριλαμβάνονται γενικά τόσο τα κύρια, όσο και τα δευτερεύοντα στοιχεία, αλλά και οι τοιχοπληρώσεις εφόσον λαμβάνεται υπόψη η φάση εξασθένησης της αντίστασης του στοιχείου. Σε αντίθετη περίπτωση τα δευτερεύοντα στοιχεία θα αποκλείονται από την ανάλυση.</p>	KAN.EΠΕ. (§5.7.3.1)

Πίνακας 1: Βασικές απαιτήσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τα μέλη και τις φορτίσεις της κατασκευής.
(Πηγή: www.oasp.gr)

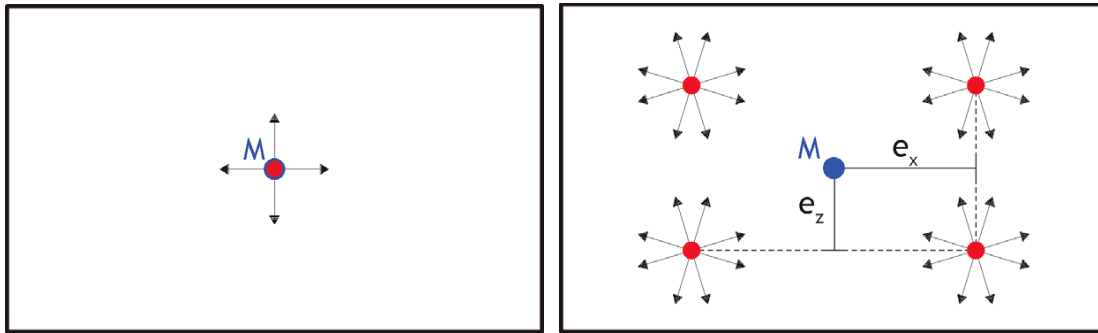
1.6 Κατανομή σεισμικών φορτίων

Η σεισμική ένταση εκφράζεται με οριζόντια φόρτιση κατανομής σύμφωνης με την κατανομή των αδρανειακών δυνάμεων, η οποία αυξάνεται σταδιακά μέχρι το επίπεδο της κρίσιμης μετακίνησης του δομήματος, το οποίο ταυτίζεται με την οροφή του κτιρίου. [2] [10] [11]

1.6.1 Οριζόντια Κατανομή Φορτίων

Η εφαρμογή των οριζόντιων φορτίων γίνεται στη στάθμη του διαφράγματος (πλάκα ορόφου). (EC8-3, ΚΑΝ.ΕΠΕ. §5.7.3.3). Εφαρμόζονται σε δύο διευθύνσεις για θετικό και αρνητικό πρόσημο σύμφωνα με την EC8-1 §4.3.3.4.1(7)A και ΚΑΝ.ΕΠΕ §5.7.3.1(β). Για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις που προκύπτουν εφαρμόζονται δυο καθ' ύψος κατανομές των οριζόντιων φορτίων παράγοντας έτσι συνολικά 8 φορτίσεις. Δυνατή είναι επίσης η εισαγωγή τυχηματικής εκκεντρότητας προκειμένου να υλοποιηθεί η απαίτηση της EC8-1 §4.3.3.5.1 για συνδυασμό των οριζόντιων δράσεων. Δεδομένης της μη γραμμικότητας της ανάλυσης δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Συνεπώς, για να επιτευχθεί χωρική επαλληλία οι συνδυασμοί δράσεων που λαμβάνονται καλύπτουν όλες τις διευθύνσεις φόρτισης εισάγοντας π.χ. φορτία σε δύο κάθετες διευθύνσεις. Έπειτα, για να ληφθεί υπόψη η ταυτόχρονη δράση των εντατικών μεγεθών,

αυτά συνδιάζονται με τον κανόνα του 100/30, δηλαδή λαμβάνοντας το 100% των μεγεθών στην κύρια διεύθυνση φόρτισης και το 30% στη δευτερεύουσα.[1] [2] [11]

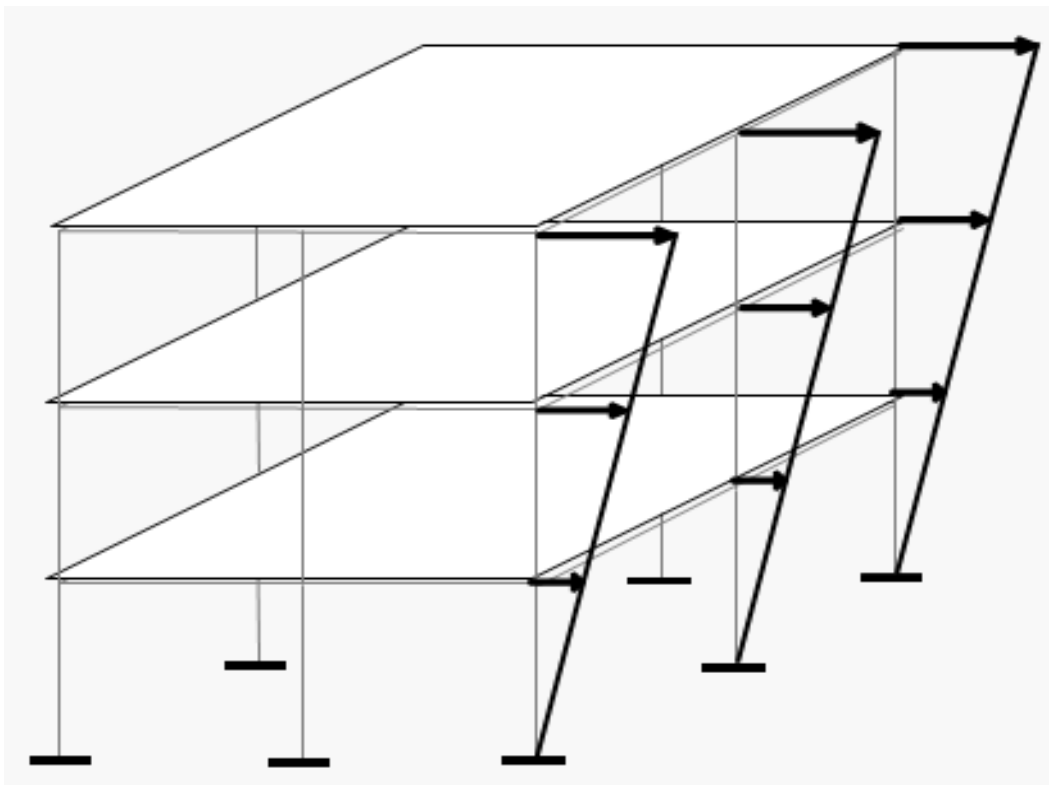


Εικόνα 1.1: Διευθύνσεις φόρτισης διαφράγματος χωρίς τυχηματική εκκεντρότητα και με τυχηματική εκκεντρότητα.

(Πηγή: <http://www.episkeves2.civil.upatras.gr>)

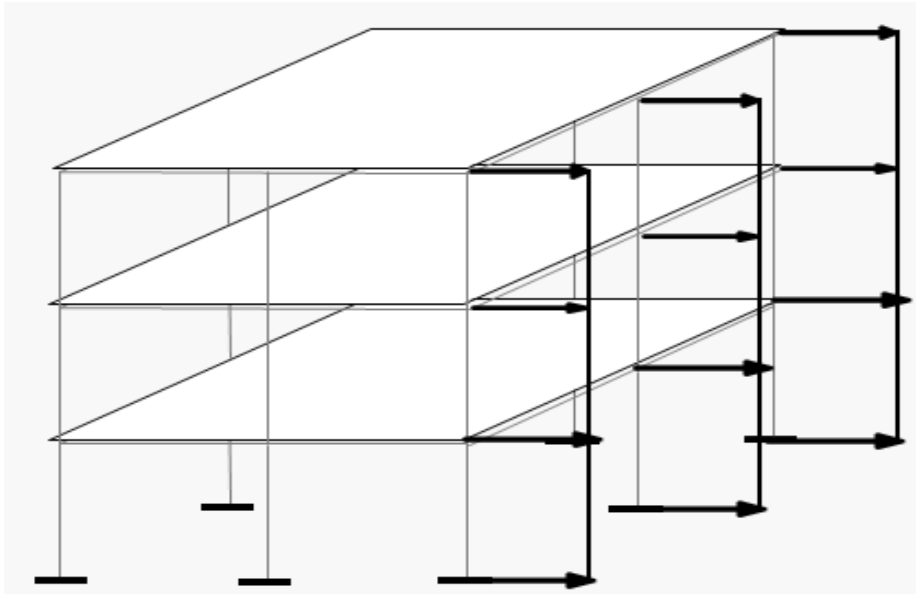
1.6.2 Καθ' ύψος Κατανομή

- **Τριγωνική Κατανομή** (EC8-3 §4.4.4.1): Η επιλογή της 1ης κατανομής οριζόντιων φορτίων είναι ανάλογη με πλευρικές δυνάμεις που είναι συμβατές με την κατανομή οριζόντιων δυνάμεων που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση όπως αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 1.2. [10] [11]



Εικόνα 1.2: Τριγωνική κατανομή φόρτισης καθ' ύψος.
(Πηγή: <http://www.lhlogismiki.gr>)

- **Ομοιόμορφη Κατανομή** (EC8-3 §4.4.4.1): Η επιλογή της 2ης κατανομής οριζοντίων φορτίων βασίζεται σε οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες είναι ανάλογες με τη μάζα ανεξάρτητα από τη στάθμη. [7] [12]



Εικόνα 1.3: Ιδιομορφική κατανομή φόρτισης καθ' ύψος
(Πηγή: <http://www.lhlogismiki.gr>)

1.7 Οριακές καταστάσεις

Οριακές καταστάσεις ονομάζονται αυτές, πέραν των οποίων η κατασκευές δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις ασφαλείας και λειτουργικότητας του σχεδιασμού. Διακρίνονται σε οριακές καταστάσεις αστοχίας, που αντιστοιχούν σε καταρρεύσεις ή άλλου είδους αστοχίες λόγω απώλειας ισορροπίας της κατασκευής ή λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων που θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, και σε οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας πέραν των οποίων δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια λειτουργικότητας της κατασκευής. [11] [12]

1.8 Δράσεις

Οι δράσεις που επιβάλλονται στις κατασκευές ταξινομούνται σε άμεσες (π.χ. φορτία) και έμμεσες (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές, σεισμός) και ως προς το χρόνο σε μόνιμες (π.χ. ίδιο βάρος), μεταβλητές (π.χ. φορτία χιονιού, φορτία ανέμου) και τυχηματικές (π.χ. εκρήξεις). Σε ορισμένες περιπτώσεις, κάποιες δράσεις μπορεί να θεωρούνται είτε ως τυχηματικές ή ως μεταβλητές. Ακόμα, ως προς την θέση τους ταξινομούνται σε καθορισμένες (π.χ. ίδιο βάρος) ή ελεύθερες (π.χ. κινητά φορτία) και τέλος, ως προς την φύση τους ταξινομούνται σε στατικές ή δυναμικές. Οι χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων που προαναφέρθηκαν δίνονται αναλυτικά στα διάφορα Μέρη του EN1991. Ανάλογες χαρακτηριστικές τιμές για τις - 7 -ιδιότητες των υλικών, προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή των διατομών ή των μελών της κατασκευής, δίνονται στα υπόλοιπα EN(1992-1999). [12]

1.9 Φορτία Χιονιού

Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων λόγω χιονόπτωσης δίνονται στο πρότυπο EN1991-1-3, το οποίο δίνει οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων χιονιού τόσο σε νηνεμία όσο και με ταυτόχρονη ύπαρξη ανέμων. Γενικά προτείνεται μεθοδολογία υπολογισμού για κτήρια σε υψόμετρο $H \leq 1500\text{m}$ ενώ σε σχετικό παράρτημα δίνονται συστάσεις για τον υπολογισμό σε ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες με υψηλές ταχύτητες ανέμου και λιώσιμο του χιονιού καθώς και σε περιπτώσεις όπου παρουσιάζονται ειδικές μορφές συγκέντρωσης χιονιού. Τα φορτία χιονιού θεωρούνται στατικά φορτία και λογίζονται ως μεταβλητές δράσεις. Σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατό να θεωρηθούν ως τυχηματικές δράσεις. Οι συστάσεις δεν καλύπτουν ειδικές περιπτώσεις που μπορούν να εμφανιστούν και που είναι δυνατό να προκαλέσουν μερική ή ολική αστοχία της κατασκευής. Ενδεικτικά ΔΕΝ αναφέρονται σε:

- Φορτία από πτώση χιονιού λόγω ολίσθησης από ψηλότερη σε χαμηλότερη στέγη.
- Τυχών πρόσθετα φορτία ανεμοπίεσης που είναι δυνατό να προκύψουν λόγω της αλλαγής του σχήματος ή/και των διαστάσεων της στέγης που οφείλεται στην παρουσία χιονιού ή πάγου.
- Φορτία πάγου.
- Φορτία σε περιοχές όπου υπάρχει χιόνι όλο το έτος.
- Πλευρικές φορτίσεις λόγω χιονιού.
- Φορτία χιονιού σε γέφυρες.
- Αύξηση των φορτίων λόγω μεγάλης έντασης βροχόπτωσης πάνω στο χιόνι.
- Φορτία που μπορεί να προκύψουν από το φράξιμο αποχετευτικών συστημάτων λόγω χιονιού ή πάγου.

Επίσης οι οδηγίες αφορούν στον υπολογισμό των φορτίων χιονιού με φυσική απόθεση και δεν αφορούν πιθανή τεχνητή αφαίρεση ή αναδιανομή του χιονιού στη στέγη με ανθρώπινη επέμβαση. [10] [11]

1.10 Φορτίο Ανέμου

Οι δράσεις του ανέμου κατατάσσονται στις μεταβλητές, ως προς το χρόνο, δράσεις και θεωρείται ότι εφαρμόζονται άμεσα στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου και έμμεσα στις εσωτερικές λόγω του πορώδους των υλικών κατασκευής. Υπάρχει όμως και η περίπτωση να εφαρμόζονται άμεσα στις εσωτερικές επιφάνειες από κάποιο άνοιγμα, π.χ. παράθυρο. Κατά τους υπολογισμούς, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι υπόλοιπες δράσεις (π.χ. χιόνι, πάγος, κυκλοφορία κλπ) ή αλλαγές (π.χ. ανοίγματα, πόρτες κλπ που δύναται να τροποποιήσουν την εξωτερική ή εσωτερική πίεση) που μπορούν να δράσουν στην κατασκευή και να τροποποιήσουν την επιφάνεια υπολογισμού των φορτίσεων. Σημειώνεται ότι οι κατασκευές που είναι ευαίσθητες σε δυναμικές καταπονήσεις σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη και την κόπωση. Επίσης, όταν μια επιφάνεια φορτίζεται από άνεμο παράλληλο προς την επιφάνεια, αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής οι οποίες, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι αρκετά σημαντικές. [10] [11]

Έτσι, κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών, εξετάζουμε :

- Τον τυρβώδη άνεμο ο οποίος δρα σε ολόκληρη την κατασκευή ή σε κάποιο τμήμα της.
- Τις μεταβαλλόμενες δυνάμεις και τις μεταβαλλόμενες πιέσεις που προκαλούνται στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής.
- Τις μεταβαλλόμενες δυνάμεις που προκαλούνται λόγω της κίνησης της κατασκευής από την δράση του ανέμου.

1.10.1 Απόκριση των κατασκευών

Η επίδραση του ανέμου στην απόκριση της κατασκευής, εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και γενικά, θεωρείται ότι δρα σαν το σύνολο μιας στατικής και μιας δυναμικής έντασης η οποία όμως, δυναμική ένταση, στις περισσότερες κατασκευές είναι αμελητέα. Όμως, οι εύκαμπτες κατασκευές (π.χ. καπνοδόχοι, παρατηρητήρια, ιστοί και γέφυρες, ορισμένα πολυώροφα κτίρια κλπ) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό λόγω της δυναμικής επιρροής σε αυτά από την τυρβώδη ροή του ανέμου.

1.10.2 Προσομοίωση της δράσης του ανέμου

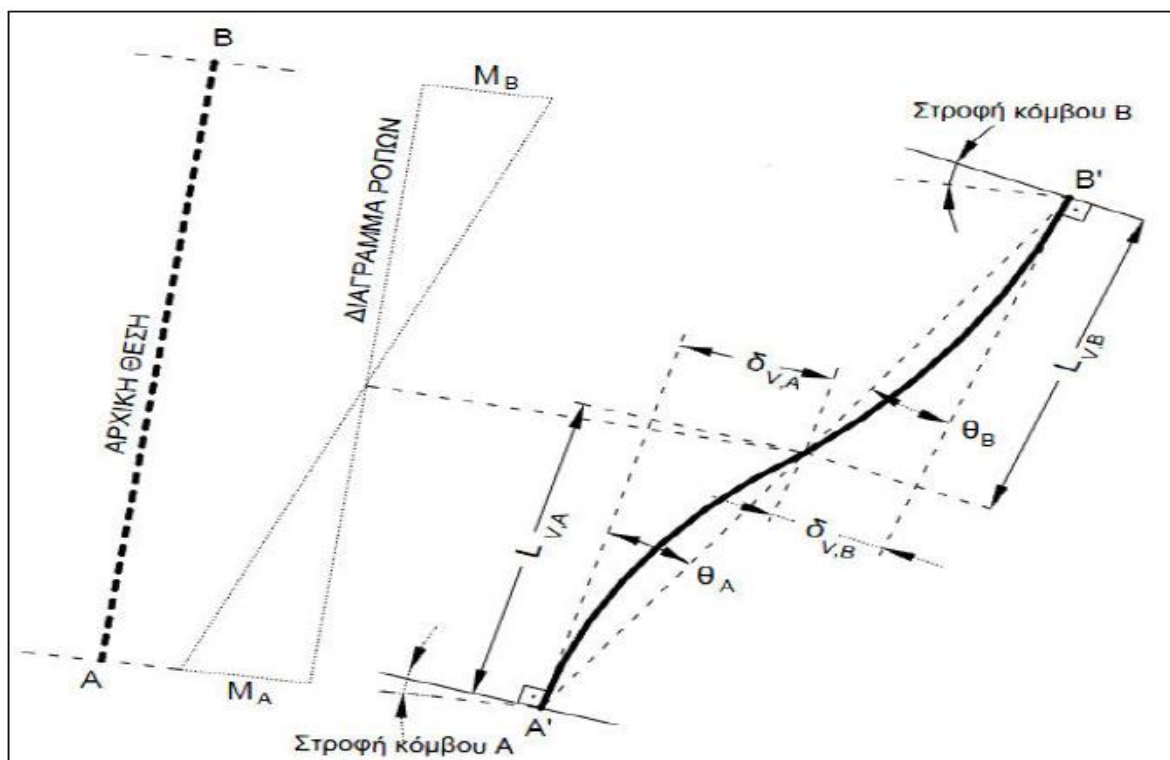
Η δράση του ανέμου διακρίνεται στην πίεση του ανέμου (η οποία ενεργεί κάθετα στην επιφάνεια της κατασκευής) και στην δύναμη του ανέμου. Κατά την διάρκεια πειραματικών δοκιμών με την χρήση κατάλληλων προσομοιωμάτων φυσικού ανέμου, θα πρέπει να πληρούνται δυο συνθήκες:

- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος συναρτήσει των συνθηκών του εδάφους της εκάστοτε περιοχής που βρίσκεται η κατασκευή.
- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική τυρβώδης ροή του ανέμου στην εκάστοτε περιοχή που βρίσκεται η κατασκευή.

1.11 Περιγραφή της μεθόδου ανελαστικής στατικής ανάλυσης (PUSHOVER)

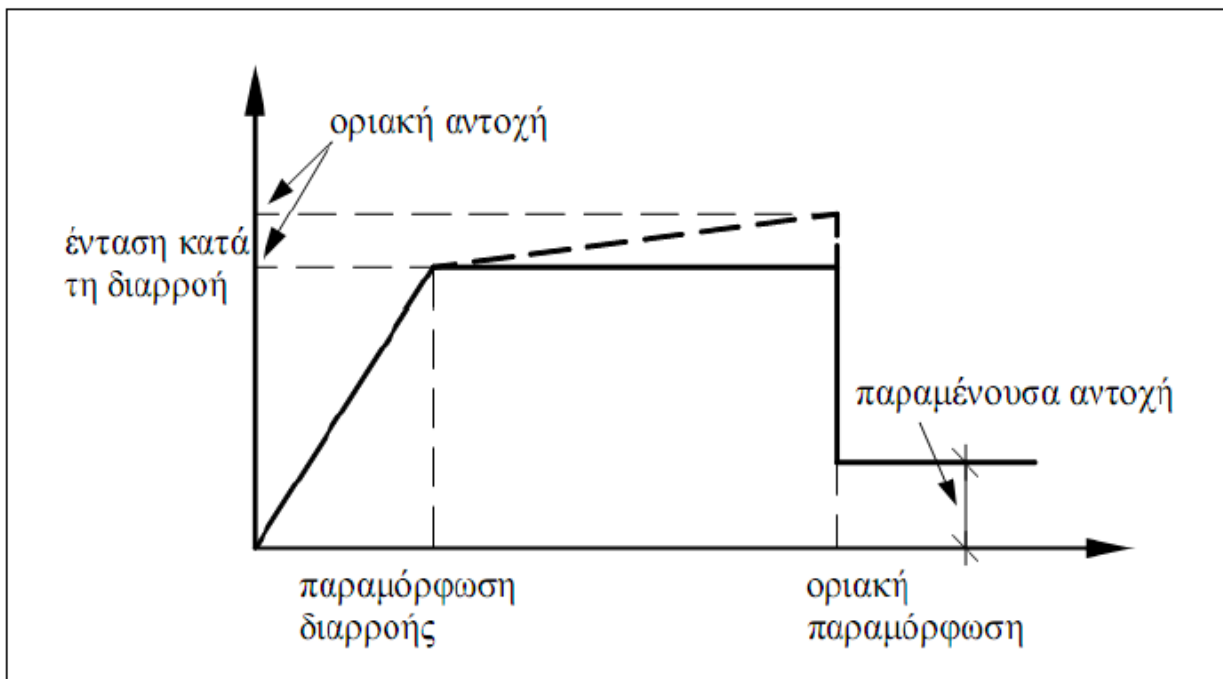
Κύριος στόχος της στατικής ανελαστικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία της κατασκευής, όταν αυτή υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός. Τα μεγέθη αυτά των ανελαστικών παραμορφώσεων συγκρίνονται με τις επιτρεπόμενες τιμές που προσδιορίζονται με βάση τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας και τις ικανότητες των μελών. Στη στατική ανελαστική ανάλυση χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα του φορέα το οποίο λαμβάνει υπόψη ανελαστικούς νόμους φορτίου-παραμόρφωσης για τα επιμέρους δομικά στοιχεία του κτιρίου. Ειδικότερα για το σκυρόδεμα, λόγω του ότι οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν, χρησιμοποιείται ο ανελαστικός νόμος ροπής-κάμψης – γωνία στροφής χορδής (M-θ). Όσον αφορά τις στάθμες επιτελεστικότητας για έλεγχο σε όρους παραμορφώσεων:

- Οριακή Κατάσταση Περιορισμού Βλαβών (DL)
Η ικανότητα δίδεται από τη γωνία στροφής χορδής σε διαρροή θ_{γ} .
- Οριακή Κατάσταση Σημαντικών Βλαβών (SD)
Η ικανότητα γωνίας στροφής χορδής η οποία αντιστοιχεί σε σημαντική βλάβη θ_{SD} μπορεί να θεωρείται ότι είναι το 0.75 της οριακής στροφής χορδής θ_{um} που δίδεται στην παραπάνω σχέση.
- Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC)
Η ικανότητα δίδεται από τη συνολική γωνία στροφής χορδής θ_{um} .



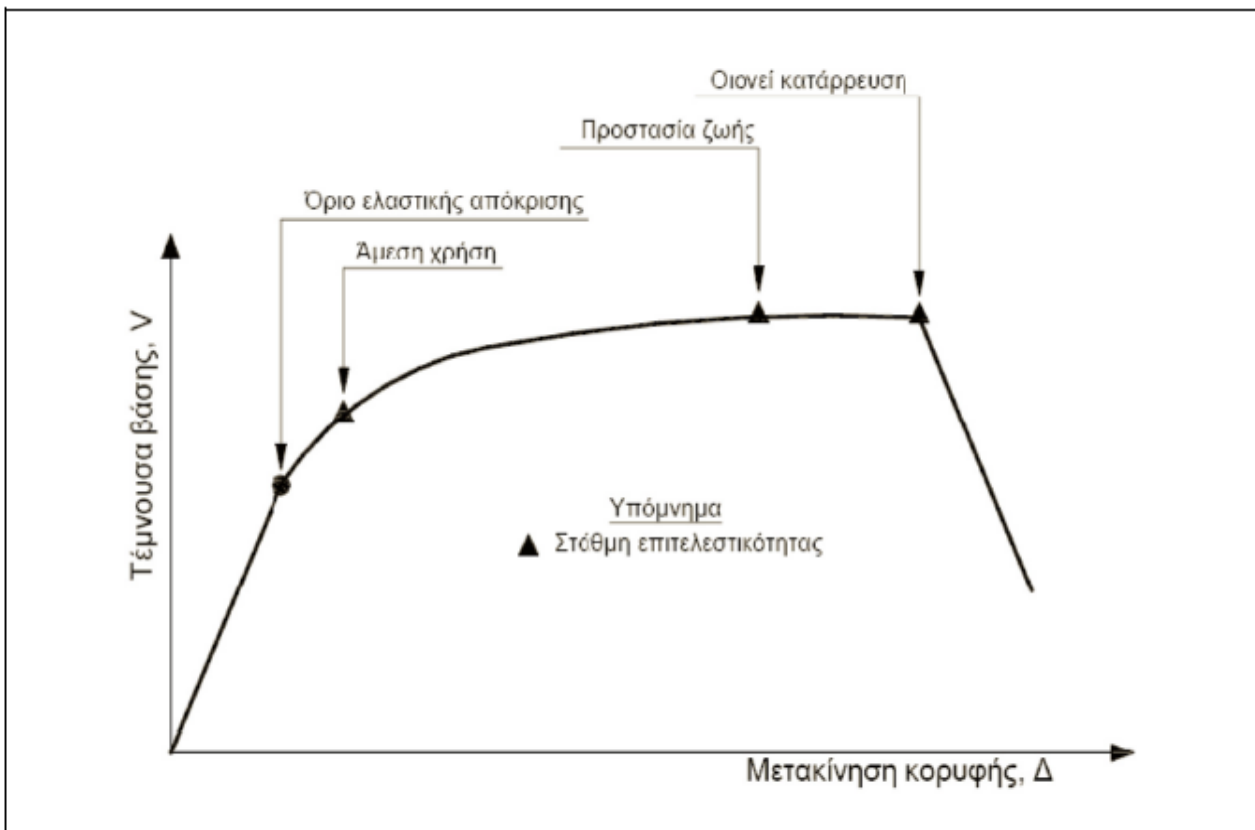
Εικόνα 1.4: Ορισμός στροφής χορδής θ .
(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

Το προσομοίωμα φορτίζεται με οριζόντια φορτία διαφορετικών κατανομών καθ' ύψος, τα οποία αυξάνουν μονότονα και αναπαριστούν τις αδρανειακές δυνάμεις που εμφανίζονται στα επίπεδα των ορόφων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Η ανάλυση διενεργείται μέχρι να σημειωθεί αστοχία του φορέα. Η συνήθης μορφή αστοχίας είναι η αστοχία σε κάμψη μίας κρίσιμης διατομής (ο ικανοτικός σχεδιασμός που επιβάλλουν οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εξασφαλίζει ότι η καμπτική αστοχία προηγείται πάντοτε της διατμητικής) ή η μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό, τοπικά ή συνολικά. Σε κάθε περιοχή που αναμένεται να εμφανιστεί ανελαστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη η σχέση φορτίου – παραμόρφωσης μέσω πλήρων καμπυλών μονότονης φόρτισης μέχρι την αστοχία. Οι καμπύλες αυτές περιλαμβάνουν την φάση εξασθένισης του στοιχείου, καθώς και την παραμένουσα αντοχή του και έχουν την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 1.5: Σκελετικό διάγραμμα συμπεριφοράς.
(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

Από την ανάλυση του προσομοιώματος κατασκευάζεται η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη σχέση μεταξύ της τέμνουσας βάσης, V_b του κτηρίου και της μετατόπισης κορυφής, δ . Με βάση αυτή την καμπύλη γίνονται όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεσματικότητας. Για τον προσδιορισμό της στοχευόμενης μετακίνησης ωστόσο, απαιτείται η αντικατάσταση της καμπύλης αντίστασης από μία εξιδανικευμένη διγραμμική καμπύλη από την οποία προσδιορίζεται η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία, K_θ και η αντίστοιχη τέμνουσα διαρροής, V_y . Η στοχευόμενη μετατόπιση της κατασκευής υπολογίζεται για δεδομένη περίοδο επαναφοράς του σεισμού κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ (βλ. Κεφάλαιο 5 §5.7.4). Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη μετακίνηση της κορυφής της κατασκευής, σημειώνεται πάνω στην καμπύλη το αντίστοιχο σημείο επιτελεσματικότητας και συγκρίνεται με την επιθυμητή στάθμη για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Η μεθοδολογία ATC-40 και η μέθοδος συντελεστών παρουσιάζονται στον ATC-40 (Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings 1996). Επίσης περιγράφονται μαζί με τη μέθοδο N2 στις σημειώσεις Γ. Ν. Ψυχάρη του μαθήματος Αντισεισμική Τεχνολογία 2 της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. [1] [3] [8]



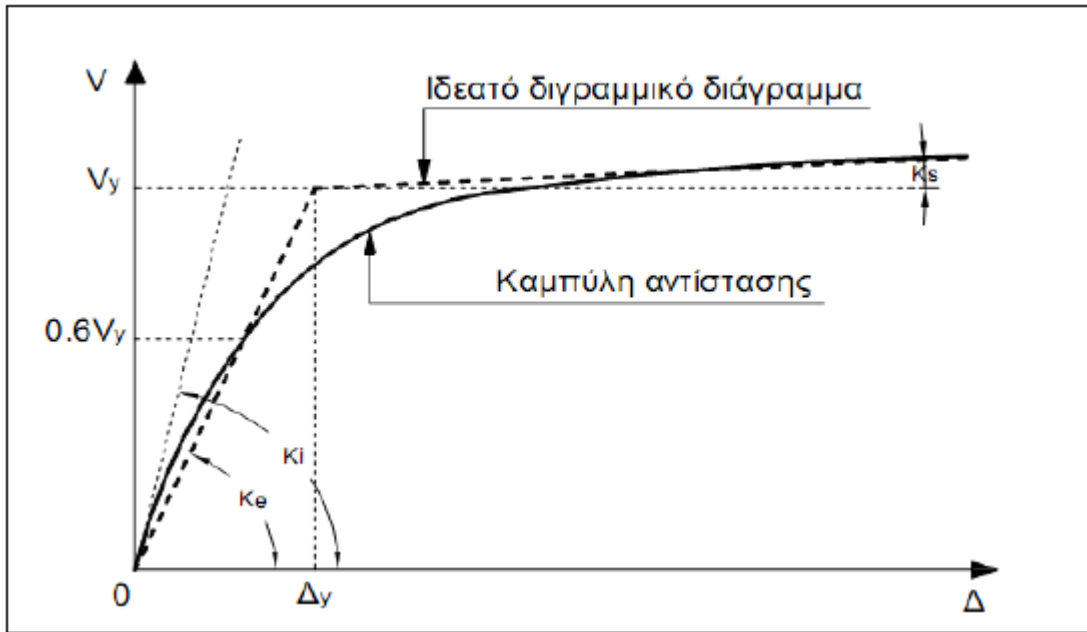
Εικόνα 1.6: Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη αντίστασης.
(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

1.12 Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης

Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης βασίζεται στη θεωρία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Στη συνέχεια αναφέρονται τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου. [2]

Βήμα 1: Διγραμμικοποίηση της καμπύλης αντίστασης (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ §5.7.3.4)

- Κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος με δυσκαμψία η οποία επιλέγεται αυθαίρετα κατά την κρίση του μηχανικού και θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία, διέρχεται από το σημείο όπου η καμπύλη αντίστασης έχει γίνει περίπου οριζόντια.
- Προσδιορίζεται η ισοδύναμη ελαστική αντίσταση K_e , ως η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο της καμπύλης αντίστασης, που αντιστοιχεί σε τέμνουσα ίση με το 60% της τέμνουσας διαρροής, V_y .
- Τελικά, η τέμνουσα διαρροής αντιστοιχεί στο σημείο τομής των δύο προηγούμενων ευθειών, που αντιστοιχούν στον ελαστικό και τον μετελαστικό κλάδο αντίστοιχα.



Εικόνα 1.7: Διγραμμικοποίηση καμπύλης αντίστασης.
(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

Βήμα 2: Προσδιορισμός της ενεργούς θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, T_e .

Η ισοδύναμη κυριαρχούσα ιδιοπερίοδος για ελαστική δυσκαμψία της κατασκευής K_e , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ §5.7.3.5):

$$T_e = T \sqrt{K_0 / K_e} \quad (1.1)$$

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

Βήμα 3: Εύρεση της στοχευόμενης μετακίνησης, δ_t .

Για δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού, η στοχευόμενη μετακίνηση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ §5.7.4.2):

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * (T_0^2 / 4\pi^2) * S_e(T) \quad (1.2)$$

Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών αναφέρονται στην αντίστοιχη ανωτέρω παράγραφο.

1.13 Πλαστικές αρθρώσεις

Κύριος στόχος σε μια κατασκευή είναι ο προσδιορισμός του τρόπου και των θέσεων εκδήλωσης ανελαστικών παραμορφώσεων και η εκτίμηση του μεγέθους τους συγκριτικά με τις αποδεκτές τιμές. Η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας εξασφαλίζεται κυρίως μέσω των πλαστικών αρθρώσεων. Για την εφαρμογή των ανελαστικών αναλύσεων, θα πρέπει να καθορίσουμε τα μέλη, καθώς και τα σημεία τους στα οποία ενδέχεται να εμφανιστούν πλαστικές αρθρώσεις.

Πρόκειται για το σύνολο των μελών της κατασκευής – υποστυλώματα, τοιχώματα και δοκοί – στα σημεία αρχής και τέλους. Ειδικότερα, για τα υποστυλώματα ορίζεται κρίσιμη η αλληλεπίδραση σε διαξονική κάμψη κατά τις δύο διευθύνσεις και αξονική δύναμη και για τις δοκούς αλληλεπίδραση μόνο σε καμπτική ροπή περί τον άξονα 3-3. Στη λογική αυτή, απαιτείται ο προσδιορισμός διαφορετικών πλαστικών αρθρώσεων, που θα εφαρμοστούν στα άκρα των στοιχείων για κάθε δοκό, ανάλογα με την ροπή διαρροής της. Αντίστοιχα, οι πλαστικές αρθρώσεις των υποστυλωμάτων θα πρέπει να οριστούν για κάθε ένα χωριστά, ώστε να περιέχουν τις τιμές των αξονικών δυνάμεων οι οποίες θα ληφθούν κατά το δυσμενέστερο από τον στατικό συνδυασμό $1.35G + 1.50Q$. [1] [8] [9]

1.14 Εφαρμογή πλευρικής ώθησης

Η ανάλυση πλευρικής ώθησης περιλαμβάνει δύο φάσεις φόρτισης. Κατά την πρώτη φάση, λαμβάνονται υπόψη οι αρχικές φορτικές συνθήκες $G+0.3Q$, ανάλογες της σεισμικής δράσης και ακολουθείται μια στατική μη – γραμμική ανάλυση υπό μηδενικές αρχικές συνθήκες. Στη φάση αυτή η κατασκευή πρέπει να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, διαφορετικά αστοχεί υπό τα ίδια βάρη της. Η επόμενη φάση συνεχίζει από το τέλος της πρώτης και περιλαμβάνει τη σταδιακή εξώθηση της κατασκευής, δηλαδή τη σταδιακή επιβολή οριζόντιων σεισμικών φορτίων σε κάθε όροφο του κτηρίου. Η καθ' ύψος κατανομή φόρτισης επιλέγεται τριγωνική ανάλογη της πρώτης ιδιομορφής με μέγιστη τιμή μονάδα στην κορυφή του τελευταίου ορόφου και σταδιακή μείωση προς τους χαμηλότερους ορόφους. Τα φορτία αυτά σημειώνουν μονότονη αύξηση και πρακτικά αναπαριστούν τις εμφανιζόμενες αδρανειακές δυνάμεις ανά όροφο κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Απαραίτητη είναι η επιλογή ενός κόμβου ελέγχου στον οποίο προσδίδεται μία μέγιστη μετακίνηση. Η αύξηση της φόρτισης συνεχίζεται μέχρι η παραμόρφωση στον εκλεγμένο κόμβο ελέγχου να φτάσει τη μετακίνηση αυτή. Πρόκειται για μια προαποφασισμένη ακραία τιμή η οποία δεν πρόκειται να αναληφθεί από την κατασκευή, αλλά αποσκοπεί στην ανάδειξη της πορείας της αστοχίας. Η παραπάνω φόρτιση εφαρμόζεται στα κέντρα μάζας κάθε ορόφου με σταδιακή αύξηση του φορτίου καθ' ύψος ανάλογη με το ύψος του ορόφου. Η μέθοδος φόρτισης - αποφόρτισης που χρησιμοποιείται είναι αυτή της αποφόρτισης όλης της κατασκευής. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι όταν μια πλαστική άρθρωση φτάσει σε κάποιο τμήμα του διαγράμματος $M-\theta$ με αρνητική κλίση, η πλευρική φόρτιση της κατασκευής συνεχίζεται έως ότου η επιπρόσθετη παραμόρφωση να αποκτήσει αρνητική τιμή. Εφόσον τώρα η παραμόρφωση αντιστραφεί, η κατασκευή αποφορτίζεται, δηλαδή σημειώνεται μείωση της κατανομής της πλευρικής παραμόρφωσης. Η μείωση εξακολουθεί μέχρι την πλήρη αποφόρτιση της εν λόγω πλαστικής άρθρωσης. Στη συνέχεια, η κατασκευή επαναφορτίζεται και κάποιο άλλο τμήμα της αναλαμβάνει το ποσοστό της φόρτισης που αφαιρέθηκε από τη συγκεκριμένη πλαστική άρθρωση.

1.14.1 Αδυναμίες της μεθόδου

- Λαμβάνει υπόψη μόνο την οριζόντια συνιστώσα του σεισμού.
- Αγνοεί την κινητική ενέργεια και την απόσβεση της σεισμικής φόρτισης.
- Ανελαστική στατική ανάλυση (Pushover) υφιστάμενου κτηρίου.
- Αγνοεί τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης και τη συσσώρευση της σεισμικής ενέργειας.
- Η σταδιακή μεταβολή της δυσκαμψίας, των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, των ιδιοπεριόδων και της αντίστοιχης φασματικής απόκρισης δεν μπορούν να ενταχθούν στην ανάλυση.

1.14.2 Πεδίο χρήσης

Σε κατασκευές στις οποίες η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, παρατηρείται απώλεια ακρίβειας. Για το λόγο αυτό προτείνεται εφαρμογή της μεθόδου σε συνδυασμό με μία συμπληρωματική ελαστική δυναμική ανάλυση.

δομήματα που χαρακτηρίζονται από μη-κανονικότητες στο χώρο (σε κάτοψη, καθ' ύψος) καθώς και εκείνα που παρουσιάζουν έντονα στρεπτικά φαινόμενα, προσομοιώνονται δύσκολα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε, οι δυναμικές εν χρόνω αναλύσεις είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων. Η σεισμική φόρτιση εκφράζεται με την μορφή πραγματικού ή τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος σεισμικής διέγερσης. Η δυναμική ανελαστική ανάλυση προσεγγίζει με μεγάλη αμεσότητα την ανελαστική απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, οπότε τα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη αποτελούν ορθολογικές προσεγγίσεις των αναμενόμενων κατά την διάρκεια του σεισμού. Έτσι, η δυναμική ανελαστική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε φορέα, χωρίς τους περιορισμούς της στατικής ανελαστικής ανάλυσης και μπορεί να θεωρηθεί η ακριβέστερη μέθοδος ανάλυσης. Ωστόσο, η απόκριση της κατασκευής μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα χαρακτηριστικά των επιβαλλόμενων επιταχυνσιογραφημάτων. Οπότε η δυναμική ανελαστική ανάλυση πρέπει να επαναλαμβάνεται για αρκετές εδαφικές διεγέρσεις. Μία καλή εκτίμηση της αναμενόμενης σεισμικής απόκρισης μίας κατασκευής μπορεί να επιτευχθεί αν επιλεγεί προσεκτικά ένα σύνολο κατάλληλων καταγραφών εδαφικών διεγέρσεων. Η εφαρμογή της ανελαστικής εν χρόνω ανάλυσης απαιτεί την αξιόπιστη προσομοίωση της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς των μελών. Έτσι, αν και η ακρίβεια και η ισχύς των υπολογιστικών εργαλείων έχει αυξηθεί σημαντικά, υπάρχουν ακόμα αρκετές επιφυλάξεις για τις δυναμικές ανελαστικές αναλύσεις, ως προς την πολυπλοκότητα και την καταλληλότητά τους σε πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού.

Η ανελαστική εν χρόνω ανάλυση συνίσταται σε επίλυση (κατά χρονικά βήματα), των εξισώσεων κίνησης (πολλών βαθμών ελευθερίας), οι οποίες εκφράζουν την συμπεριφορά των πολυωρόφων κατασκευών. Ο βαθμός εκλέπτυνσης της αναλυτικής τεχνικής μπορεί να δημιουργήσει στον μη έμπειρο Μελετητή μία ψευδή αίσθηση εμπιστοσύνης για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Πρέπει να κατανοηθεί ότι οι παραδοχές σχετικά με τα χαρακτηριστικά του σεισμού και τις ιδιότητες του φορέα εγκλείουν σημαντική αβεβαιότητα ως προς την προβλεπόμενη απόκριση.

Η δυναμική ανελαστική ανάλυση παραμένει κύριο εργαλείο έρευνας για την διερεύνηση της γενικής μάλλον παρά της τοπικής συμπεριφοράς ενός δομήματος και μπορεί να χρησιμεύει ως μέτρο σύγκρισης για λιγότερο ακριβείς αναλυτικές μεθόδους, καθώς και για την αποτίμηση υφισταμένων κατασκευών.

2.2 Ανελαστική Δυναμική Ανάλυση (ανάλυση χρονοϊστορίας)

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*), 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. [2] [4]

2.3 Ελαστική δυναμική ανάλυση (φασματική ή χρονοϊστορίας)

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 ΕΑΚ 2000 §3.1.2[2]). Ειδικά στην περίπτωση του EC8, η συμπληρωματική χρήση ανάλυσης με επιταχυνσιογραφήματα αφορά τη θεώρηση μη-γραμμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. 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.

2.3.1 Μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης φορέα με χρονοϊστορία φόρτισης

Η δυναμική ανάλυση ενός φορέα με χρονοϊστορία τιμών ενός μεγέθους (εδώ της επιτάχυνσης), 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.

- 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.

2.4 Ελαστική (ισοδύναμη) στατική ανάλυση

Για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης μιας κατασκευής απαιτείται η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων ισορροπίας η οποία μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο της επαλληλίας των ιδιομορφών (mode superposition method), είτε με την άμεση χρονική ολοκλήρωση των δυναμικών εξισώσεων ισορροπίας (direct integration method). Με δεδομένη την εξωτερική φόρτιση ενός συγκεκριμένου σεισμού υπολογίζονται τα εντατικά και μετατοπισιακά/παραμορφωσιακά μεγέθη της κατασκευής σε κάθε χρονική στιγμή του σεισμικού συμβάντος. Όταν όμως καλούμαστε να κάνουμε σχεδιασμό, δηλαδή να επιλέξουμε τις διατομές του φορέα ώστε να αντέχει στα φορτία που αναμένεται να παραλάβει, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη όλους τους πιθανούς σεισμούς οι οποίοι ενδέχεται να πλήξουν την κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής της. Με δεδομένη την αδυναμία πρόβλεψης με την απαιτούμενη ακρίβεια των χαρακτηριστικών μελλοντικών σεισμών το όλο πρόβλημα αντιμετωπίζεται με πιθανοτικές θεωρήσεις οι οποίες βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα των μηχανικών ως εργαλείο σχεδιασμού για συνήθεις κατασκευές. Προς την κατεύθυνση της πλήρους πιθανοτικής θεώρησης χωρίς ουσιώδεις παραδοχές έχει παρουσιαστεί πρόσφατα μία μέθοδος βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών σε σεισμικά φορτία όπου λαμβάνεται υπόψη τόσο ο τυχηματικός χαρακτήρας της σεισμικής διέγερσης όσο και η μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής σε οριακές καταστάσεις φορτίσεως¹. Η μέθοδος αυτή έχει υψηλή αξιοπιστία διότι ελαχιστοποιεί τις όποιες παραδοχές ως προς το είδος της σεισμικής φόρτισης και την απόκριση της κατασκευής εξακολουθεί όμως να είναι υπολογιστικά χρονοβόρα και να απαιτεί τη χρήση προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων επιλύσεως των χαρακτηριστικών εξισώσεων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Με δεδομένες τις παραπάνω αδυναμίες, οι αντισεισμικοί κανονισμοί, μεταξύ των οποίων και ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000), έχουν θεσπίσει απλοποιητικές μεθόδους για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών, οι οποίες δεν απαιτούν πλήρη δυναμική ανάλυση της κατασκευής και δεν λαμβάνουν υπόψη ευθέως την επιρροή των μη γραμμικοτήτων της γεωμετρίας και του υλικού. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές, που ισχύουν κατά κανόνα σε συμβατικές κατασκευές κανονικού τύπου χωρίς σημαντικές ιδιαιτερότητες των δυναμικών τους χαρακτηριστικών, και οι οποίες καταλήγουν σε μία «ισοδύναμη» στατική ελαστική ανάλυση αντί της πλήρους δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης. Η ισοδύναμη στατική ελαστική ανάλυση βασίζεται στην παρακάτω παραδοχή: Η κατασκευή θεωρείται ως ένα ιδεατό ελαστικό σύστημα του οποίου η μέγιστη απόκριση υπολογίζεται από το ελαστικό φάσμα απόκρισης (φάσμα σχεδιασμού με $q=1$). Η σεισμική φόρτιση σχεδιασμού της κατασκευής P_d λαμβάνεται ίση προς $P \cdot P / q \cdot d \cdot e =$, όπου P_e είναι η μέγιστη σεισμική φόρτιση που θα παραλάβει η κατασκευή και q είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς. Θεωρείται δηλαδή ότι η κατασκευή μπορεί να σχεδιαστεί με μικρότερη φόρτιση, από εκείνη που αναμένεται να παραλάβει, λόγω της δυνατότητάς της να παραμορφωθεί αρκετά πέραν της ελαστικής περιοχής χωρίς να καταρρεύσει. Ο συντελεστής συμπεριφοράς q εκφράζει την ικανότητα της κατασκευής να απορροφά ενέργεια με πλαστική συμπεριφορά χωρίς να μειώνεται δραστικά η αντοχή της. Στους αντισεισμικούς κανονισμούς ο δείκτης συμπεριφοράς ορίζεται με ενιαία τιμή για ολόκληρο το κτήριο και καθορίζεται εμπειρικά με βάση τις βλάβες

που έχουν παρατηρηθεί σε κτήρια έπειτα από καταστρεπτικούς σεισμούς. Η τιμή του q εξαρτάται από τον τρόπο ανάπτυξης των μεταλαστικών περιοχών, τον βαθμό υπερστατικότητας, την υστερητική και ιξώδη απόσβεση, καθώς και από άλλα χαρακτηριστικά της κατασκευής. [1]
[8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ N2 EC8

3.1 Περιγραφή των βασικών διατάξεων του EC8 σχετικά με την εφαρμογή της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης Pushover

Η μη-γραμμική στατική ανάλυση εκτελείται υπό την δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων. Επισημαίνεται ότι στον EC8 έχει προταθεί και υιοθετηθεί η χρήση της μεθόδου N2 (Fajfar, 1996). Πιο συγκεκριμένα, συνιστάται η επιλογή τουλάχιστον δύο καθ' ύψος κατανομών των οριζόντιων φορτίων, "ομοιόμορφη" κατανομή, βασισμένη σε οριζόντια φορτία που είναι ανάλογα προς τη μάζα ανεξάρτητα από τη στάθμη και "ιδιομορφική" κατανομή, ανάλογη προς οριζόντια φορτία συμβατά προς την κατανομή οριζόντιων φορτίων στην υπό εξέταση διεύθυνση, όπως προκύπτει από ελαστική ανάλυση.

Ακολουθεί η προοδευτική εισαγωγή των οριζόντιων φορτίων και σχεδίαση της καμπύλης τέμνουσα βάσης - μετακίνησης κέντρου μάζας κορυφής (Pushover). Ο προσδιορισμός της απαίτησης που θέτει ο σεισμός σχεδιασμού εκφράζεται μέσω του υπολογισμού της μετακίνησης στόχου του κόμβου ελέγχου. Για τον υπολογισμό της μετακίνησης στόχου με βάση τον EC8 ακολουθείται η αναλυτική μεθοδολογία η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β του κανονισμού. Ένα από τα κρισιμότερα στάδια εφαρμογής της ανάλυσης Pushover αποτελεί η επαλληλία των φορτίων που ασκούνται κατά τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις του σεισμού. Ο EC8 στην παρ. 4.3.3.5.1 συστήνει την εφαρμογή κατάλληλων κανόνων συνδυασμού των μεγεθών που προκύπτουν από την εφαρμογή των σεισμικών φορτίων σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

Ο EC8 στην παρ. 4.3.3.4.2.7 αναφέρεται στη διαδικασία για την εκτίμηση των στρεπτικών επιδράσεων σε στρεπτικώς ευαίσθητους φορείς. Συγκεκριμένα, προτείνει τη χρήση ενός συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος πρέπει να εφαρμοστεί στις μετακινήσεις της δύσκαμπτης/ισχυρής πλευράς του κτιρίου. Αυτή η αύξηση των μετακινήσεων της δύσκαμπτης πλευράς κρίνεται απαραίτητη για τους στρεπτικώς ευαίσθητους φορείς, καθώς στην περίπτωση αυτών των κτιρίων η μη γραμμική στατική ανάλυση που εκτελείται με τις κατανομές φορτίου που δίνονται στον EC8 μπορεί να υποτιμήσει σημαντικά τις παραμορφώσεις στη δύσκαμπτη/ισχυρή πλευρά του φορέα. Μπορεί κάποιος εύκολα να διαπιστώσει ότι στο συγκεκριμένο κομμάτι ο EC8 είναι ιδιαίτερα ασαφής και δεν προτείνει μια συγκεκριμένη μεθοδολογία για το πώς θα μπορούσε να υπολογιστεί αυτός ο συντελεστής ενίσχυσης. Επίσης, δεν γίνεται κάποια αναφορά στην συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης και στο πώς θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη αυτή η συμμετοχή. Μια από τις μεθόδους που έχουν προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία για την εκτίμηση της συνεισφοράς των στρεπτικών επιδράσεων και των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης σε στρεπτικώς ευαίσθητους φορείς είναι η Extended N2 μέθοδος (Fajfar and Kreslin, 2012), η οποία ουσιαστικά πρόκειται για μια επέκταση της ήδη εφαρμοζόμενης σύμφωνα με τον EC8 N2 μεθόδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε στο κτίριο K2. Η μέθοδος βασίζεται στη θεώρηση ότι η ανελαστική συμπεριφορά περιορίζεται μόνο στην απόκριση της θεμελιώδους ιδιομορφής στην εξεταζόμενη διεύθυνση. Επομένως, η συμμετοχή της θεμελιώδους ιδιομορφής υπολογίζεται από μία τυπική ανάλυση Pushover, ενώ η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών και της στροφής λαμβάνεται υπόψη από ελαστική ιδιομορφική ανάλυση. [2] [3] [7]

3.2 Μετατροπή του πολυβάθμιου συστήματος σε ισοδύναμο μονοβάθμιο.

Για να γίνει δυνατή η σύγκριση της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής με τη σεισμική απαίτηση που ορίζεται από το φάσμα σχεδιασμού είναι αναγκαία αρχικά η μετατροπή της απόκρισης του πολυβάθμιου συστήματος στην αντίστοιχη του ισοδύναμου μονοβάθμιου. Η

κατανομή των φορτίων στο επίπεδο του κέντρου βάρους των ορόφων γίνεται με βάση την κατανομή των αδρανειακών του χαρακτηριστικών σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_i = V \frac{m_i \varphi_i}{\sum_{j=1}^N} \quad (3.1)$$

όπου i, j οι στάθμες της κατασκευής, V είναι η τέμνουσα βάση, φ_i οι ιδιομορφικές μετατοπίσεις του διαφράγματος i και m_i οι αντίστοιχες μάζες. Οι συντελεστές φ_i υποδεικνύουν την κατανομή των μετακινήσεων στους ορόφους.

Οι τιμές των ιδιομορφικών μετατοπίσεων κανονικοποιούνται ως προς την μετακίνηση οροφής ώστε η τιμή του φ στην οροφή να γίνεται ίση με τη μονάδα.

Με χρήση της εξίσωσης (3.2) η μετατροπή του μονοβάθμιου ισοδύναμου συστήματος σε πολυβάθμιο σύστημα γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \Gamma Q^* \quad (3.2)$$

Όπου

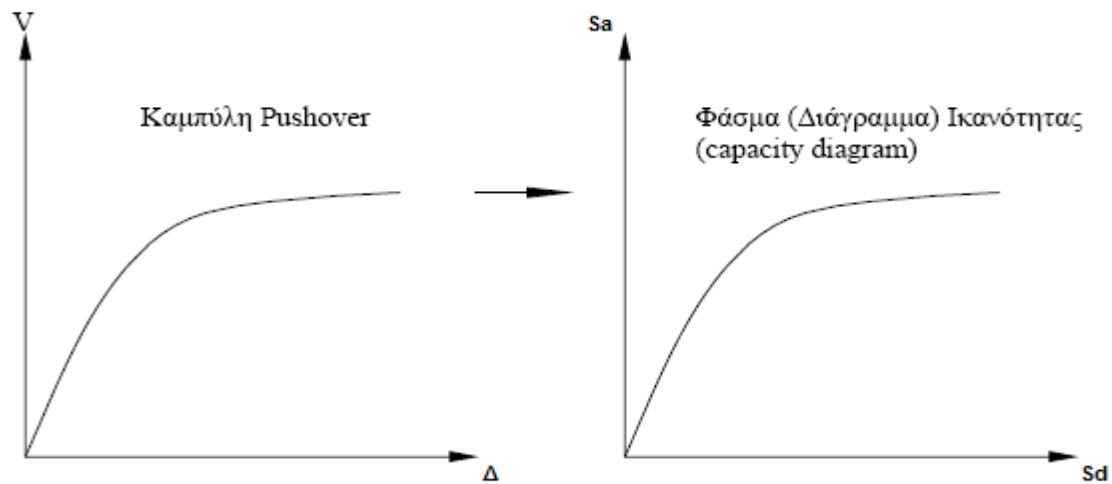
Q^* οποιοδήποτε μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα

Q το αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα

Γ ο συντελεστής συμμετοχής που δίνεται από την ακόλουθη σχέση [EC8-1 (B.3)]:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} \quad (3.3)$$

Ο αριθμητής στη σχέση (3.4) ισούται με τη μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος m^* . Εφόσον οι δυνάμεις και οι μετακινήσεις ακολουθούν τον ίδιο μετασχηματισμό που δίνεται από τη σχέση (3.5), η δυσκαμψία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος θα ισούται με τη δυσκαμψία του αντίστοιχου πολυβάθμιου. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο με τις ιδιοπεριόδους των δύο συστημάτων. Για να είναι δυνατή η αντιπαραβολή της ικανότητας της κατασκευής με τη σεισμική απαίτηση ώστε να είναι εφικτός ο σχεδιασμός τους στο ίδιο διάγραμμα, η καμπύλη Pushover του μονοβάθμιου μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας (ADRS). Η μετατροπή γίνεται με βάση τις παρακάτω σχέσεις. [1] [7] [9]



Εικόνα 3.1: Μετατροπή της καμπύλης αντίστασης του πολυβάθμιου συστήματος σε φάσμα ικανότητας του μονοβάθμιου ισοδύναμου συστήματος.

(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

$$S_a = \frac{V}{a \cdot m_{tot}} \quad (3.4)$$

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}} \quad (3.5)$$

V τέμνουσα βάσης του πολυβάθμιου συστήματος.

m_{tot} συνολική μάζα πολυβάθμιου συστήματος.

φ_{top} η κανονικοποιημένη ιδιομορφική μετακίνηση κορυφής. Συνήθως ισούται με τη μονάδα.

a ποσοστό συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη ιδιομορφή της παραμόρφωσης, που δίνεται από την ακόλουθη σχέση, όπου φαίνεται πως ο όρος του αθροίσματος στον αριθμητή αντιπροσωπεύει τη μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

$$\alpha = \frac{\Gamma \sum m_i \varphi_i}{m_{tot}} = \Gamma \frac{m^*}{m_{tot}} \quad (3.6)$$

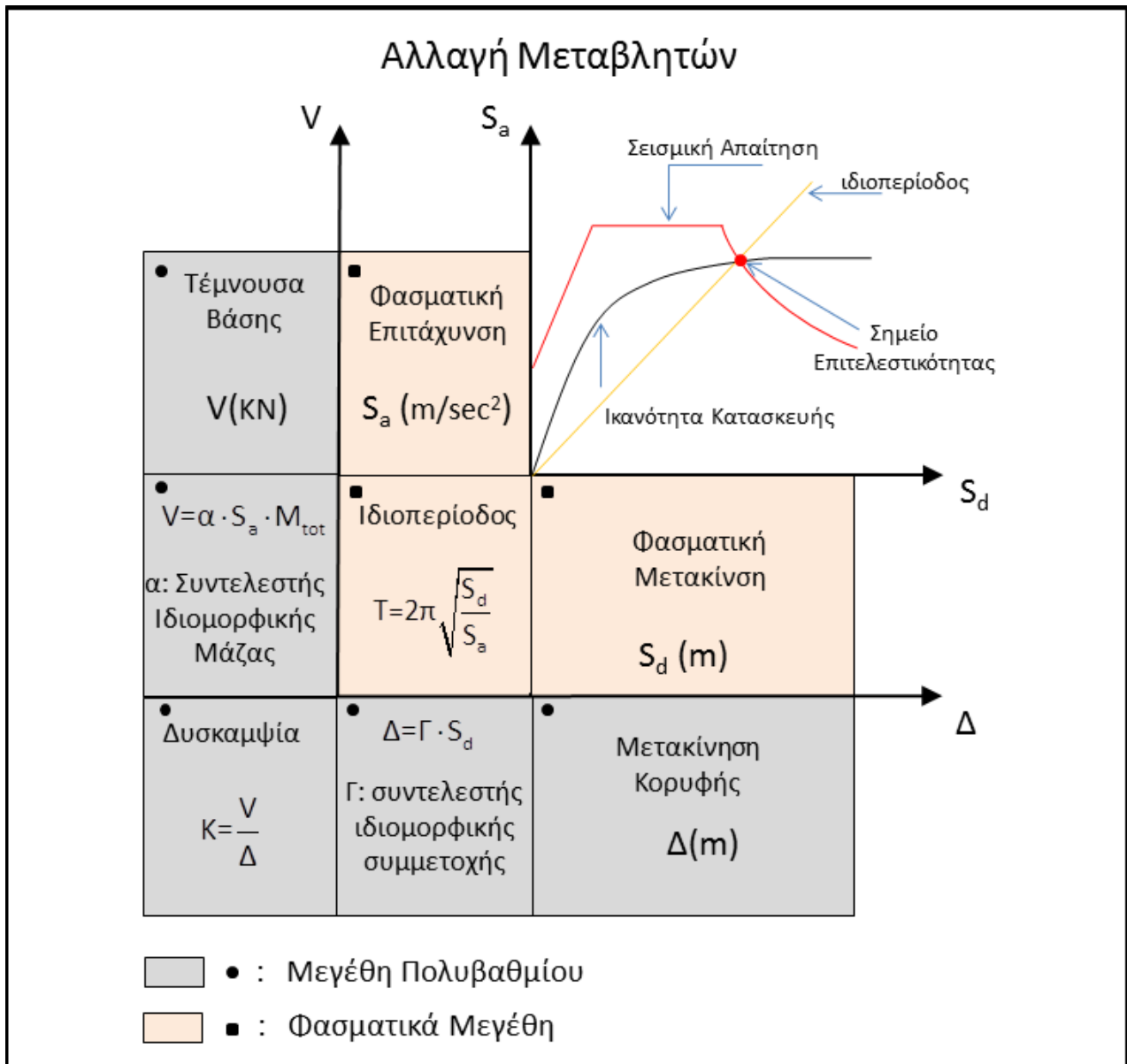
Δ μετακίνηση οροφής πολυβάθμιου συστήματος.

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να μετατραπούν σε όρους δύναμης-μετακίνησης του αντίστοιχου μονοβαθμίου όπως αναγράφονται στο Παράρτημα Β του EC8-1, ως εξής:

$$F = \frac{V}{\Gamma} = S_a \cdot m^* \quad (3.7)$$

$$d^* = \frac{\Delta}{\Gamma} = S_d \quad (3.8)$$

Στο παρακάτω σχήμα συνοψίζεται η διαδικασία μετατροπής της καμπύλης ικανότητας του κτιρίου σε φάσμα ικανότητας.



Εικόνα 3.2: Μετατροπή μεγεθών από το πολυβάθμιο σύστημα για τη δημιουργία του διαγράμματος ADRS.

(Πηγή: www.episkeves2.civil.upatras.gr)

3.3 Ευρωκώδικας 8 – Οριζόντιο ελαστικό φάσμα απόκρισης (§3.2.2.2)

Περιοχή ιδιοπεριόδων

Εξίσωση

$$0 \leq T \leq T_B \quad Se(T) = a_g \cdot S \cdot [1 + T/T_B \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1)] \quad (3.9)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad Se(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad (3.10)$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad Se(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot [T_C/T] \geq \beta \cdot a_g \quad (3.11)$$

$$T_D \leq T \leq 4s \quad Se(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot [T_C \cdot T_D / T^2] \geq \beta \cdot a_g \quad (3.12)$$

Se(T): ελαστικό φάσμα απόκρισης

T: θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής

a_g : εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A

$$a_g = \gamma_I a_{gR}$$

γ_I : συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου

a_{gR} : μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στον βράχο

T_B, T_C, T_D : χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος

S: συντελεστής εδάφους

η : διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης

$$\eta = \sqrt{105 + \zeta}$$

Κατηγορία Σπουδαιότητας	γ_i
I	0.80
II	1.00
III	1.20
IV	1.40

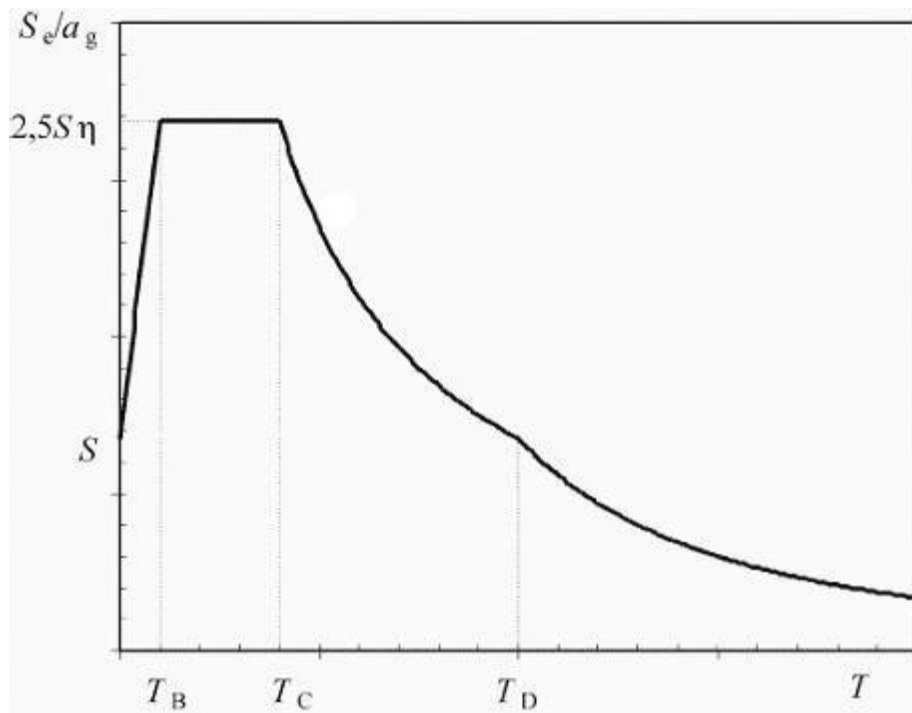
ΖΩΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	a_{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 3.1: Ζώνες επικινδυνότητας
(Πηγή: EC8)

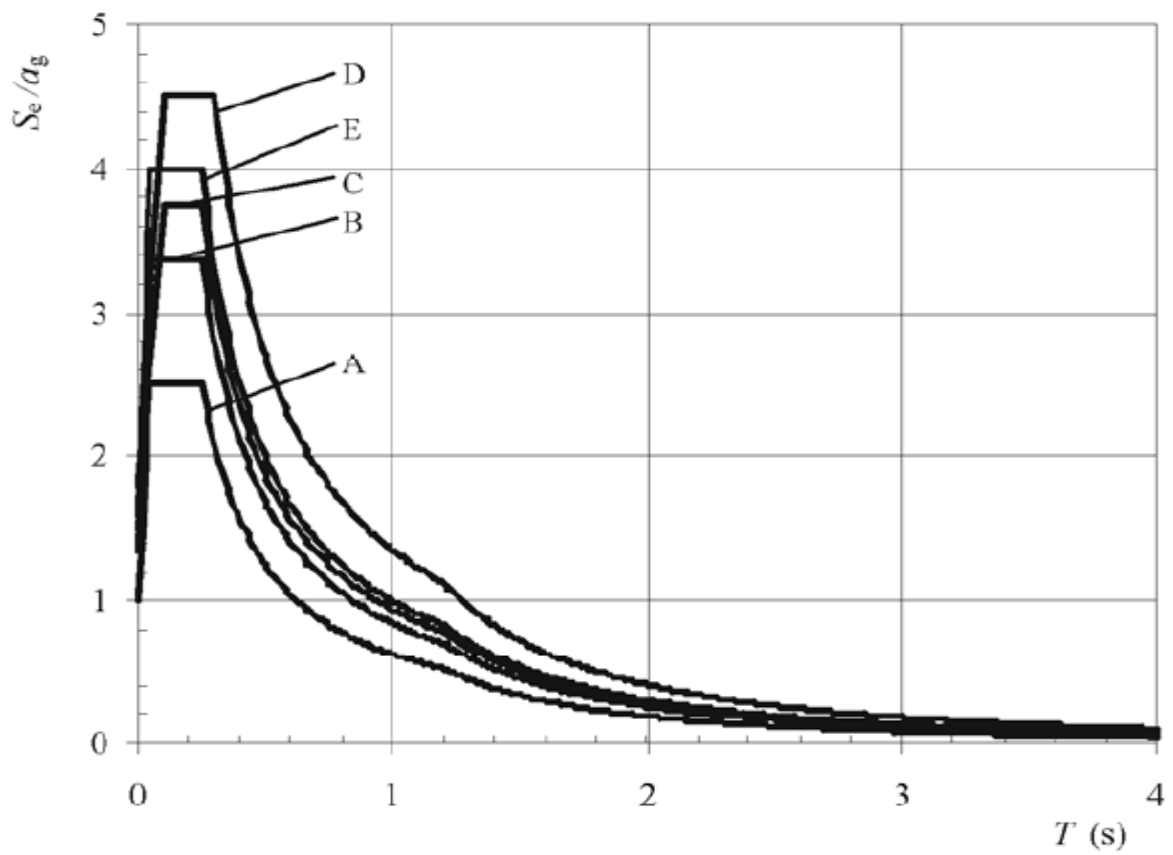
Πίνακας 3.2: Κατηγορία σπουδαιότητας
(Πηγή: EC8)

Κατηγορία Εδάφους	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)	S
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40

Πίνακας 3.3: Κατηγορία εδάφους
(Πηγή: EC8)



Σχήμα 3.1: Ελαστικό φάσμα απόκρισης σε οριζόντια διεύθυνση
(Πηγή: EN1998-1)



Σχήμα 3.2: Ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 2 για εδάφη A-E (με απόσβεση 5%)
(Πηγή: EN1998-1)

3.4 Ευρωκώδικας 8 – Φάσμα σχεδιασμού (§3.2.2.5)

Περιοχή ιδιοπεριόδων

Εξίσωση

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot [2/3 + T/T_B \cdot (2.5/q - 2/3)] \quad (3.13)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5/q \quad (3.14)$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5/q \cdot [T_C/T] \geq \beta \cdot a_g \quad (3.15)$$

$$T_D \leq T \leq 4s \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5/q \cdot [T_C \cdot T_D / T^2] \geq \beta \cdot a_g \quad (3.16)$$

$S_d(T)$: φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού

T : θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής

a_g : μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

$$a_g = \gamma I a_{gR}$$

γI : συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου

a_{gR} : μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στον βράχο

q : συντελεστής συμπεριφοράς

S : συντελεστής εδάφους

T_B, T_C, T_D : χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος

$$\beta = 0.2$$

Κατηγορία Σπουδαιότητας	γ_i
I	0.80
II	1.00
III	1.20
IV	1.40

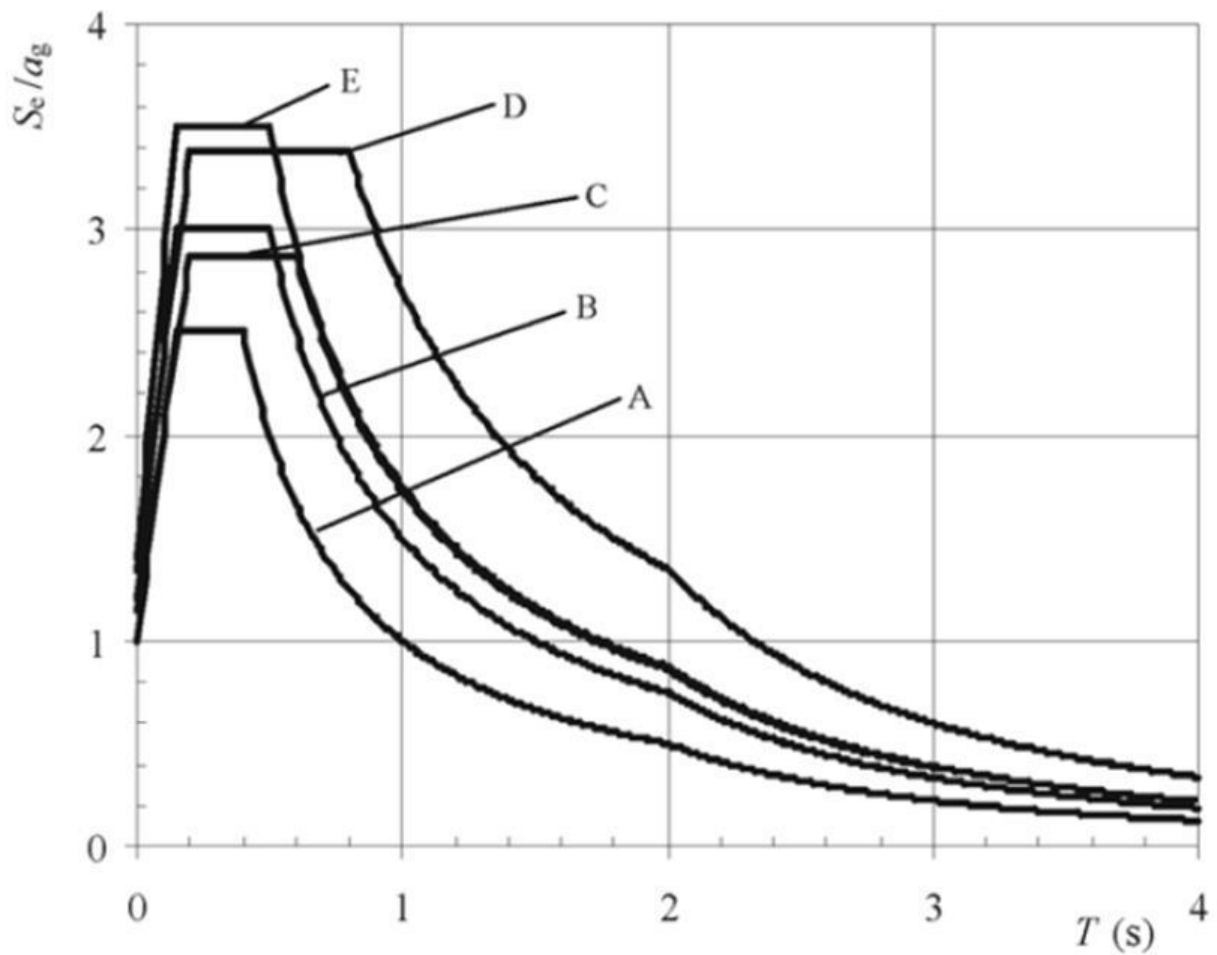
Πίνακας 3.5: Κατηγορία σπουδαιότητας
(Πηγή: EC8)

ΖΩΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	a_{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 3.4: Ζώνες επικινδυνότητας
(Πηγή: EC8)

Κατηγορία Εδάφους	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)	S
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40

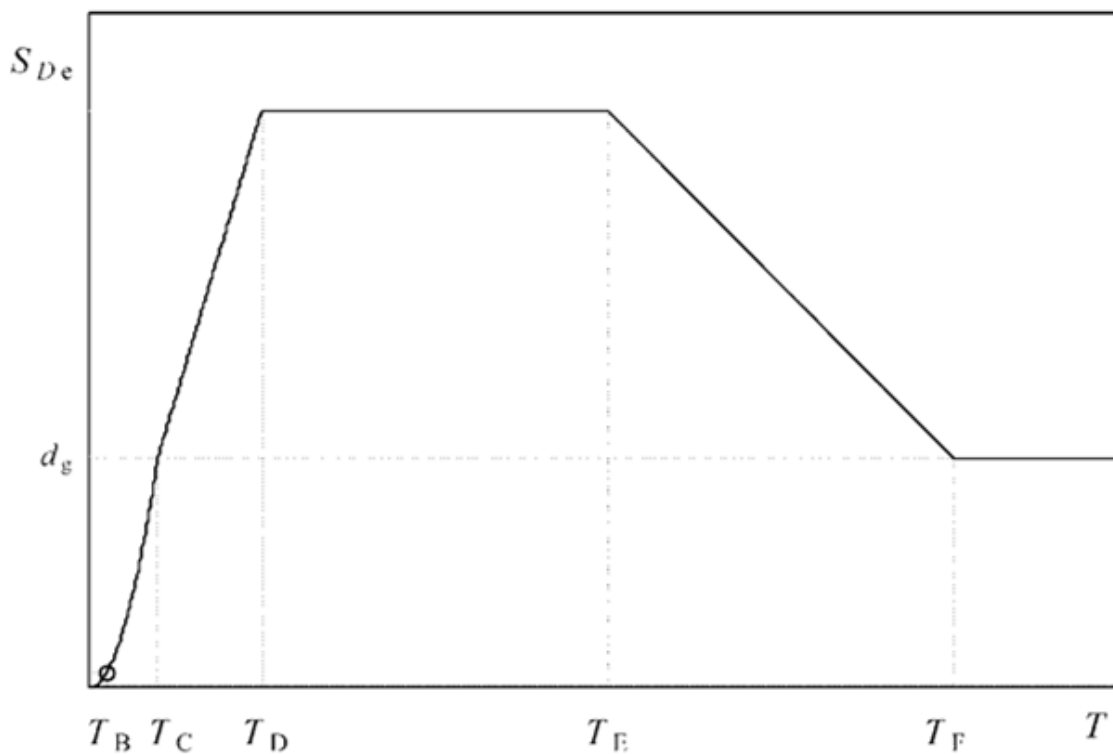
Πίνακας 3.6: Κατηγορία εδάφους
(Πηγή: EC8)



Σχήμα 3.3: Ελαστικό φάσμα απόκρισης Τύπου 1 για εδάφη A-E (με 5% απόσβεση)
(Πηγή: EN1998-1)

3.5 Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακίνησης

Για φορείς με μεγάλη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης, η σεισμική δράση μπορεί να προσομοιωθεί σε μορφή φάσματος απόκρισης μετακίνησης, $S_{De}(T)$. [7]



Σχήμα 3.4: Ελαστικό φάσμα απόκρισης μετακίνησης
(Πηγή: EN1998-1)

Μέχρι την οριακή περίοδο T_E , οι τεταγμένες του φάσματος λαμβάνονται μετατρέποντας το $S_e(T)$ σε $S_{De}(T)$, για ιδιοπερίόδους ταλάντωσης πέραν της T_E , οι τεταγμένες του ελαστικού φάσματος απόκρισης μετακίνησης λαμβάνονται από τις σχέσεις:

$$T_E \leq T \leq T_F : S_{De}(T) = 0,025a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \left[2,5\eta + \left(\frac{T - T_E}{T_F - T_E} \right) (1 - 2,5\eta) \right] \quad (3.17)$$

$$T \geq T_F : S_{De}(T) = d_g \quad (3.18)$$

όπου d_g : εδαφική μετακίνηση σχεδιασμού

Εδαφικός τύπος	T_E (s)	T_F (s)
A	4.5	10.0
B	5.0	10.0
C	6.0	10.0
D	6.0	10.0
ΠΕ	6.0	10.0

Πίνακας 3.7: Εδαφικός τύπος
(Πηγή: EN1998-1)

3.6 Εδαφική μετακίνηση σχεδιασμού

Η εδαφική μετακίνηση σχεδιασμού d_g , που αντιστοιχεί στην εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού, μπορεί να υπολογιστεί με την σχέση:

$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (3.19)$$

Για περιόδους μεγαλύτερες από 4,0 s, το φάσμα ελαστικής απόκρισης επιτάχυνσης μπορεί να ληφθεί από το φάσμα απόκρισης ελαστικής μετακίνησης με την σχέση:

$$S_\epsilon(T) = S_{De}(T) \cdot \omega^2 = S_{De}(T) \left[\frac{2\pi}{T} \right]^2 \quad (3.20)$$

3.7 Εναλλακτικές αναπαραστάσεις της σεισμικής δράσης

Προσομοίωση χρονοϊστορίας

- Η σεισμική κίνηση μπορεί να προσομοιωθεί σε όρους χρονοϊστοριών εδαφικής επιτάχυνσης και αντίστοιχων μεγεθών (ταχύτητα και μετακίνηση).
- Χωρικό προσομοίωμα του φορέα, η σεισμική κίνηση θα αποτελείται από τρία επιταχυνσιογραφήματα που δρουν ταυτόχρονα. Το ίδιο επιταχυνσιογράφημα δεν μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.
- Ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής και τα διαθέσιμα στοιχεία, η περιγραφή της σεισμικής κίνησης μπορεί να γίνει με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα καθώς και καταγραφές ή προσομοιώσεις επιταχυνσιογραφημάτων.[7]

3.7.1 Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα

Η ομάδα των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει :

- Πρέπει κατ' ελάχιστον να χρησιμοποιούνται τρία επιταχυνσιογραφήματα.
- Η μέση τιμή της επιτάχυνσης φασματικής απόκρισης μηδενικής περιόδου (που υπολογίζεται από τις μεμονωμένες χρονοϊστορίες) δεν θα είναι μικρότερη από την τιμή $g \cdot S$ για την θέση που εξετάζεται.
- Στην περιοχή περιόδων μεταξύ $0.2T_1$ και $2T_1$, όπου T_1 : η θεμελιώδης περίοδος του φορέα στην διεύθυνση όπου θα εφαρμοστεί το επιταχυνσιογράφημα, $SA(\zeta=5\%)$ μέσου φάσματος $\geq 90\% SA(\zeta=5\%)$ ελαστικού φάσματος απόκρισης. [7]

3.7.2 Καταγραφές ή προσομοιώσεις επιταχυνσιογραφημάτων

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταγραφές επιταχυνσιογραφημάτων ή επιταχυνσιογραφήματα που παράγονται από φυσική προσομοίωση των μηχανισμών πηγής και διάδοσης, εφόσον τα δείγματα που χρησιμοποιούνται είναι κατάλληλα

επιλεγμένα όσον αφορά τα σειсмоγεννητικά χαρακτηριστικά των πηγών και τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής του έργου και οι τιμές τους έχουν υποστεί κλιμακώσεις για προσαρμογή στην τιμή του ag.S για την ζώνη που εξετάζεται.

- Για αναλύσεις εδαφικής ενίσχυσης και για ελέγχους ευστάθειας πρανών βλέπε EN 1998-5:2004, 2.2.
- Η ομάδα των καταγραφών ή προσομοιώσεων επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να ικανοποιεί τους κανόνες για τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα.[7]

3.8 Συνδυασμοί δράσεων

Ανάλογα με την περίπτωση θα ελέγχονται οι ακόλουθες οριακές καταστάσεις αστοχίας:

- EQU: Απώλεια στατικής ισορροπίας του, θεωρούμενου ως άκαμπτου σώματος, φορέα ή οποιουδήποτε μέρους του.
- STR: Εσωτερική αστοχία ή υπερβάλλουσα παραμόρφωση του φορέα ή δομικών μελών, όπως πεδύλων θεμελίωσης, πασσάλων, τοιχωμάτων υπογείων κλπ., όπου η αντοχή των δομικών υλικών είναι καθοριστική.
- GEO: Αστοχία ή υπερβάλλουσα παραμόρφωση του εδάφους.
- FAT: Αστοχία λόγω κόπωσης του φορέα ή των δομικών μελών.

3.8.1 Οριακές καταστάσεις αστοχίας

- Θεμελιώδης συνδυασμός

$$E_d = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.21)$$

- εναλλακτικά για οριακές καταστάσεις STR και GEO, με την λιγότερο ευμενή από τις σχέσεις:

$$E_d = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.22)$$

$$E_d = \sum \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.23)$$

- Σεισμικός συνδυασμός

$$E_d = \sum G_{k,j} + P + A_{ED} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.24)$$

3.8.2 Μάζες

- Οι συντελεστές συνδυασμού $\Psi_{E,i}$ λαμβάνουν υπόψη
 - την πιθανότητα τα φορτία $q_{k,i}$ να μην είναι παρόντα σε ολόκληρο τον φορέα κατά τη διάρκεια του σεισμού.
 - την μειωμένη συμμετοχή των μαζών στην κίνηση του φορέα λόγω μη-στερεάς σύνδεσής τους.
- Ο μειωτικός συντελεστής ϕ λαμβάνεται υπόψη μόνο στον υπολογισμό των μαζών των μεταβλητών φορτίων που συμμετέχουν στη σεισμική δύναμη.
- Στο σεισμικό συνδυασμό, τα εντατικά μεγέθη από τα μη σεισμικά φορτία των μεταβλητών δράσεων υπολογίζονται σύμφωνα με το EN 1990 για ολόκληρο το συντελεστή ψ_{2i} χωρίς το μειωτικό συντελεστή ϕ .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

4.1 Βασικές αρχές

Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό. [12]

4.1.1 Κατάταξη

- (1) Τέσσερις κατηγορίες διατομών καθορίζονται ως εξής:
 - Διατομές κατηγορίας 1 είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στροφής χωρίς μείωση της αντοχής τους.
 - Διατομές κατηγορίας 2 είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στροφής λόγω τοπικού λυγισμού.
 - Διατομές κατηγορίας 3 είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους, υποθέτοντας ελαστική κατανομή των τάσεων, μπορεί να φθάσει την αντοχή διαρροής, αλλά τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
 - Διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής.
- (2) Σε διατομές κατηγορίας 4, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μειώσεις στην αντοχή λόγω των επιδράσεων του τοπικού λυγισμού, χρησιμοποιούνται τα ενεργά πλάτη, βλέπε EN 1993-1-5, 5.2.2.
- (3) Η κατάταξη μιας διατομής εξαρτάται από τη σχέση πλάτους προς πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη.
- (4) Τα θλιβόμενα τμήματα περιλαμβάνουν κάθε τμήμα μιας διατομής το οποίο θλίβεται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει για τον υπό θεώρηση συνδυασμό φορτίων.
- (5) Τα διάφορα θλιβόμενα τμήματα σε μια διατομή (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν, γενικά, να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες.
- (6) Μια διατομή κατατάσσεται σύμφωνα με την υψηλότερη κατηγορία (λιγότερο ευμενή) των θλιβόμενων τμημάτων της.

- (7) Εναλλακτικά, η κατάταξη μιας διατομής μπορεί να ορισθεί λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κατηγορία των πελμάτων όσο και την κατηγορία του κορμού.
- (8) Τα όρια για τα θλιβόμενα τμήματα κατηγορίας 1, 2, και 3 θα πρέπει να λαμβάνονται από Πίνακα . Ένα τμήμα της διατομής που δεν ικανοποιεί τα όρια της κατηγορίας 3 πρέπει να κατατάσσεται στην κατηγορία 4.
- (9) Εκτός από την περίπτωση (10) οι διατομές κατηγορίας 4 μπορούν να αντιμετωπίζονται ως διατομές κατηγορίας 3 εάν ο λόγος πλάτους προς πάχος είναι μικρότερος από το όριο για διατομές κατηγορίας 3 όταν το ε πολλαπλασιάζεται με $\sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}}$, όπου $\sigma_{com,Ed}$ είναι η μέγιστη θλιπτική τάση σχεδιασμού του τμήματος η οποία έχει ληφθεί από ανάλυση πρώτης τάξης ή, όπου είναι απαραίτητο, από ανάλυση δεύτερης τάξης.
- (10) Εντούτοις, όταν ελέγχεται η αντοχή σε λυγισμό ενός μέλους, τα όρια για κατηγορία 3 θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται από τον Πίνακα.
- (11) Διατομές με κορμό κατηγορίας 3 και πέλματα κατηγορίας 1 ή 2 μπορεί να ταξινομούνται ως διατομές κατηγορίας 2 με ενεργό κορμό.
- (12) Όπου ο κορμός θεωρείται ότι αναλαμβάνει μόνο διατμητικές δυνάμεις και υποτίθεται ότι δεν συνεισφέρει στην αντοχή της διατομής σε κάμψη και ορθή δύναμη, η διατομή μπορεί να σχεδιάζεται ως κατηγορίας 2, 3 ή 4 ανάλογα με την κατηγορία των πελμάτων μόνον.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για λυγισμό κορμού εξαιτίας δυνάμεων που εισάγονται από τα πέλματα βλέπε EN 1993-1-5.

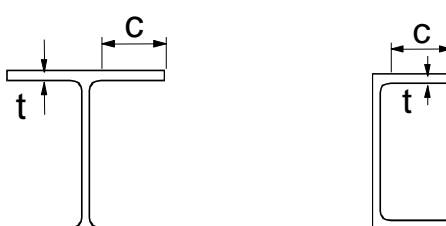
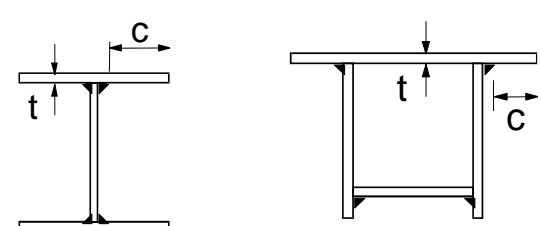
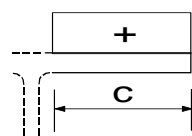
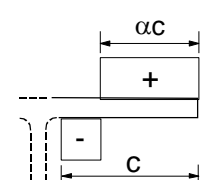
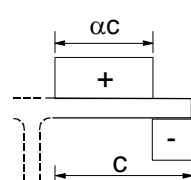
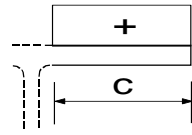
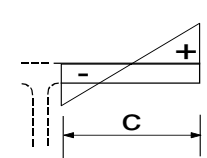
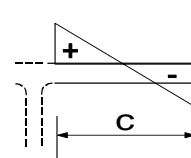
Πίνακας 4.1: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα.
(Πηγή: library.tee.gr/digital/m2464/m2464_ec3)

Εσωτερικά θλιβόμενα τμήματα			
			Άξονας κάμψης
			Άξονας Κάμψης
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	<p>όταν $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$</p> <p>όταν $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$</p>
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	<p>όταν $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$</p> <p>όταν $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$</p>
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	<p>όταν $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$</p> <p>όταν $\psi \leq -1^{*}$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$</p>

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

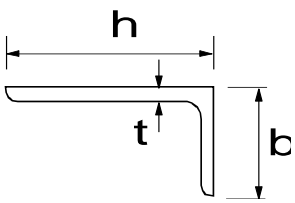
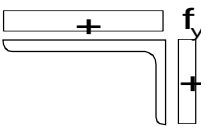
$\psi \leq -1$ εφαρμόζεται όπου η θλιπτική τάση $\sigma < f_y$ είτε η εφελκυστική παραμόρφωση $\varepsilon_y > f_y/E$

Πίνακας 4.2 : Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα
(Πηγή: library.tee.gr/digital/m2464/m2464_ec3)

Προεξέχοντα πέλματα			
			
Ελατές διατομές		Συγκολλητές διατομές	
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη	
		Άκρο σε θλίψη	Άκρο σε εφελκυσμό
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Για k_σ βλέπε EN 1993-1-5	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Πίνακας 4.3: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα
(Πηγή: library.tee.gr/digital/m2464/m2464_ec3)

Γωνιακά						
Αναφορά επίσης στα “Προεξέχοντα πέλματα” (βλέπε πίνακα 4.2)					Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία	
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη					
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
Σωληνωτές διατομές						
Κατηγορία		Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη				
1		$d/t \leq 50\varepsilon^2$				
2		$d/t \leq 70\varepsilon^2$				
3		$d/t \leq 90\varepsilon^2$				
		ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για $d/t > 90\varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460

	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

4.2 Οριακές καταστάσεις αστοχίας

Γενικά

(1) Οι επιμέρους συντελεστές M όπως ορίζονται πρέπει να εφαρμόζονται στις διάφορες χαρακτηριστικές τιμές αντοχής σε αυτό το Κεφάλαιο ως εξής:

- αντοχή διατομών, όποια και αν είναι η κατηγορία: M_0
- αντοχή των μελών σε αστάθεια που προσδιορίζεται από ελέγχους μελών: M_1
- αντοχή διατομών σε εφελκυσμό μέχρι τη θραύση: M_2
- αντοχή των κόμβων βλέπε EN 1993-1-8:

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Οι επιμέρους συντελεστές γ_{Mi} για κτίρια μπορούν να καθορίζονται στο Εθνικό Προσάρτημα. Οι παρακάτω αριθμητικές τιμές συστήνονται για κτίρια:

- $\gamma_{M0} = 1,00$
- $\gamma_{M1} = 1,00$
- $\gamma_{M2} = 1,25$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για άλλες προτεινόμενες αριθμητικές τιμές βλέπε EN 1993 Μέρος 2 έως Μέρος 6. Για κατασκευές που δεν καλύπτονται από το EN 1993 Μέρος 2 έως Μέρος 6, το Εθνικό Προσάρτημα μπορεί να δίνει πληροφορία. Συνιστάται όπως επιμέρους συντελεστές γ_{Mi} να λαμβάνονται από το EN 1993-2.

4.3 Αντοχή διατομών

Γενικά

- (1) Η τιμή σχεδιασμού για τα αποτελέσματα μιας δράσης σε κάθε διατομή δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντίστοιχη αντοχή σχεδιασμού, και εάν πολλά αποτελέσματα δράσεων ασκούνται ταυτόχρονα, το συνδυασμένο αποτέλεσμα δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή για το συγκεκριμένο συνδυασμό. [8] [12]
- (2) Επιδράσεις λόγω διατμητικής υστέρησης και επιδράσεις λόγω τοπικού λυγισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με ένα ενεργό πλάτος σύμφωνα με το EN 1993-1-5. Οι επιδράσεις διατμητικού λυγισμού πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη σύμφωνα με το EN 1993-1-5.
- (3) Οι τιμές σχεδιασμού για την αντοχή πρέπει να εξαρτώνται από την κατάταξη των διατομών.

- (4) Ελαστικός έλεγχος σύμφωνα με την ελαστική αντοχή μπορεί να εκτελείται για όλες τις κατηγορίες διατομών υπό την προϋπόθεση ότι για τον έλεγχο των διατομών κατηγορίας 4 χρησιμοποιούνται οι ενεργές ιδιότητες των διατομών.
- (5) Για τον ελαστικό έλεγχο μπορεί να χρησιμοποιείται το παρακάτω κριτήριο διαρροής, για ένα κρίσιμο σημείο της διατομής, εκτός εάν εφαρμόζεται άλλος τύπος αλληλεπίδρασης.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1 \quad (4.1)$$

- όπου $\sigma_{x,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής κατά μήκος τάσης στο υπό θεώρηση σημείο
 $\sigma_{z,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής εγκάρσιας τάσης στο υπό θεώρηση σημείο
 τ_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής διατμητικής τάσης στο υπό θεώρηση σημείο

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Ο έλεγχος μπορεί να είναι συντηρητικός καθώς αποκλείει μερική πλαστική κατανομή τάσεων, η οποία επιτρέπεται σε ελαστικό σχεδιασμό. Έτσι πρέπει να εκτελείται μόνο όπου η αλληλεπίδραση με βάση τις αντοχές N_{Rd} , M_{Rd} , V_{Rd} δεν μπορεί να εκτελεσθεί.

- (6) Η πλαστική αντοχή των διατομών θα πρέπει να υπολογίζεται βρίσκοντας μια κατανομή τάσεων που να είναι σε ισορροπία με τα εντατικά μεγέθη χωρίς να υπάρχει υπέρβαση της τάσης διαρροής. Αυτή η κατανομή τάσεων θα πρέπει να είναι συμβατή με τις αντίστοιχες πλαστικές παραμορφώσεις.
- (7) Ως μία συντηρητική προσέγγιση για όλες τις κατηγορίες διατομών, μπορεί να χρησιμοποιείται μία γραμμική άθροιση των βαθμών αξιοποίησης για κάθε συνισταμένη τάση. Για διατομές κατηγορίας 1, 2 ή 3 που υπόκεινται στο συνδυασμό των N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ and $M_{z,Ed}$, αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί χρησιμοποιώντας το παρακάτω κριτήριο:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (4.2)$$

όπου N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ και $M_{z,Rd}$ είναι οι τιμές σχεδιασμού της αντοχής που εξαρτώνται από την κατάταξη των διατομών και περιλαμβάνουν κάθε μείωση που μπορεί να προκαλείται από την επιρροή της διάτμησης.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για διατομές κατηγορίας 4.

- (8) Όπου όλα τα θλιβόμενα τμήματα μιας διατομής είναι κατηγορίας 2, η διατομή μπορεί να λαμβάνεται ως ικανή να αναπτύξει την πλήρη πλαστική αντοχή της σε κάμψη.

- (9) Όπου όλα τα θλιβόμενα τμήματα μιας διατομής είναι κατηγορίας 3, η αντοχή της πρέπει να βασίζεται σε μια ελαστική κατανομή των παραμορφώσεων στη διατομή. Οι θλιπτικές τάσεις πρέπει να περιορίζονται στην τάση διαρροής στις ακραίες ίνες.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Οι ακραίες ίνες μπορούν να θεωρούνται στο μέσο επίπεδο των πελμάτων για ελέγχους στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Για κόπωση βλέπε EN 1993-1-9.

- (10) Όπου συμβαίνει διαρροή πρώτα στην εφελκυσόμενη πλευρά της διατομής, τα πλαστικά αποθέματα της εφελκυσόμενης ζώνης μπορούν να χρησιμοποιούνται στον καθορισμό αντοχής μιας διατομής κατηγορίας 3, λαμβάνοντας υπόψη μερική πλαστικοποίηση.

4.4 Ιδιότητες διατομής

4.4.1 Πλήρης διατομή

- (1) Οι ιδιότητες της πλήρους διατομής πρέπει να καθορίζονται χρησιμοποιώντας τις ονομαστικές διαστάσεις. Οπές για κοχλίες δεν χρειάζεται να αφαιρεθούν, αλλά πρέπει να γίνεται πρόβλεψη για μεγαλύτερα ανοίγματα. Υλικά αποκατάστασης της συνέχειας δεν πρέπει να περιλαμβάνονται. [12]

4.4.2 Καθαρή διατομή

- (1) Η καθαρή επιφάνεια μιας διατομής πρέπει να λαμβάνεται ως η ολική της επιφάνεια μείον τις κατάλληλες μειώσεις για όλες τις οπές και τα άλλα ανοίγματα.
- (2) Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων της καθαρής διατομής, η μείωση για μία οπή κοχλία πρέπει να είναι η ολική επιφάνεια της οπής στο επίπεδο του άξονά της. Για οπές κοχλιών βυθισμένης κεφαλής, πρέπει να γίνεται κατάλληλη πρόβλεψη για το βυθισμένο τμήμα.
- (3) Υπό την προϋπόθεση ότι οι οπές των κοχλιών δεν έχουν διάταξη μορφής ζικ-ζακ, η συνολική επιφάνεια που θα αφαιρεθεί για οπές κοχλιών πρέπει να είναι το μέγιστο άθροισμα των επιφανειών των οπών σε κάθε διατομή κάθετη στον άξονα του μέλους.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Το μέγιστο άθροισμα δείχνει τη θέση της κρίσιμης γραμμής θραύσης.

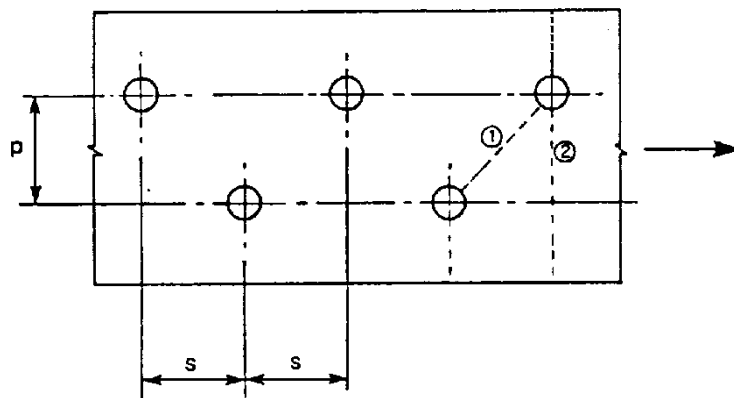
- (4) Όπου οι οπές κοχλιών έχουν διάταξη μορφής ζικ-ζακ, η συνολική επιφάνεια που θα αφαιρεθεί για κοχλίες είναι η μεγαλύτερη από:

a) τη μείωση για όχι ζικ-ζακ οπές.

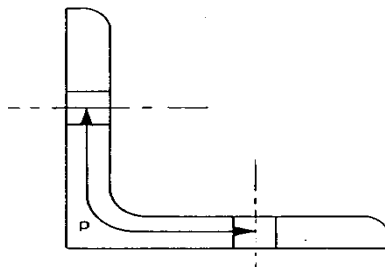
$$b) t \left(nd - \sum \frac{s^2}{4p} \right) \quad (4.4.1)$$

- όπου s είναι στη διάταξη του ζικ-ζακ, η απόσταση των κέντρων δύο διαδοχικών οπών, μετρούμενη παράλληλα με τον άξονα του μέλους (Σχ. 4.1)
- p είναι η απόσταση των κέντρων των δύο ίδιων οπών μετρούμενη κάθετα στον άξονα του μέλους
- t είναι το πάχος
- n είναι ο αριθμός των οπών που τέμνονται από κάθε διαγώνιο ή ζικ-ζακ γραμμή,
- d είναι η διάμετρος της οπής

- (5) Σε ένα γωνιακό ή άλλο μέλος με οπές σε περισσότερα από ένα επίπεδα, η απόσταση p θα πρέπει να μετράται κατά μήκος του μέσου άξονα του υλικού (βλέπε Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.1: Οπές ζικ-ζακ και κρίσιμες γραμμές θραύσης 1 και 2.
(Πηγή: EN 1993-1-3)



Εικόνα 4.2: Γωνιακά με οπές και στα δύο σκέλη.
(Πηγή: EN 1993-1-3)

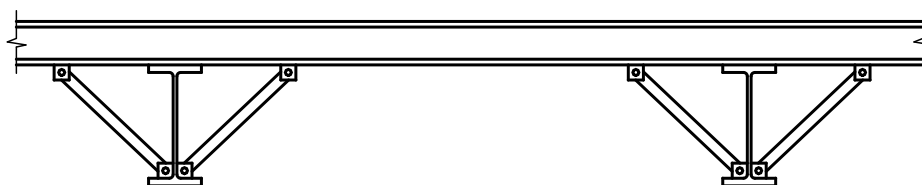
Αποτελέσματα διατμητικής υστέρησης

- (1) Ο υπολογισμός των ενεργών πλατών καλύπτεται στο EN 1993-1-5.
- (2) Σε διατομές κατηγορίας 4 η αλληλεπίδραση μεταξύ διατμητικής υστέρησης και τοπικού λυγισμού πρέπει να γίνεται σύμφωνα με το EN 1993-1-5.

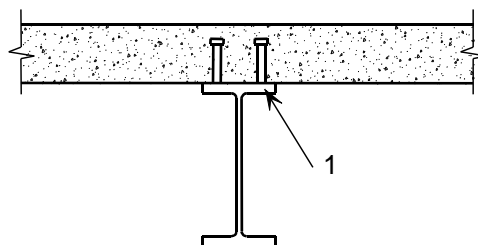
ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης βλέπε EN 1993-1-3.

4.5 Εξασφαλίσεις σε στρεφόμενες πλαστικές αρθρώσεις

- (1) Στη θέση κάθε στρεφόμενης πλαστικής άρθρωσης, η διατομή πρέπει να έχει μία αποτελεσματική πλευρική και στρεπτική στήριξη με κατάλληλη αντοχή έναντι πλευρικών δυνάμεων και στρέψης που προκαλούνται από τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις του μέλους σε αυτή τη θέση.
- (2) Αποτελεσματική εξασφάλιση πρέπει να παρέχεται
 - για μέλη υπό ροπή ή ροπή και αξονική δύναμη, με πλευρική εξασφάλιση και στα δύο πέλματα. Αυτό μπορεί να παρέχεται με πλευρική εξασφάλιση του ενός πέλματος και άκαμπτη στρεπτική αντιστήριξη της διατομής που παρεμποδίζει την πλευρική μετατόπιση του θλιβόμενου πέλματος ως προς το εφελκυζόμενο πέλμα.
 - για μέλη υπό ροπή ή ροπή και αξονικό εφελκυσμό, όπου το θλιβόμενο πέλμα είναι σε επαφή με πλάκα δαπέδου, με πλευρική και στρεπτική εξασφάλιση του θλιβόμενου πέλματος (π.χ. συνδέοντάς το με πλάκα σκυροδέματος, βλέπε Εικόνα 4.3). Για διατομές που είναι λεπτότερες από ελατές διατομές I και H, η παραμόρφωση της διατομής θα πρέπει να παρεμποδίζεται στη θέση της πλαστικής άρθρωσης (π.χ. μέσω μιας ενισχυτικής λάμας κορμού συνδεδεμένης επίσης στο θλιβόμενο πέλμα με μία άκαμπτη σύνδεση από το θλιβόμενο πέλμα μέσα στην πλάκα του δαπέδου). [12]



Εικόνα 4.3: Τυπική δύσκαμπτη στρεπτική εξασφάλιση.
(Πηγή: EN 1993-1-3)



1 θλιβόμενο πέλμα

Εικόνα 4.4: Τυπική πλευρική και στρεπτική εξασφάλιση του θλιβόμενου πέλματος με πλάκα σκυροδέματος.

(Πηγή: EN 1993-1-3)

- (3) Στη θέση κάθε πλαστικής άρθρωσης, η σύνδεση (π.χ. κοχλίες) του θλιβόμενου πέλματος με το αντιστηρίζον στοιχείο στο σημείο αυτό (π.χ. τεγίδες), και κάθε ενδιάμεσο στοιχείο (π.χ. διαγώνιο στοιχείο) θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να αναλάβει τοπική δύναμη ίση με το 2,5% του $N_{f,Ed}$, η οποία μεταφέρεται από το πέγμα στο επίπεδό του και κάθετα στο επίπεδο του κορμού, χωρίς να συνδυάζεται με άλλα φορτία.
- (4) Όπου δεν είναι πρακτικά εφικτή διάταξη μιας τέτοιας αντιστήριξης ακριβώς στη θέση της άρθρωσης, θα πρέπει να διατάσσεται εντός απόστασης $h/2$ το πολύ κατά μήκος του μέλους, όπου h είναι το συνολικό ύψος του στη θέση της πλαστικής άρθρωσης.
- (5) Για το σχεδιασμό συνδέσμων δυσκαμψίας, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί με έναν έλεγχο, επιπλέον του ελέγχου για ατέλεια, ότι το σύστημα δυσκαμψίας είναι ικανό να αναλάβει τις τοπικές δυνάμεις Q_m που εφαρμόζονται σε κάθε σταθεροποιούμενο μέλος στις θέσεις της πλαστικής άρθρωσης, όπου:

$$Q_m = 1,5 \alpha_m \frac{N_{f,Ed}}{100} \quad (4.4.2)$$

όπου $N_{f,Ed}$ είναι η αξονική δύναμη στο θλιβόμενο πέγμα του σταθεροποιούμενου μέλους στη θέση της πλαστικής άρθρωσης [7] [8] [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 Δεδομένα κατασκευής μοντέλου

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

- ΧΑΛΥΒΑΣ: S275
- EC3-2005
- ΔΟΚΟΙ: ΙΡΕ 300
- ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ: ΗΕΑ 450
- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ: $X=6\text{m}$, $Y=6\text{m}$, $Z=6\text{m}$
- ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΡΟΦΩΝ: 3

ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ

- ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
- ΜΟΝΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ: $G=3\text{KN/M}^2$
- ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ: C20/25

ΚΙΝΗΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

- ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Α (ΚΑΤΟΙΚΙΑ): $Q=2\text{KN/M}^2$

ΑΝΕΜΟΣ

- $W=1.5\text{KN/M}^2$ (ΠΙΕΣΗ)
- $W=1.5\text{KN/M}^2$ (ΥΠΟΠΙΕΣΗ)

ΧΙΟΝΙ

- $S=0.80\text{KN/M}^2$

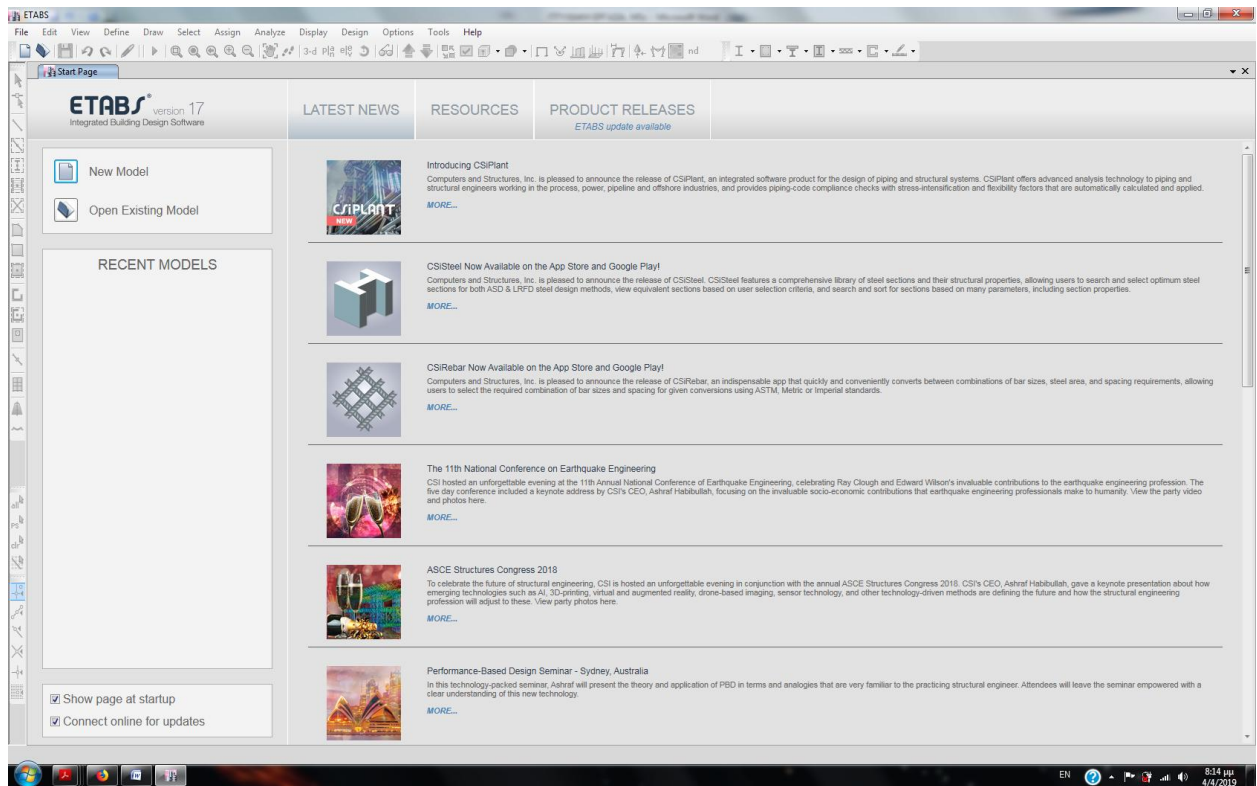
ΣΕΙΣΜΟΣ

- ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΙΙ
- $\alpha=0.16g$
- $q_x=q_y$
- $q_z=1.0$

5.2 Βήματα μοντελοποίησης της κατασκευής

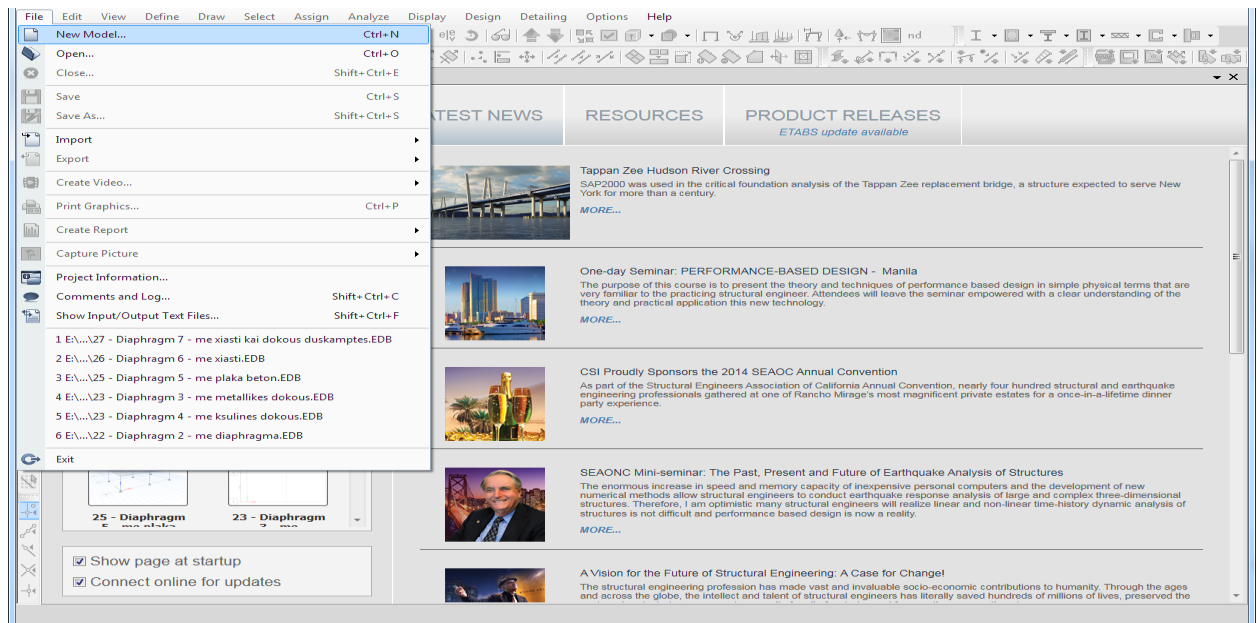
Στα Windows – Start – Programs – Etabs 2017

Ανοίγει το πρόγραμμα όπως φαίνεται στο Εικόνα 5.1.



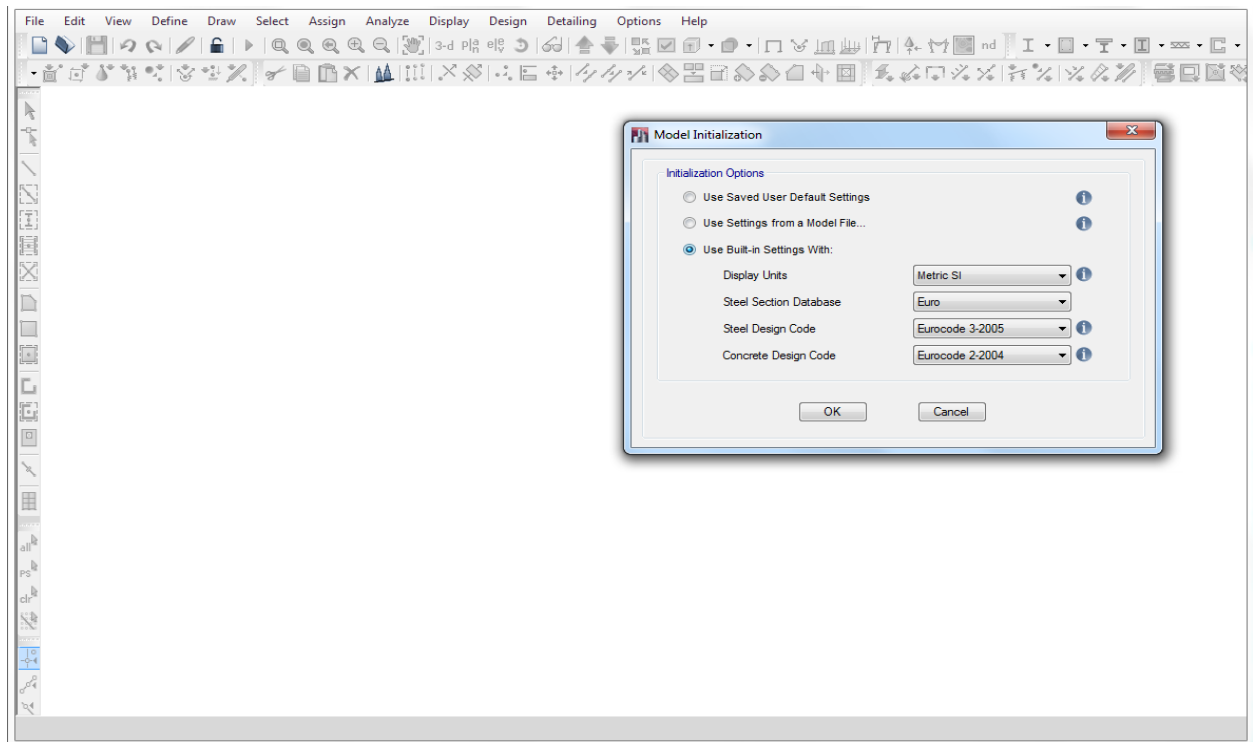
Εικόνα 5.1: Αρχικό παράθυρο προγράμματος.

Δημιουργία νέου αρχείου (Menu File – New Model).



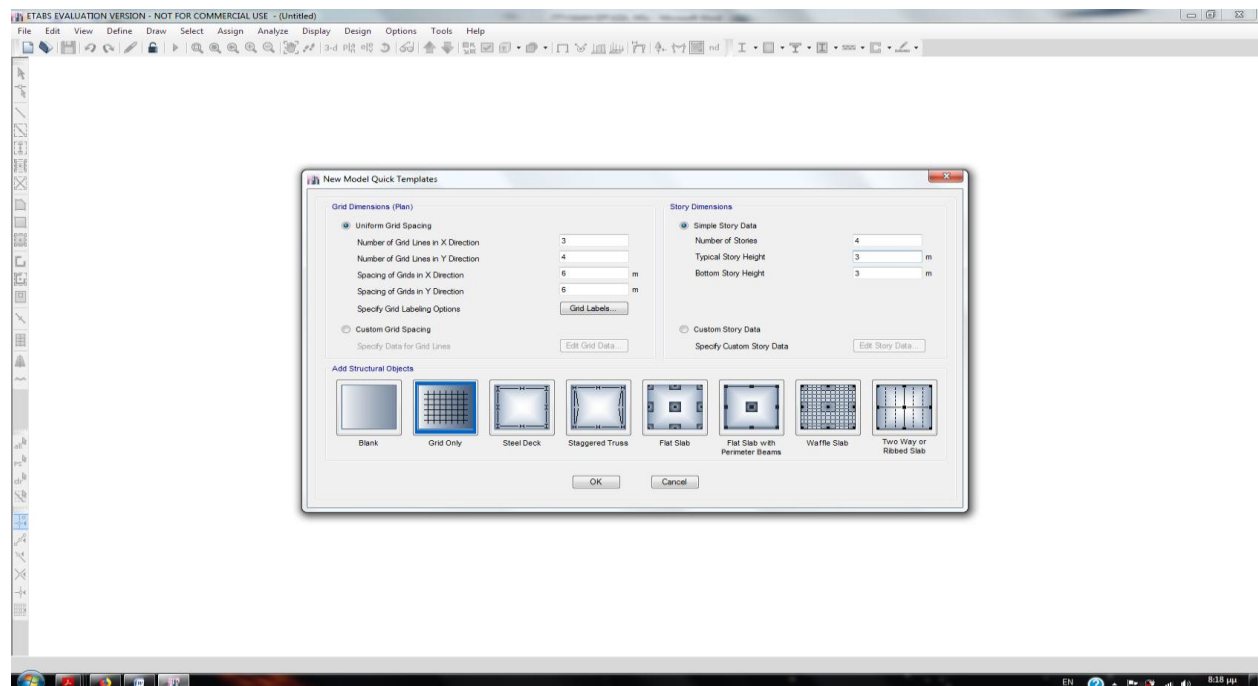
Εικόνα 5.2: Δημιουργία νέου αρχείου.

Επιλέγουμε μονάδες SI (m και kN) καθώς και τους Ευρωκώδικες



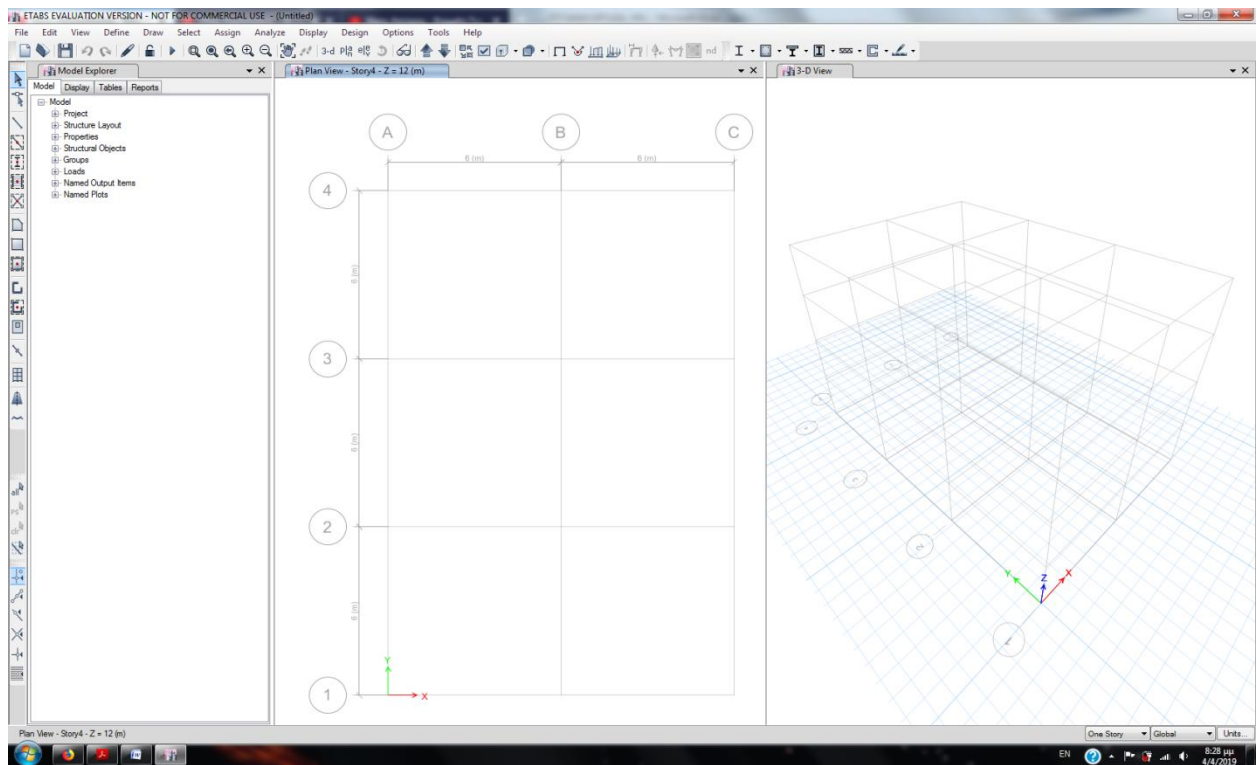
Εικόνα 5.3: Αρχικές ρυθμίσεις.

Στην συνέχεια δημιουργούμε έναν αρχικό κάναβο (grid) με την βοήθεια του template. Ο κάναβος είναι ένας τυπικός κάναβος με ίσες αποστάσεις σε όλα τα ανοίγματα, στην συνέχεια μπορεί να τροποποιηθεί για να ταιριάζει με την περίπτωσή μας.



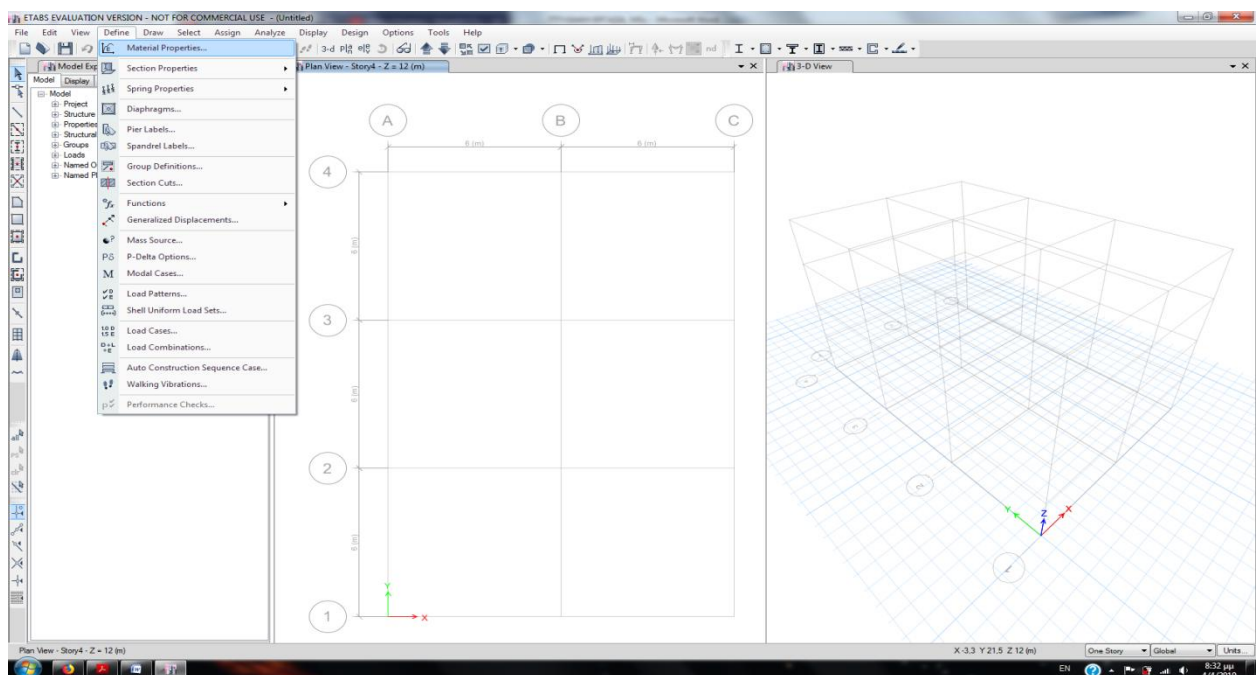
Εικόνα 5.4: Αρχικές ρυθμίσεις.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ο κάρναβος που δημιουργήθηκε.



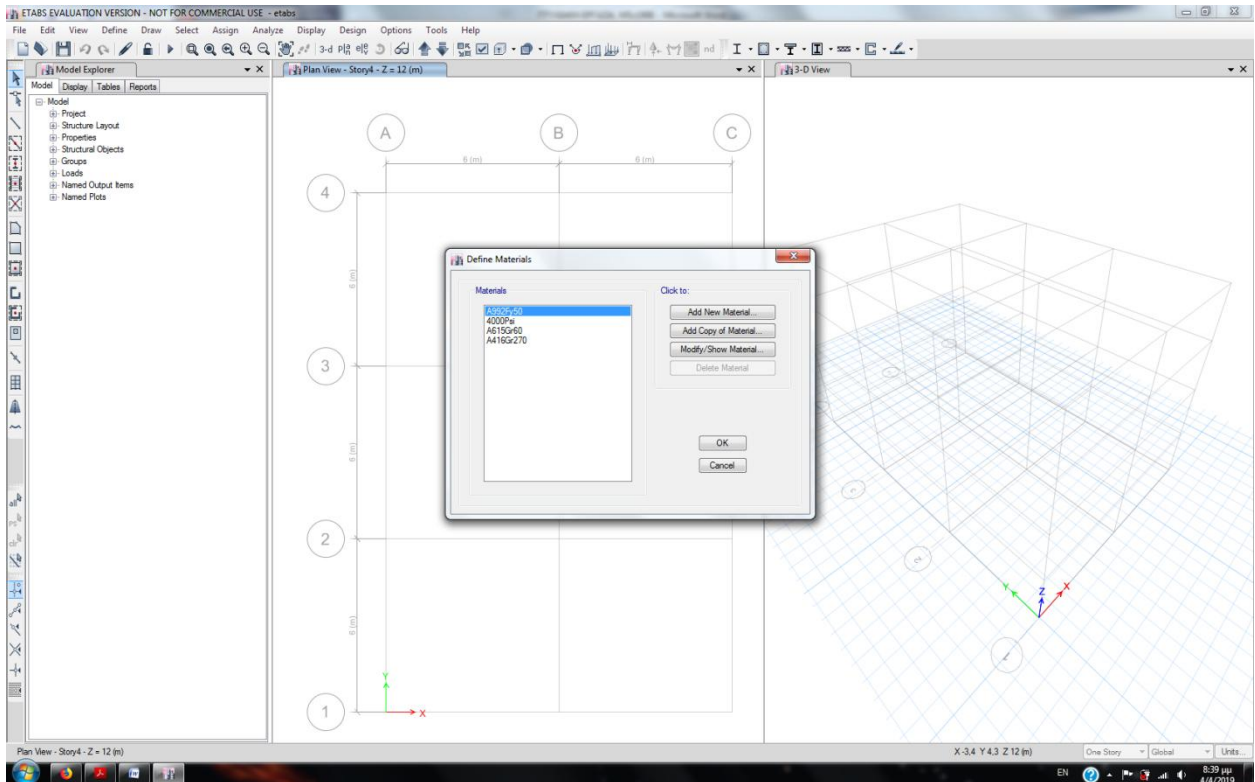
Εικόνα 5.5: Κάρναβος.

Στην συνέχεια θα ορισθούν τα υλικά της κατασκευής.



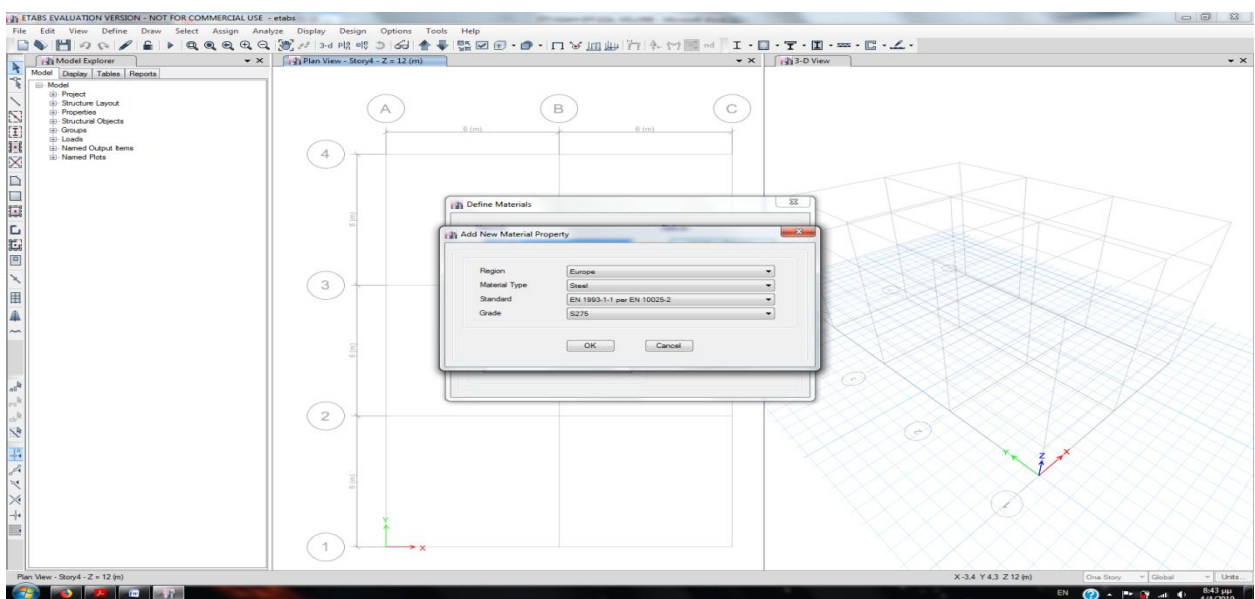
Εικόνα 5.6: Ιδιότητες υλικών.

Πατώντας “Add New Material” θα ορίσουμε τα υλικά της κατασκευής



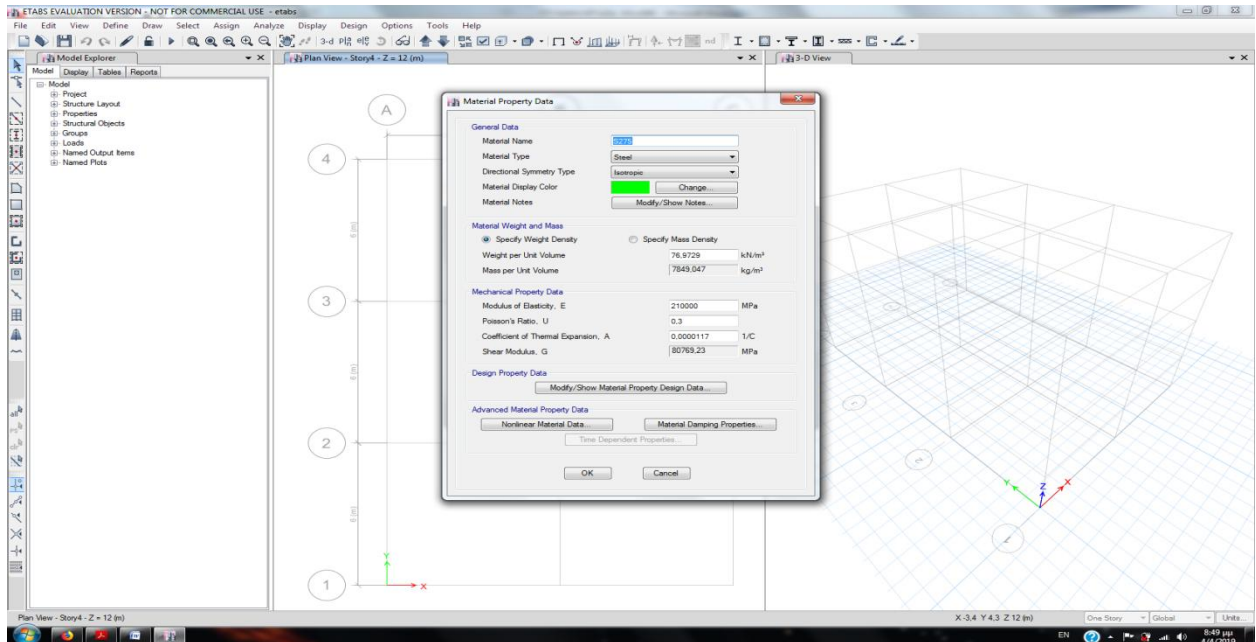
Εικόνα 5.7: Παράθυρο ορισμού υλικών.

Αρχικά ορίζουμε την περιοχή, τον τύπο του υλικού (σκυρόδεμα, χάλυβας κλπ), τον κανονισμό και τέλος την ποιότητα του υλικού (π.χ. χάλυβας S275). Στο Σχήμα 5.8 ορίζεται νέο υλικό για χάλυβας S275.



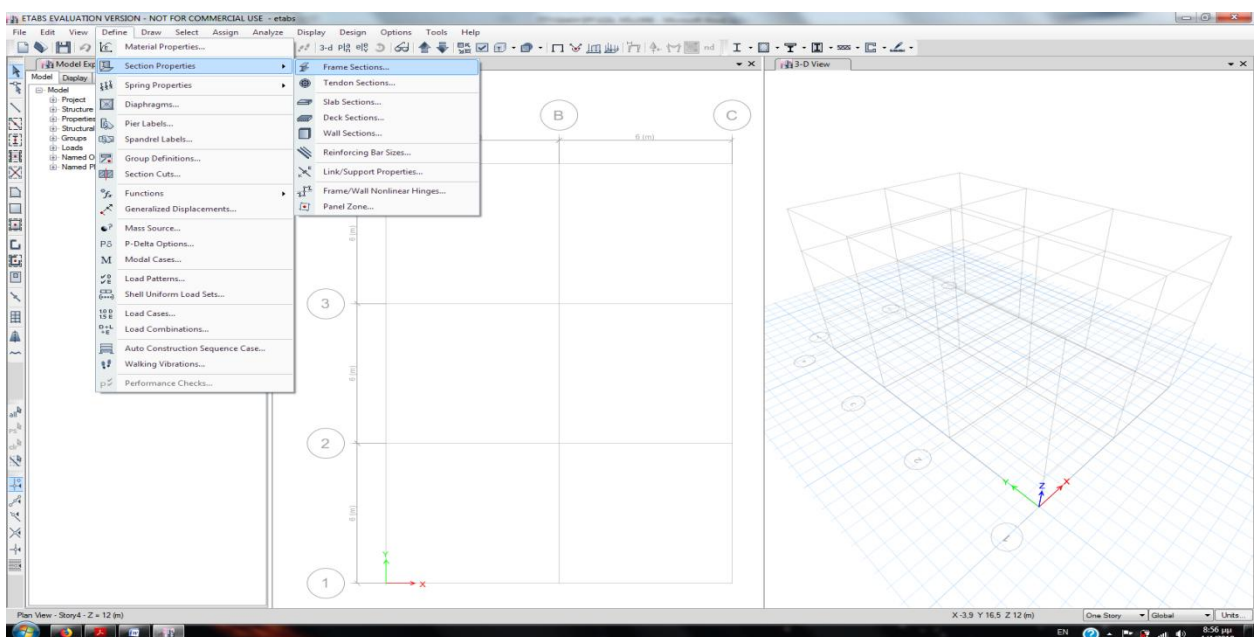
Εικόνα 5.8: Ιδιότητες νέου υλικού.

Στην συνέχεια ορίζουμε τις ιδιότητες του υλικού, όπως το ειδικό βάρος (weight per unit volume), την πυκνότητα (mass per unit volume), μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity), τον λόγο του Poisson, τον συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής α (coefficient of thermal expansion), το μέτρο διάτμησης (shear modulus) κλπ. Επίσης μπορούν να ορισθούν μη γραμμικές ιδιότητες, τιμές για την απόσβεση κλπ.



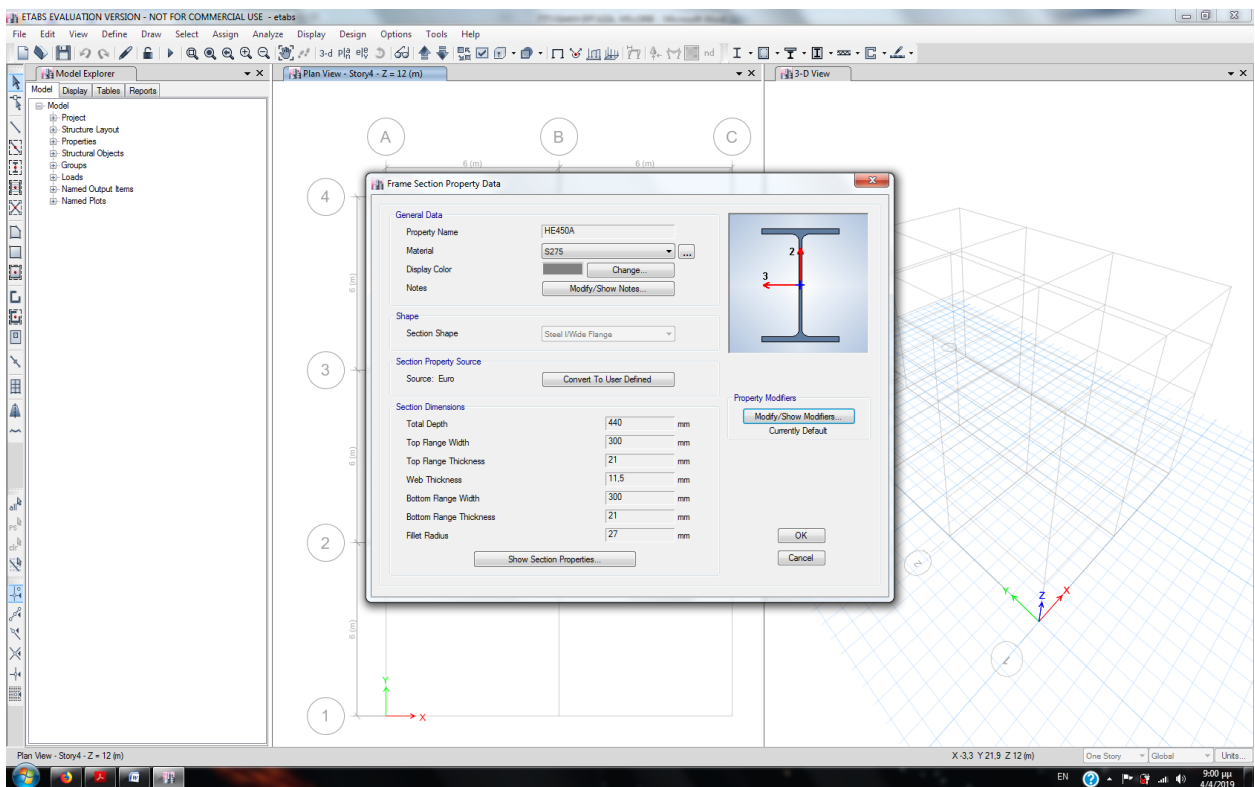
Εικόνα 5.9: Ιδιότητες νέου υλικού.

Στην συνέχεια θα πρέπει να ορισθούν οι διατομές της κατασκευής.

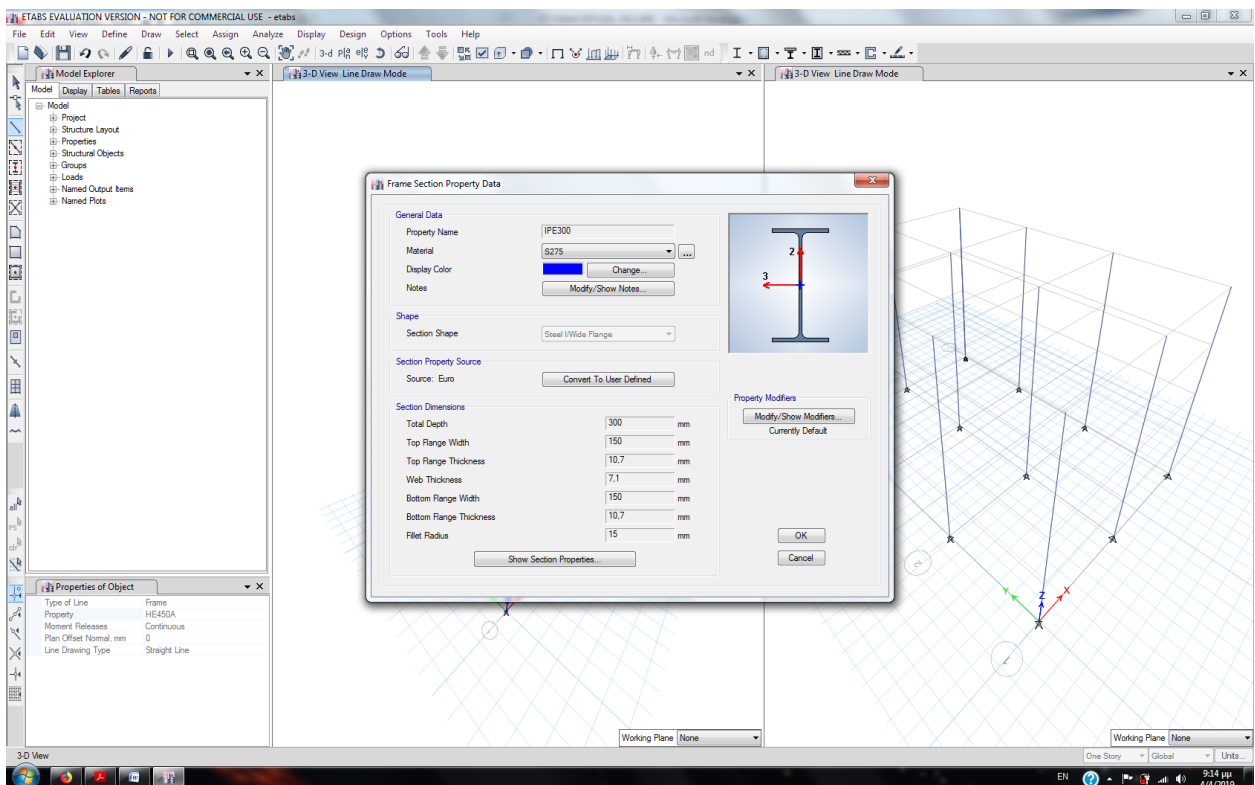


Εικόνα 5.10: Διατομές μελών.

Πατώντας “Add New Property” θα ορίσουμε το σχήμα της διατομής ανάλογα με το υλικό κατασκευής του.

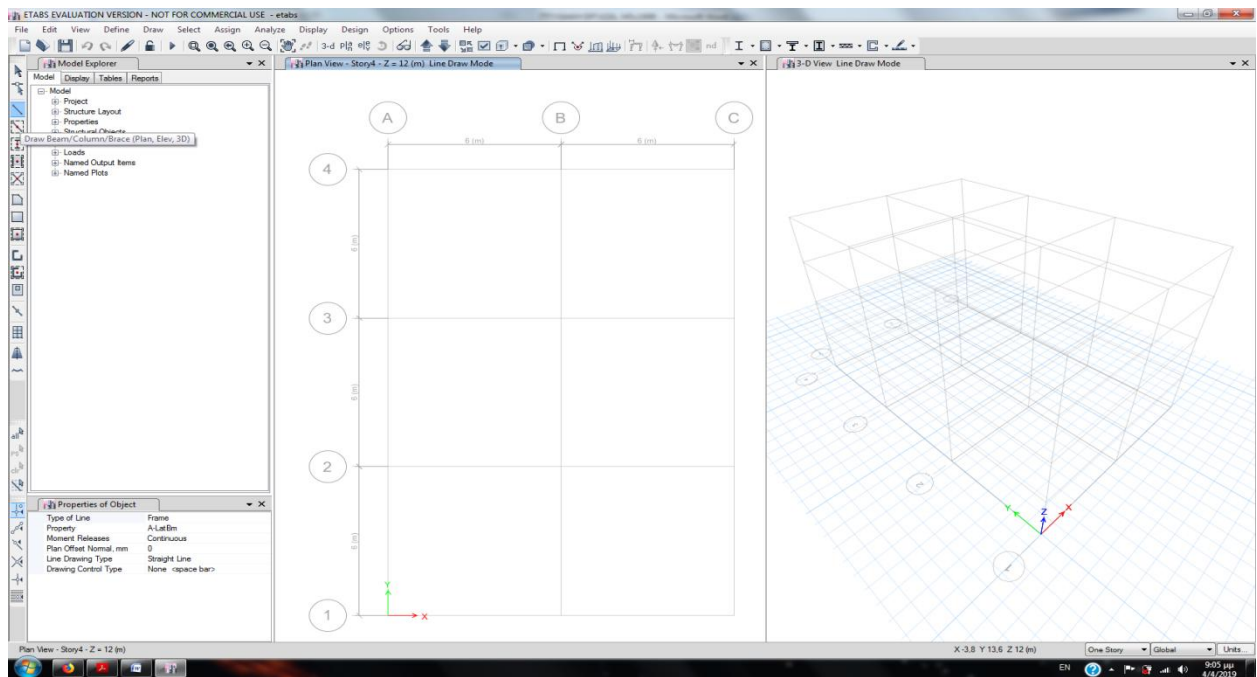


Εικόνα 5.11: Τύπος σχήματος διατομής ανάλογα με το υλικό.



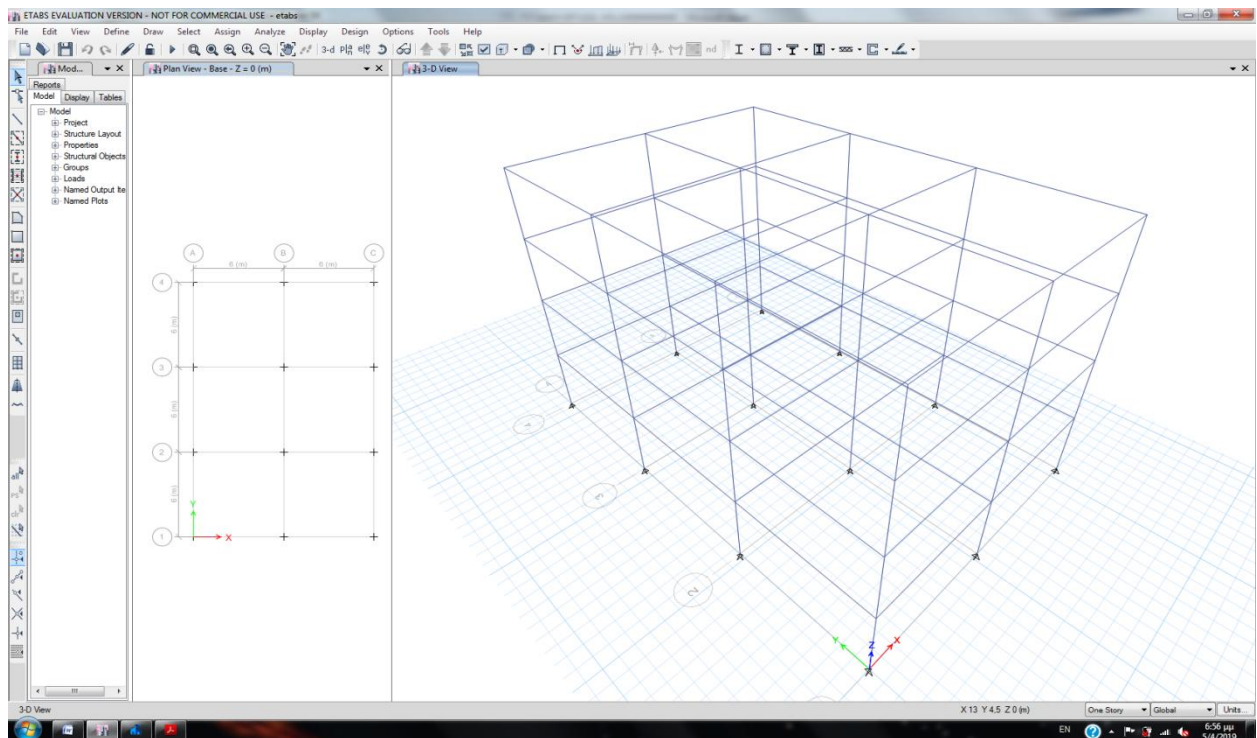
Εικόνα 5.12: Τύπος σχήματος διατομής ανάλογα με το υλικό.

Σχεδιάζουμε στην 3D όψη με γραμμές τα διάφορα μέλη (δοκούς και υποστυλώματα) (Draw Beam/Column/Brace) .



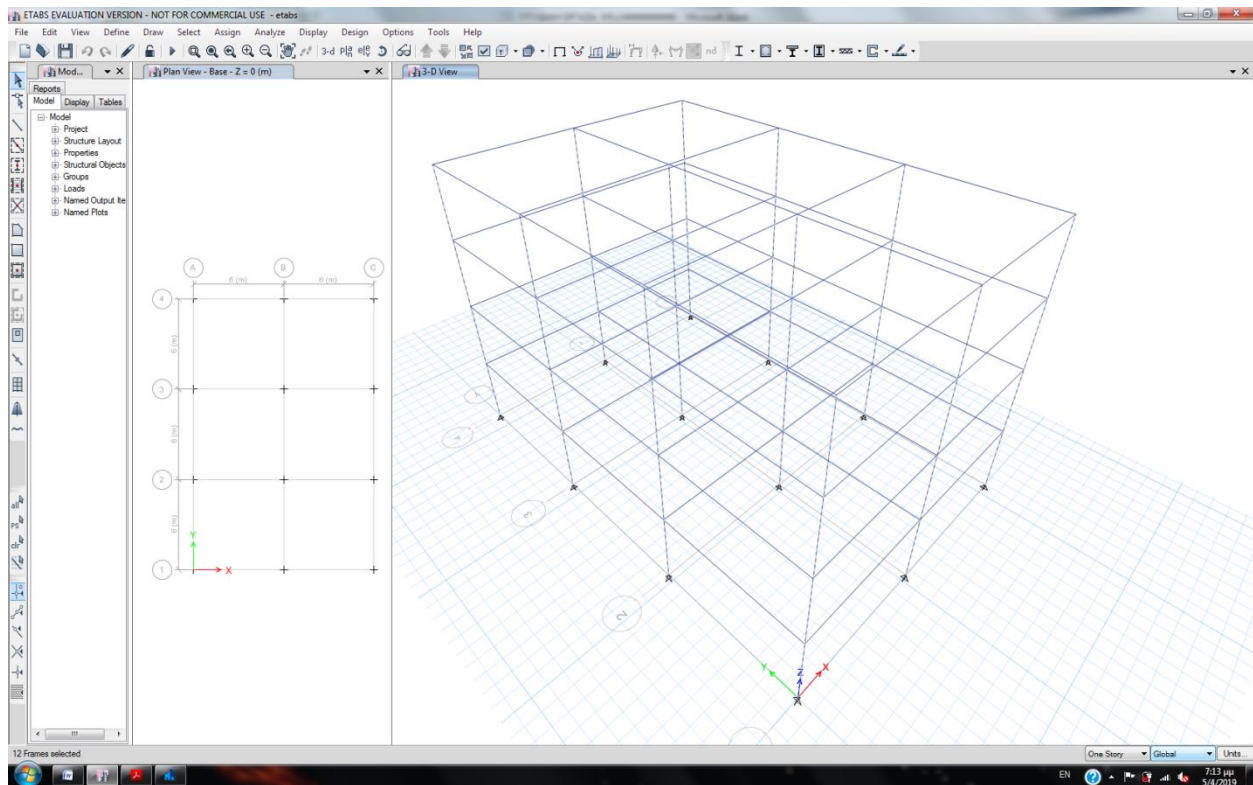
Εικόνα 5.13: Σχεδιασμός δοκών/υποστυλωμάτων.

Σχεδιάζουμε το μοντέλο όπως στον κώνναβο όπως φαίνεται στο Εικόνα 5.14.



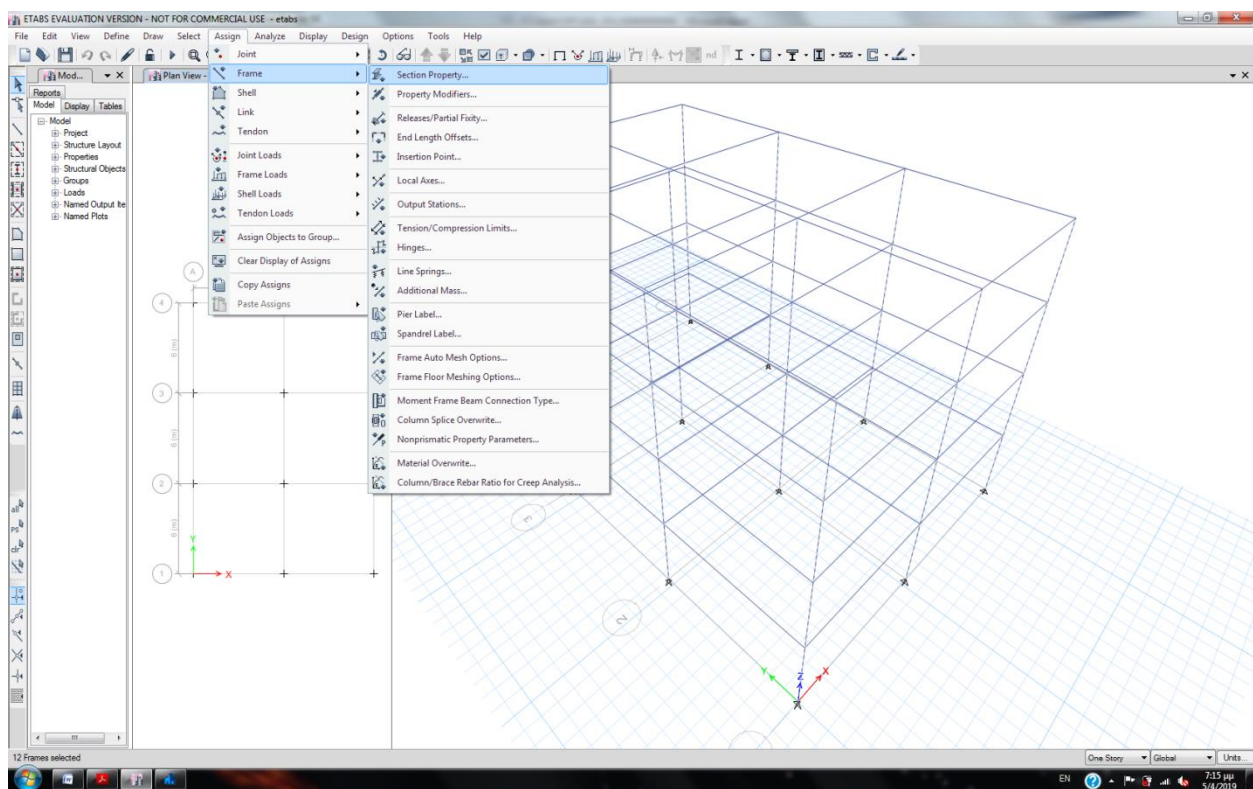
Εικόνα 5.14: Κατασκευή.

Επιλέγουμε τα υποστυλώματα για να αποδώσουμε διατομή.



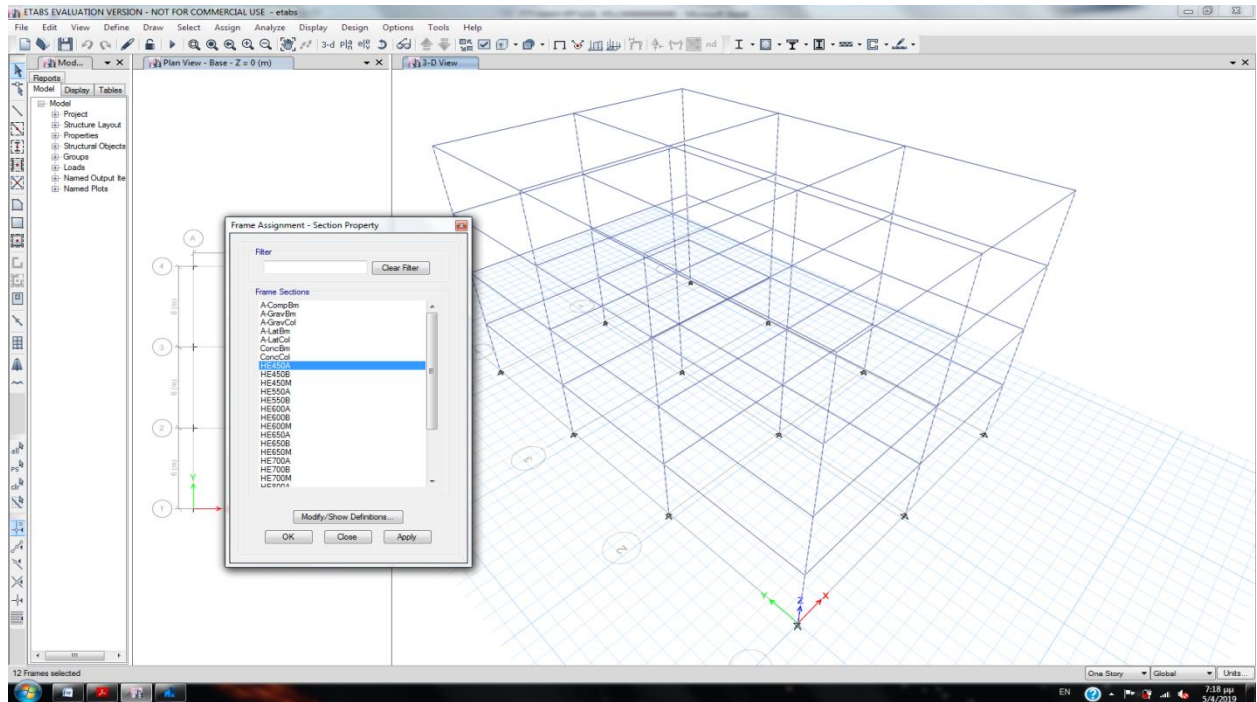
Εικόνα 5.15: Επιλογή υποστυλωμάτων.

Στην συνέχεια επιλέγουμε στο menu Assign – Section Property για να επιλέξουμε την διατομή του υποστυλώματος και να την συσχετίσουμε με τα επιλεγμένα υποστυλώματα.



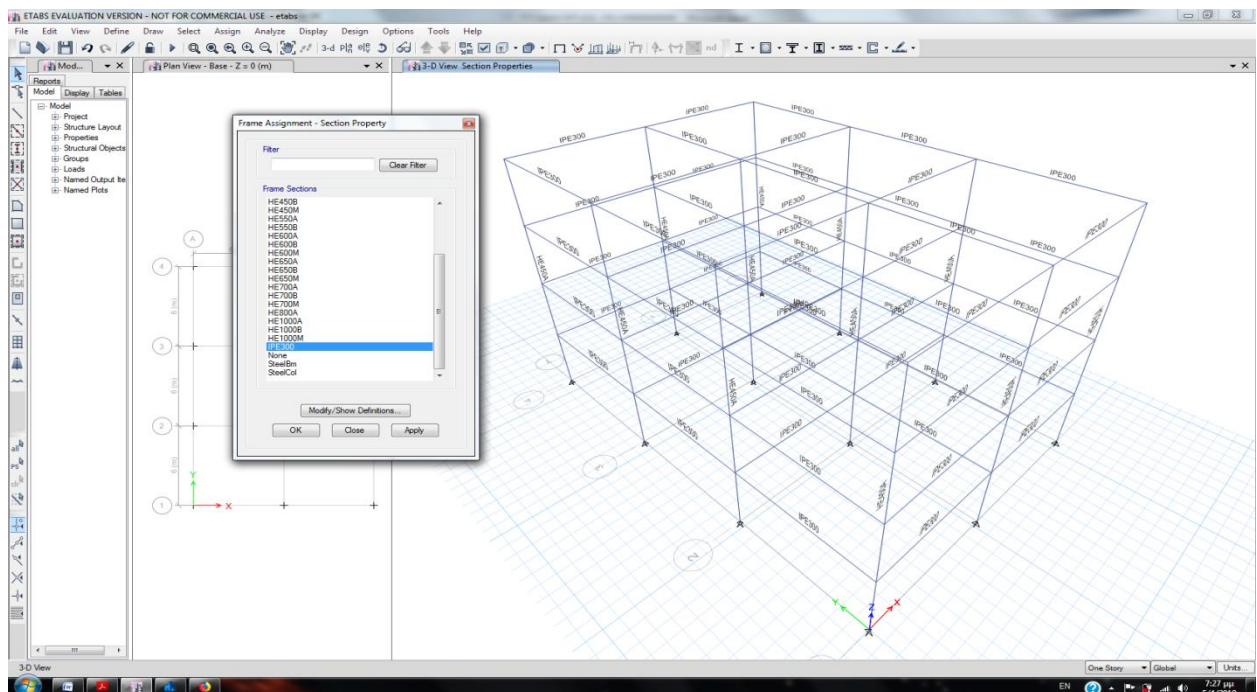
Εικόνα 5.16: Επιλογή διατομής για τα υποστυλώματα.

Επιλέγουμε την διατομή HEA 450A που είχαμε ορίσει νωρίτερα με το menu Define – Section Properties – Frame Sections.



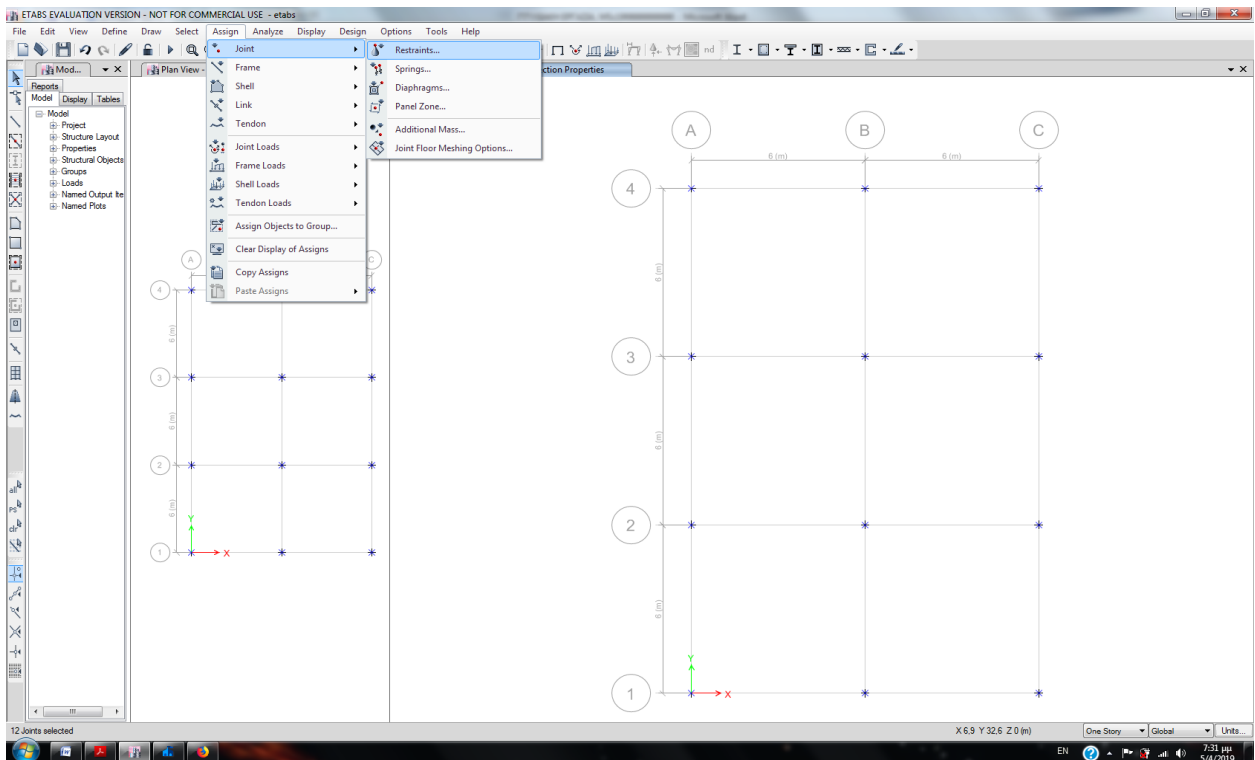
Εικόνα 5.17: Επιλογή διατομής για τα υποστυλώματα.

Επιλέγουμε τις δοκούς και ορίζουμε διατομές και γι' αυτές.



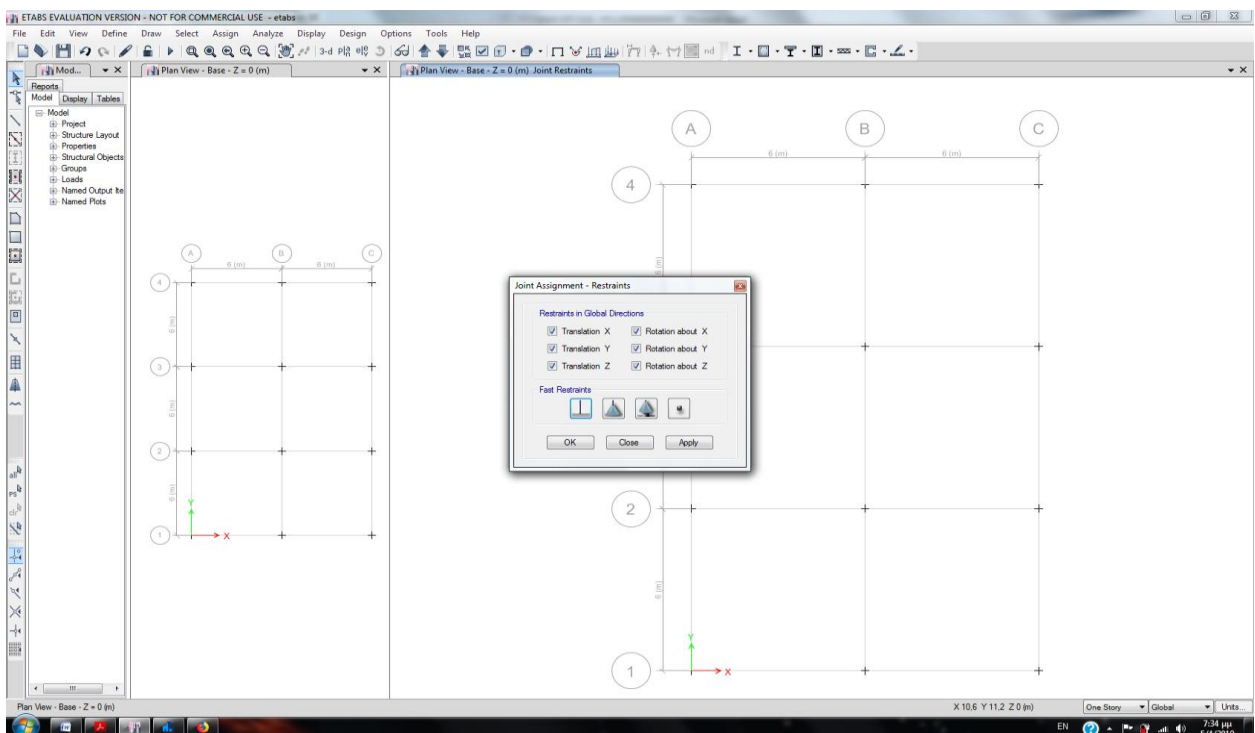
Εικόνα 5.18: (α) Διατομές μετά τον ορισμό των υποστυλωμάτων, επιλογή των δοκών και (β) επιλογή διατομής και για τις δοκούς.

Επιλέγουμε τους κόμβους στην στάθμη θεμελίωσης και αλλάζουμε τις αρθρώσεις που είχε ορίσει το πρόγραμμα από μόνο του σε πακτώσεις (στους κόμβους στην στάθμη 0.00 το πρόγραμμα όρισε από μόνο του αρθρώσεις).



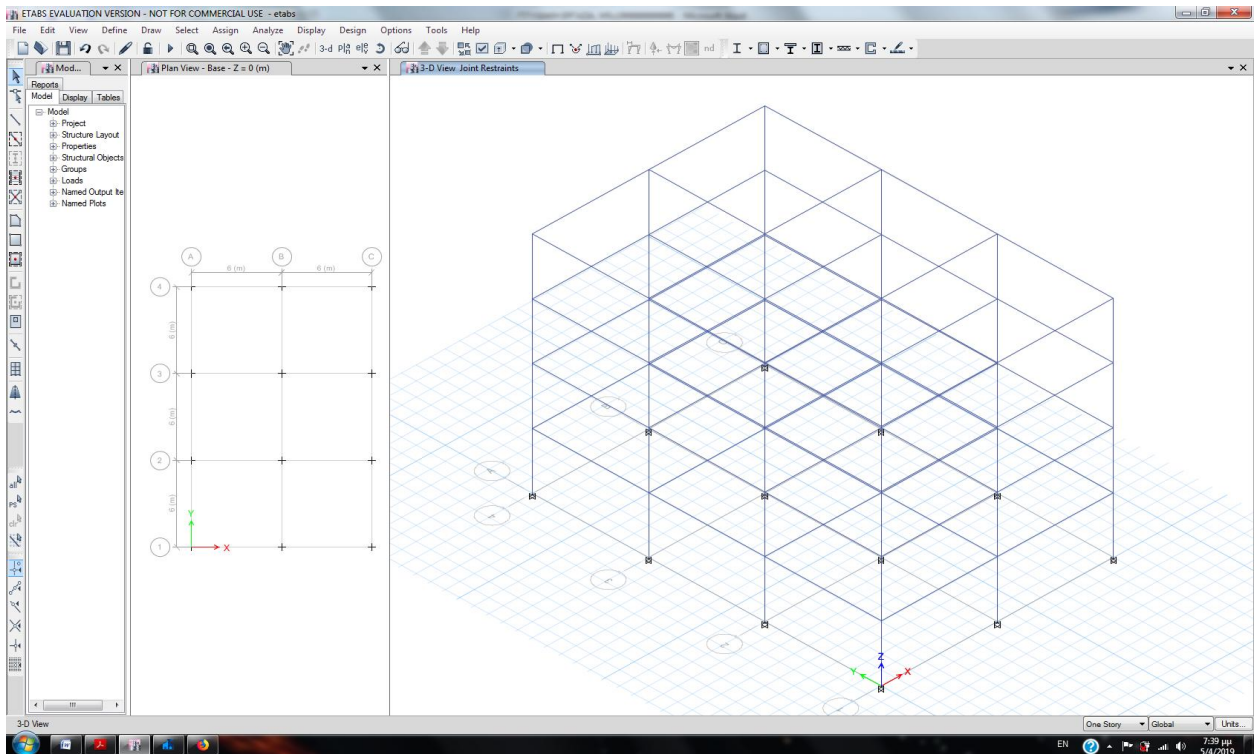
Εικόνα 5.19: Επιλογή κόμβων στηρίξεων για να ορίσουμε πακτώσεις.

Δεσμεύουμε τους βαθμούς ελευθερίας που θέλουμε. Για την πάκτωση στον χώρο δεσμεύουμε όλους τους βαθμούς ελευθερίας.



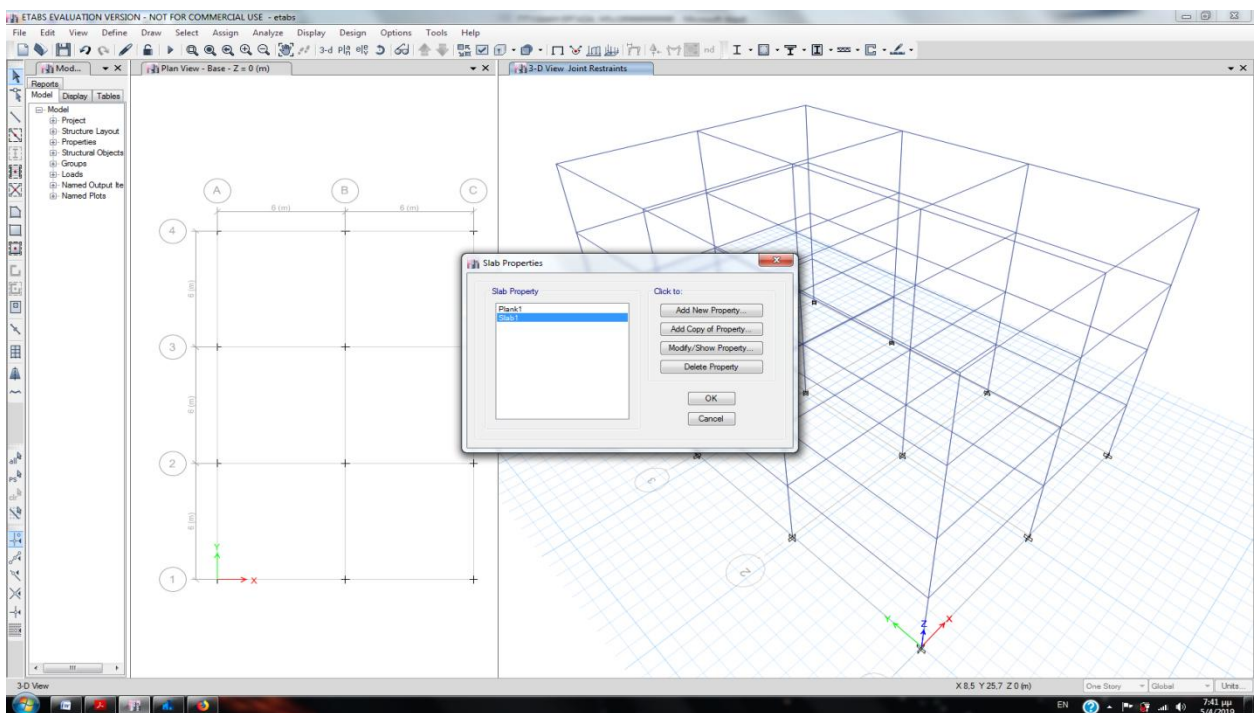
Εικόνα 5.20: Βαθμοί ελευθερίας στήριξης.

Μετά τον ορισμό πακτώσεων, αλλάζει το σύμβολο στις στηρίξεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.21.



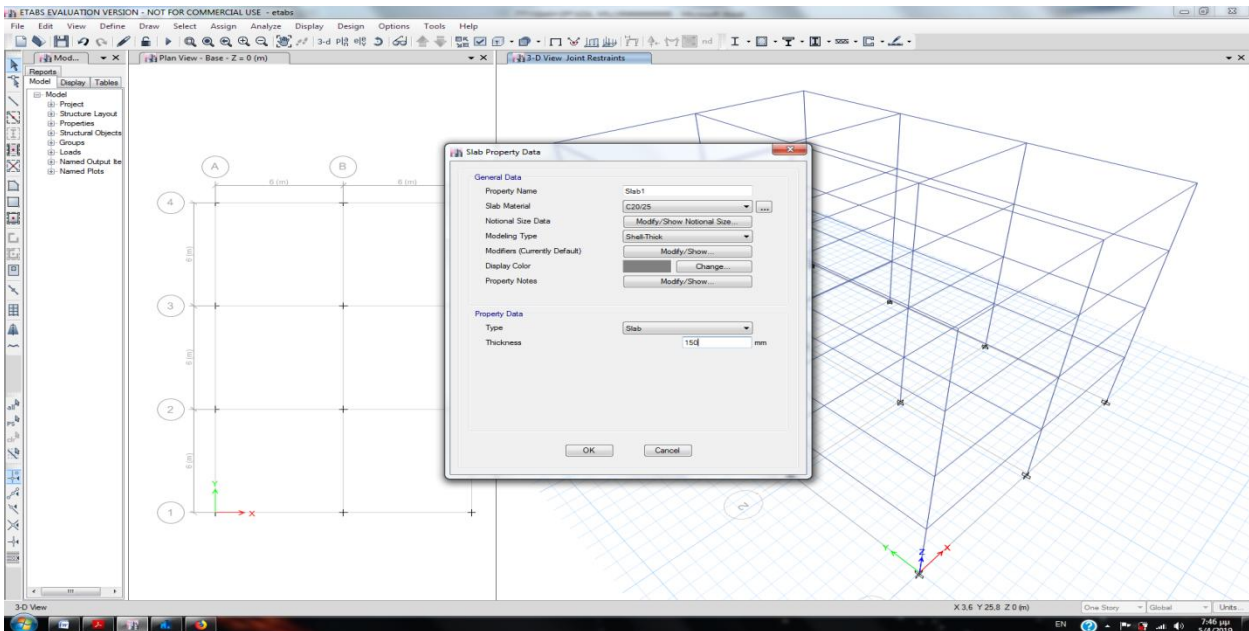
Εικόνα 5.21: Πακτώσεις στην βάση της θεμελίωσης.

Ορίζουμε ιδιότητες για την πλάκα από το menu Define – Section Properties – Slab sections. Τροποποιούμε την “Slab 1”.

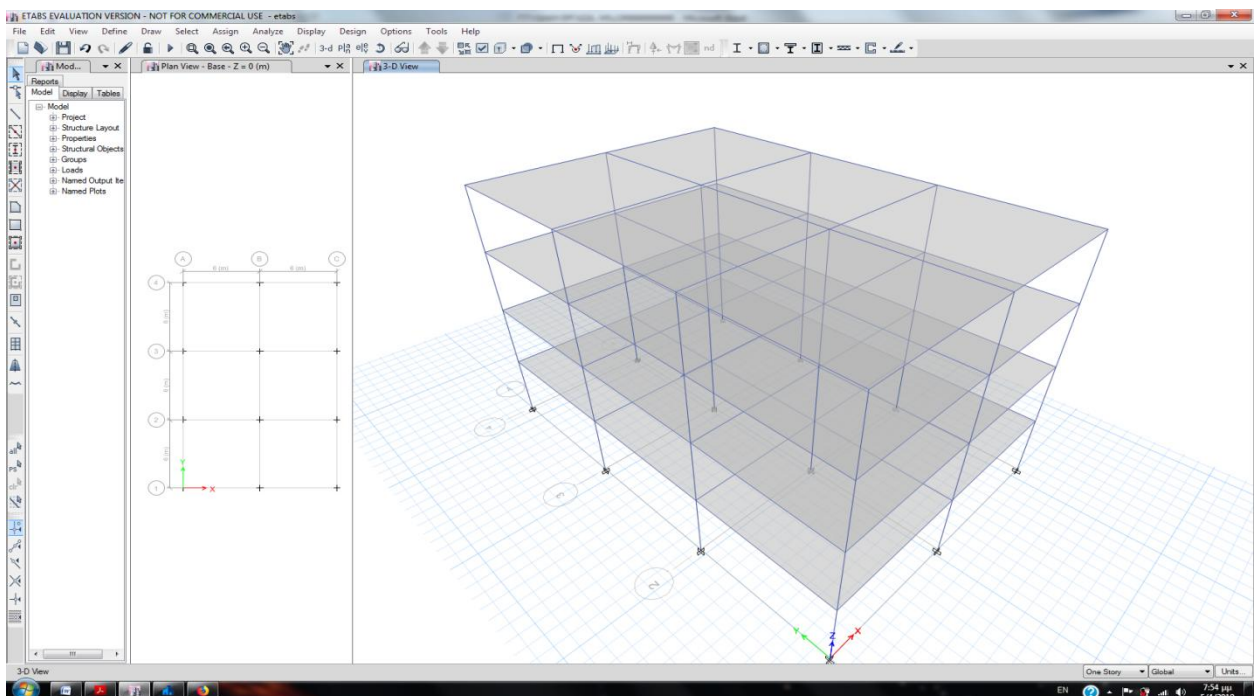


Εικόνα 5.22: Τροποποιούμε τις ιδιότητες του στοιχείου πλάκας.

Πατάμε “Modify/Show Property” για να αλλάξουμε τις ιδιότητες. Δίνουμε το υλικό, τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου, τον τύπο της πλάκας καθώς και το πάχος της πλάκας. Για συμπαγείς πλάκες επιλέγουμε “Slab”. Για τα πεπερασμένα επιλέγουμε shell-thick, δηλαδή στοιχείο κελύφους. (Το Shell-thin αγνοεί εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις και γενικά το shell-thick είναι το στοιχείο που προτείνεται να χρησιμοποιείται καθώς δίνει συνήθως αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια).



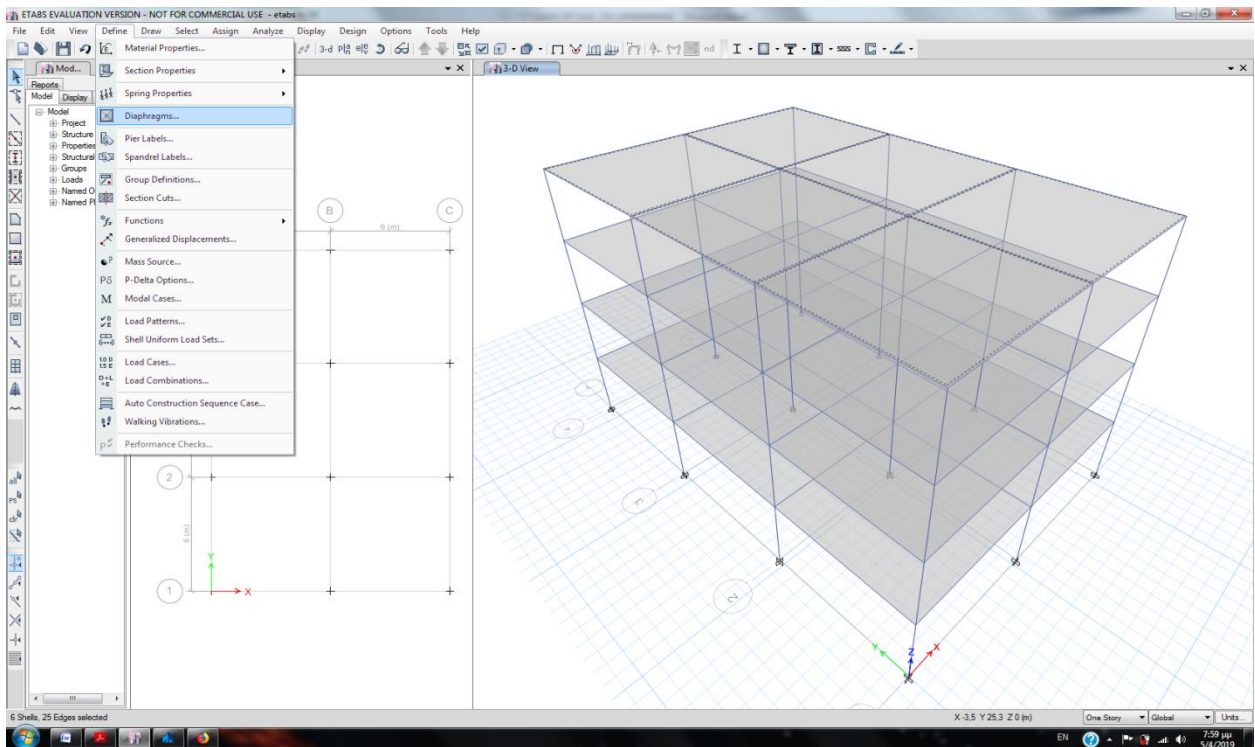
Εικόνα 5.23: Ιδιότητες πλάκας.



Εικόνα 5.24: Στοιχείο πλάκας σε κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση.

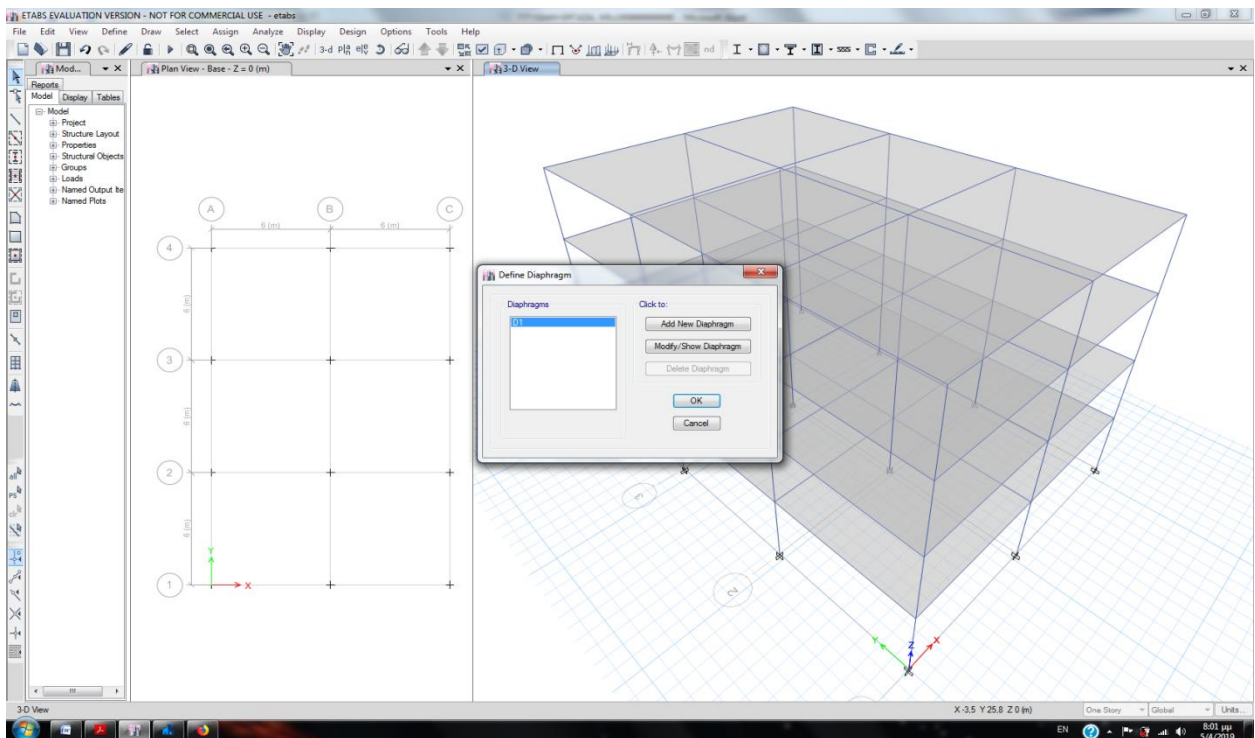
Δίνουμε διάφραγμα. Το διάφραγμα εξασφαλίζει διαφραγματική λειτουργία στους κόμβους που θα επιλέξουμε. Επιλέγουμε αν θα δώσουμε διάφραγμα ανάλογα με την πλάκα που έχουμε. Πλάκες σκυροδέματος συνήθως ορίζουν διάφραγμα.

Ωστόσο αν περάσουμε την πλάκα με πεπερασμένα επιφανειακά στοιχεία τότε μπορούμε να μην δώσουμε διάφραγμα και να εξετάσουμε την πραγματική συμπεριφορά. Το διάφραγμα ορίζεται από το menu Define – Diaphragms.



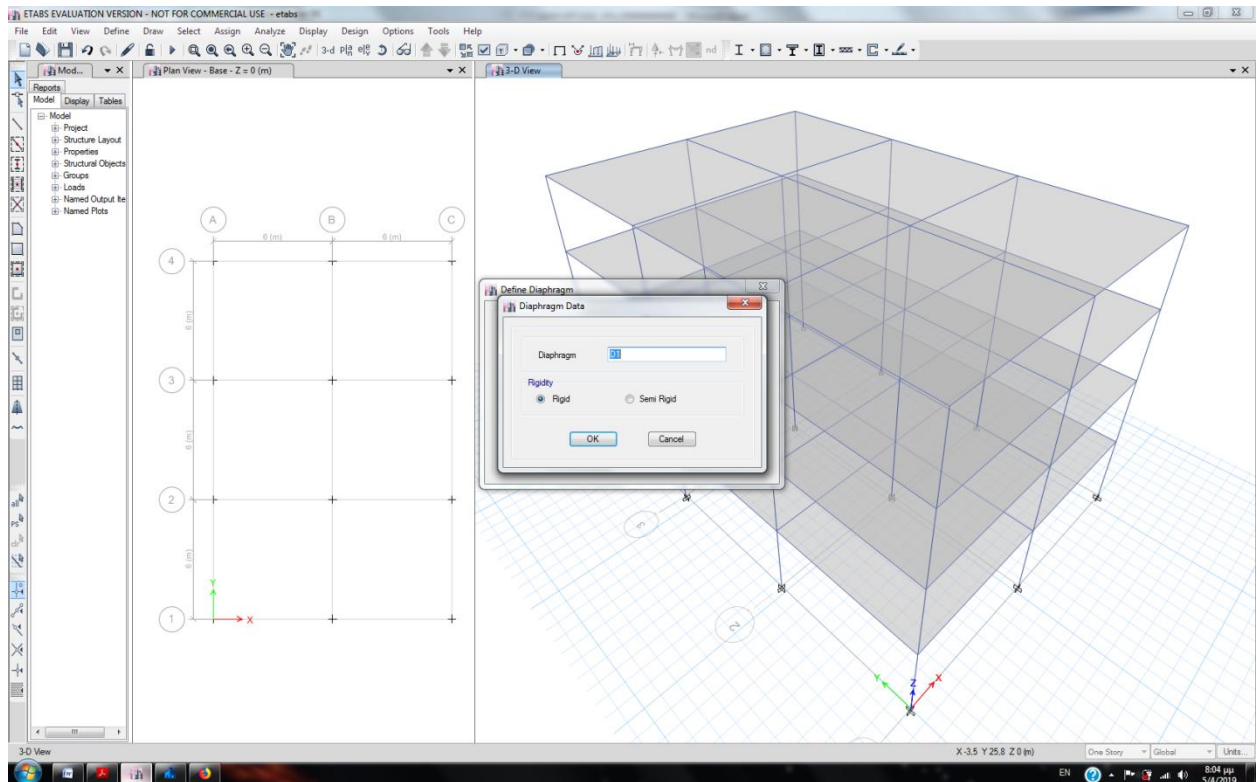
Εικόνα 5.25: Ορισμός διαφράγματος.

Πατάμε “Modify/Show Diaphragm” για να τροποποιήσουμε το διάφραγμα D1 ή ορίσουμε καινούργιο πατώντας “Add New Diaphragm”.



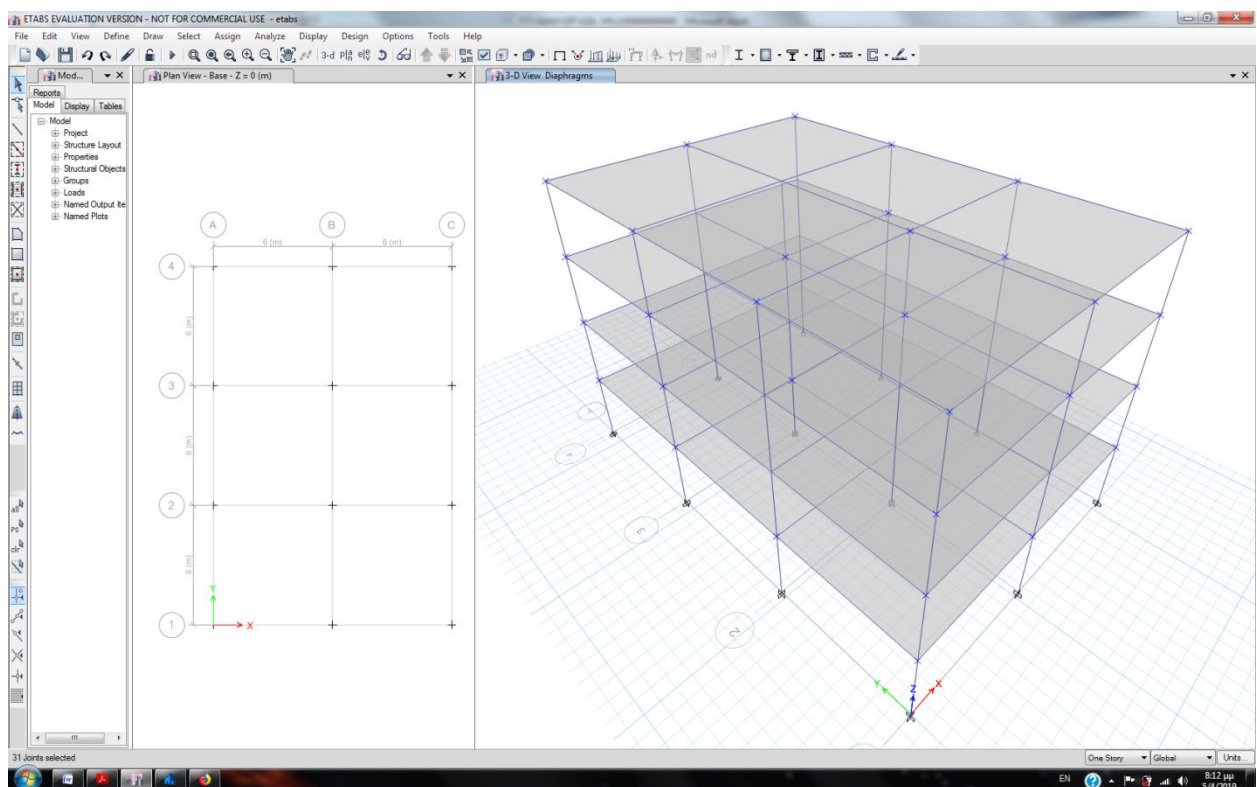
Εικόνα 5.26: Τροποποίηση στοιχείων διαφράγματος.

Δίνουμε άκαμπτο διάφραγμα (Rigidity: Rigid)



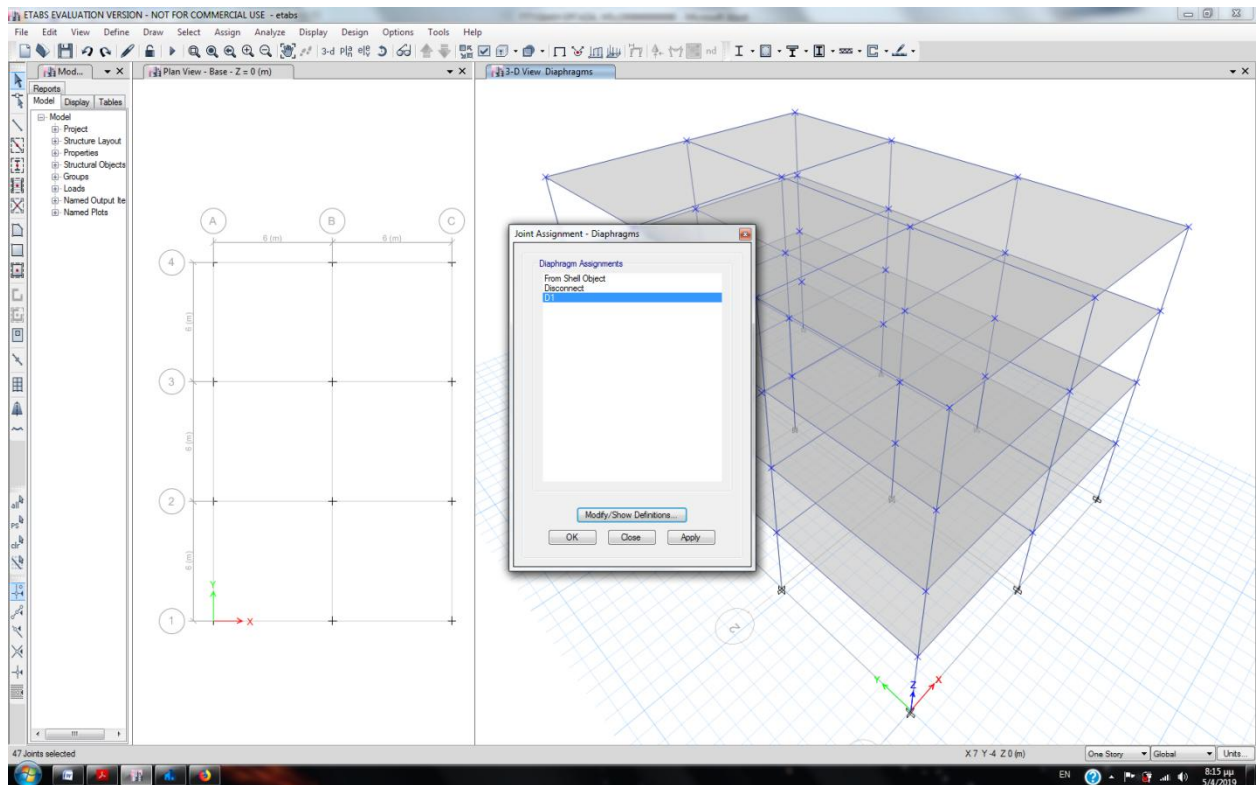
Εικόνα 5.27: Επιλογή άκαμπτου διαφράγματος.

Επιλέγουμε τους κόμβους του ορόφου και δίνουμε διάφραγμα (Assign – Joint – Diaphragms).



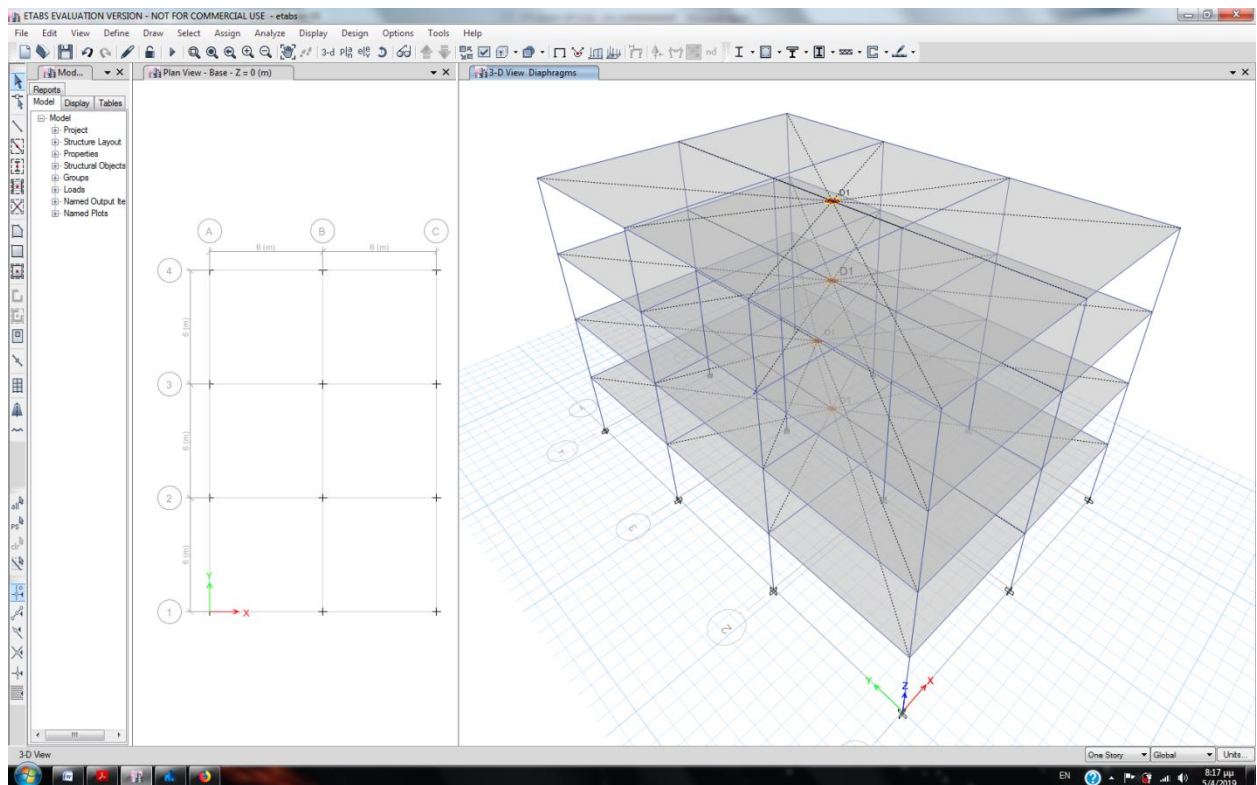
Εικόνα 5.28: Επιλογή κόμβων και ορισμός διαφράγματος.

Επιλέγουμε ότι σ' αυτούς τους κόμβους θα δώσουμε διάφραγμα "D1".



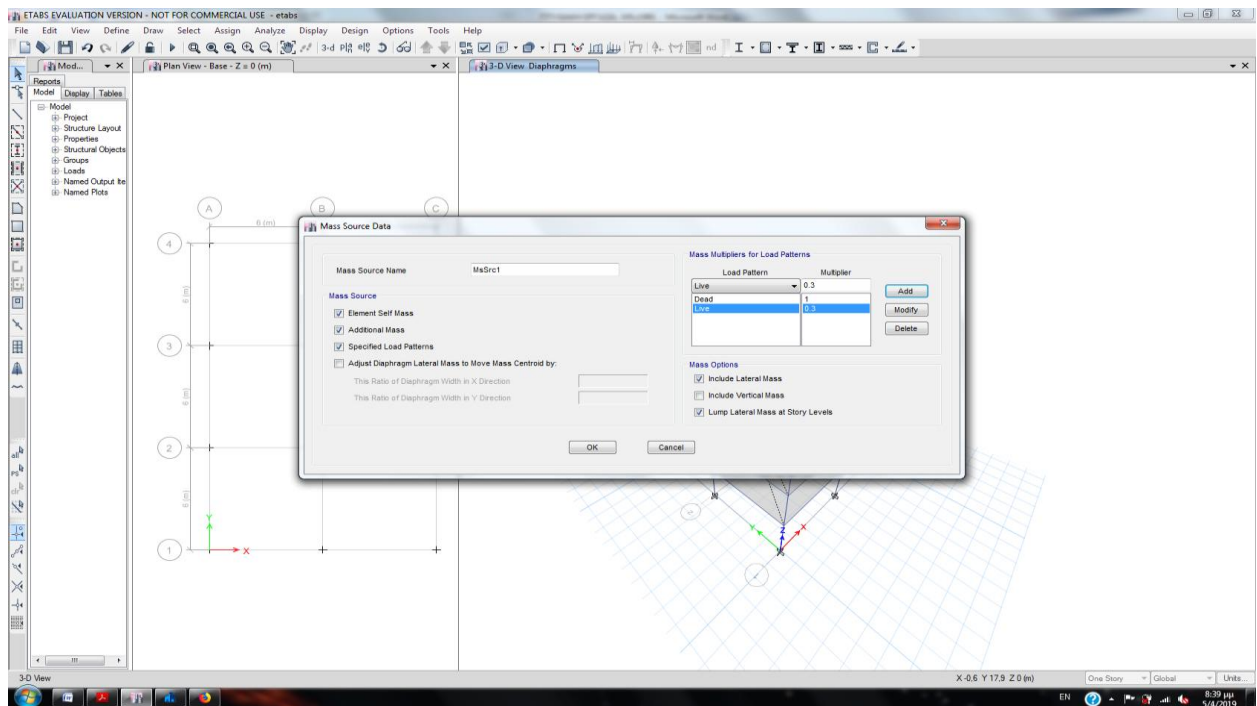
Εικόνα 5.29: Επιλογή διαφράγματος.

Αφού δώσουμε το διάφραγμα εμφανίζεται στο επίπεδο των κόμβων η ονομασία μαζί με διακεκομμένες γραμμές που ενώνουν όλους τους κόμβους του διαφράγματος.



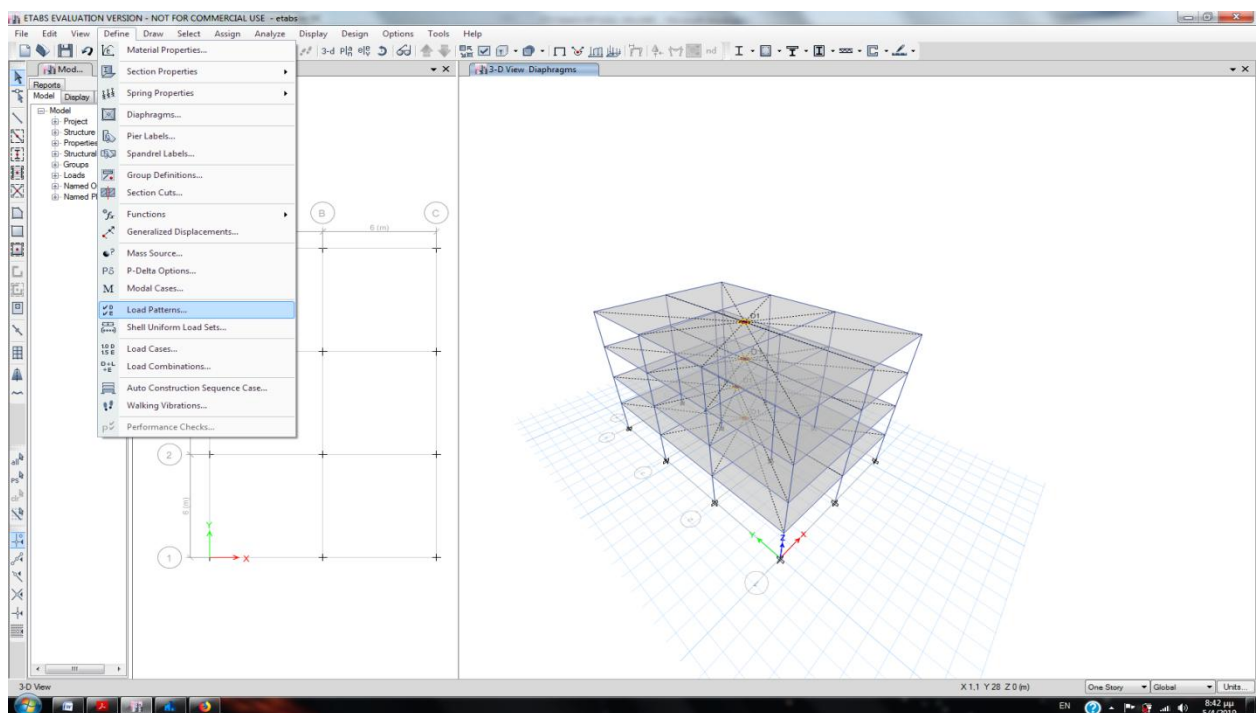
Εικόνα 5.30: Διάφραγμα στην στάθμη της πλάκας.

Ορίζουμε τις μάζες να τις λαμβάνει από το ίδιο βάρος, από πρόσθετες μάζες που μπορεί να έχουμε δώσει και από τα κατακόρυφα φορτία, από τον σεισμικό συνδυασμό $g + 0.30 q$.



Εικόνα 5.31: Ορισμός μαζών από ίδια βάρη, πρόσθετες μάζες και συνδυασμό φορτίσεων.

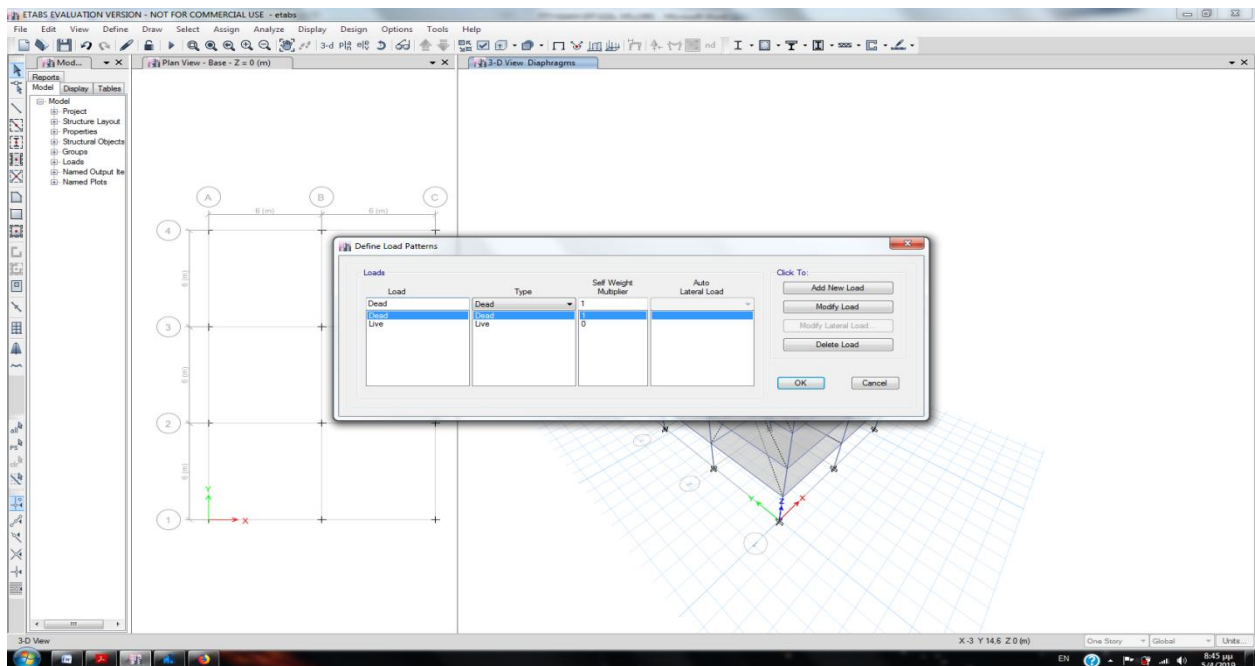
Ορίζουμε τις φορτίσεις



Εικόνα 5.32: Ορισμός φορτίσεων.

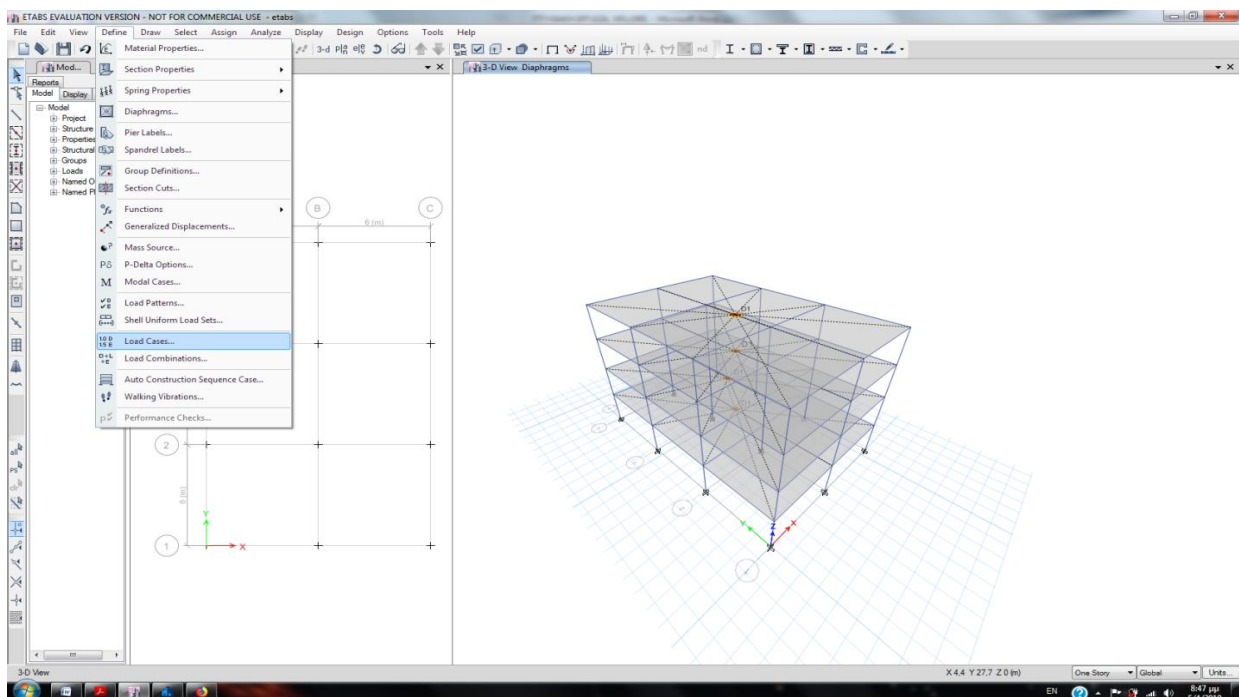
Στα load patterns ορίζονται δυναμεις, μετακινήσεις ή θερμοκρασίες. Οποιοσδήποτε συνδυασμός κόμβων και στοιχείων μπορεί να υποβάλλονται σε φορτίσεις. Κάθε φόρτιση έχει έναν τύπο

(μόνιμα, κινητά, άνεμος, χιόνι, σεισμός κλπ.) ο οποίος κατατάσσει την φόρτιση. Η μορφή της φόρτισης στην συνέχεια επιβάλλεται μέσω των περιπτώσεων φορτίσεων (load cases) για να δώσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Το ίδιο βάρος το λαμβάνει στα μόνιμα. Αν δεν θέλουμε να ληφθεί υπόψιν πουθενά στην ανάλυση, τότε το “self weight multiplier” το βάζουμε μηδέν.

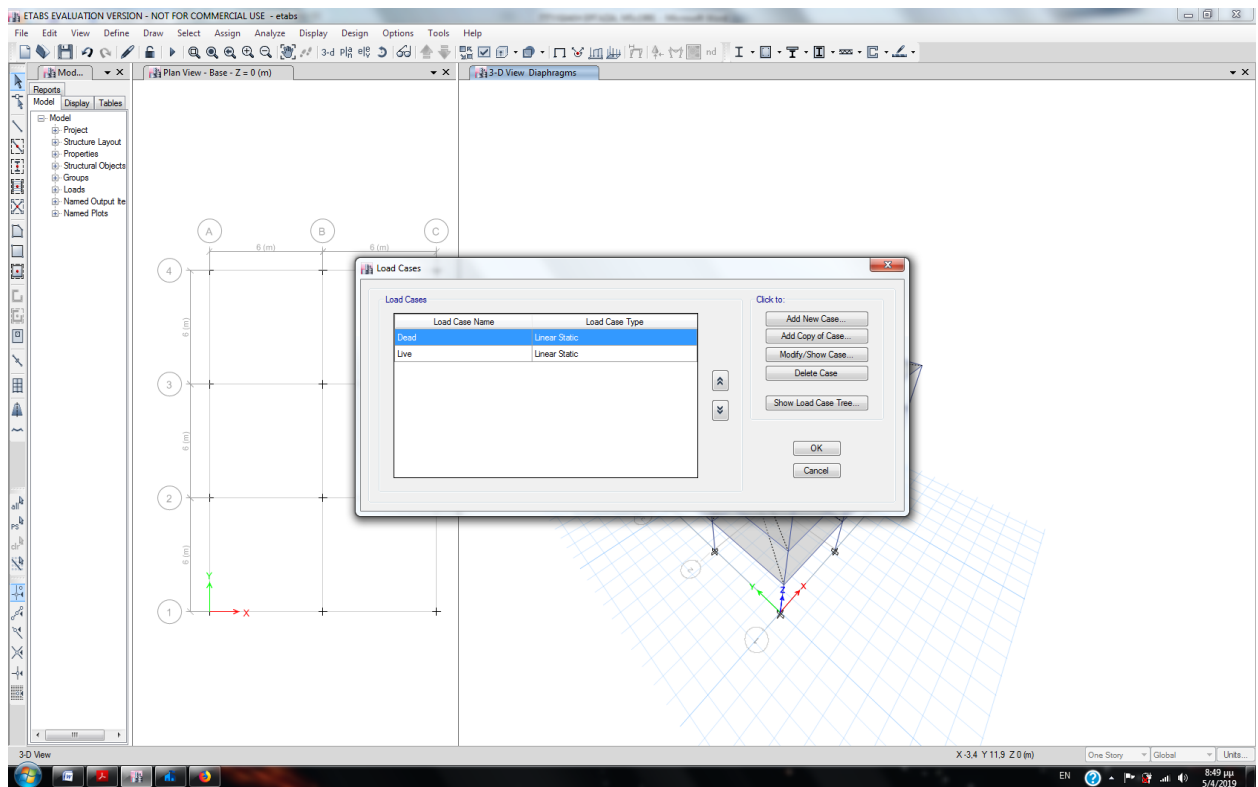


Εικόνα 5.33: Φορτίσεις. Το ίδιο βάρος συμπεριλαμβάνεται στα μόνιμα (dead) φορτία.

Στην συνέχεια ορίζουμε τις περιπτώσεις φορτίσεων (load cases). Τα load cases ορίζουν πώς επιβάλλονται τα load patterns (στατική ή δυναμικά), πώς συμπεριφέρεται η κατασκευή (γραμμικά ή μη γραμμικά) και πώς πραγματοποιείται η ανάλυση (φασματική ανάλυση, μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης κλπ). Σε κάθε load case μπορεί να επιβάλλει ένα load pattern ή συνδυασμό τους.

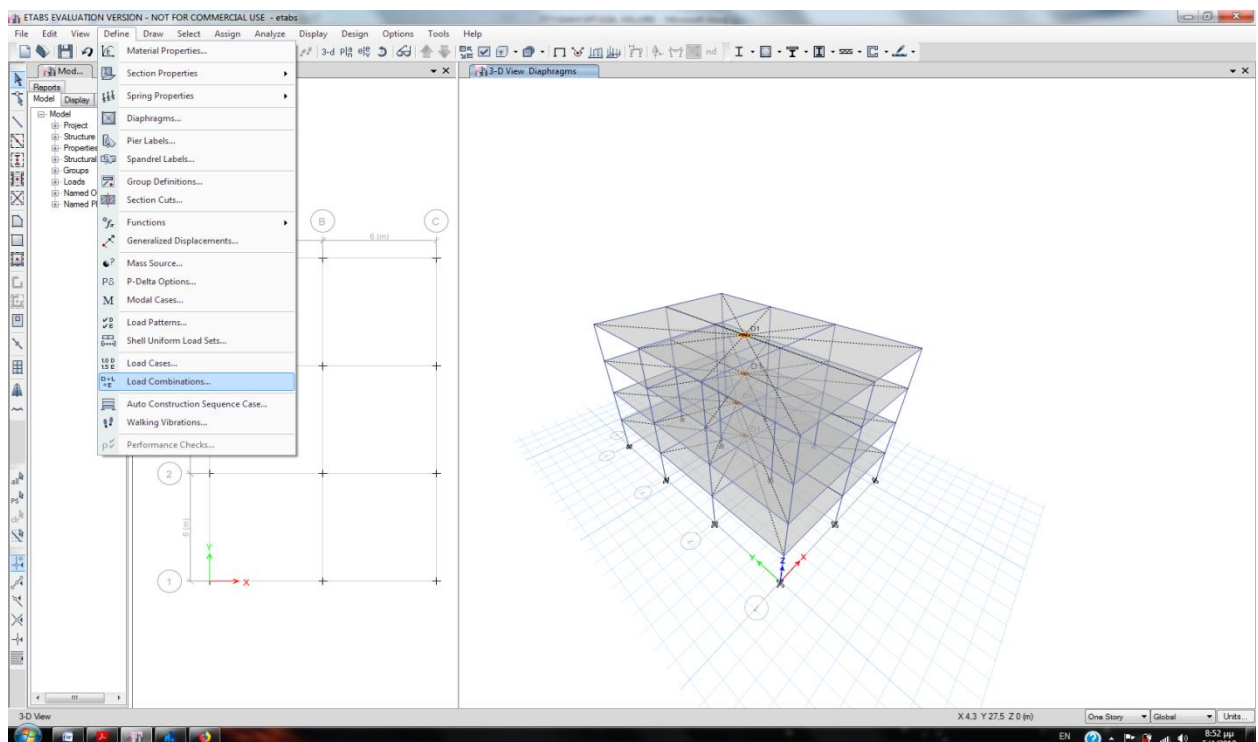


Εικόνα 5.34: Ορισμός load case.



Εικόνα 5.35: Περιπτώσεις φορτίσεων.

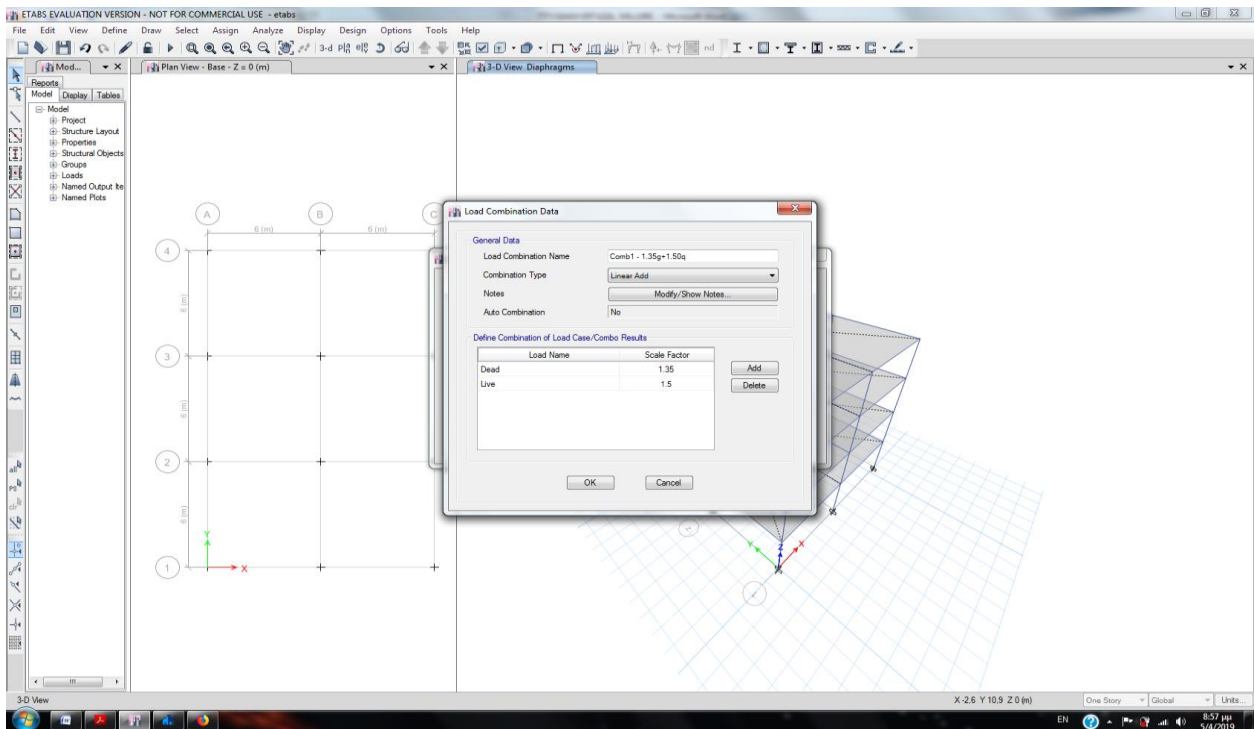
Στην συνέχεια φτιάχνουμε συνδυασμούς φορτίσεων.



Εικόνα 5.36: Επιλογή συνδυασμού φορτίσεων.

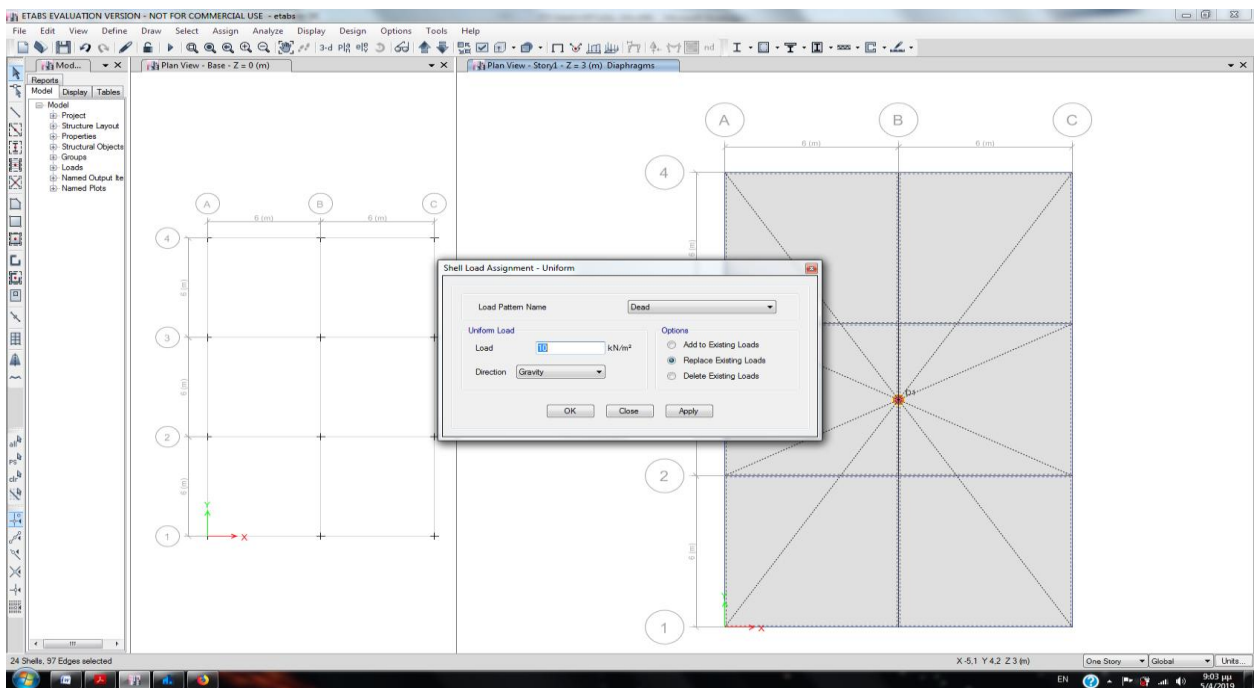
Δίνουμε ονομασία στον συνδυασμό φόρτισης, επιλέγουμε τον τύπο (άθροισμα, περιβάλλουσα (envelope), απόλυτο άθροισμα, SRSS κλπ) και επιλέγουμε τις φορτίσεις και τον αντίστοιχο

συντελεστή ασφαλείας. Επιλέγουμε “Linear Add” για να προσθέσει τα φορτία, αλλιώς αν π.χ. θελούμε περιβάλλουσα καποιων φορτίσεων, τότε θα επιλέξουμε το envelope.



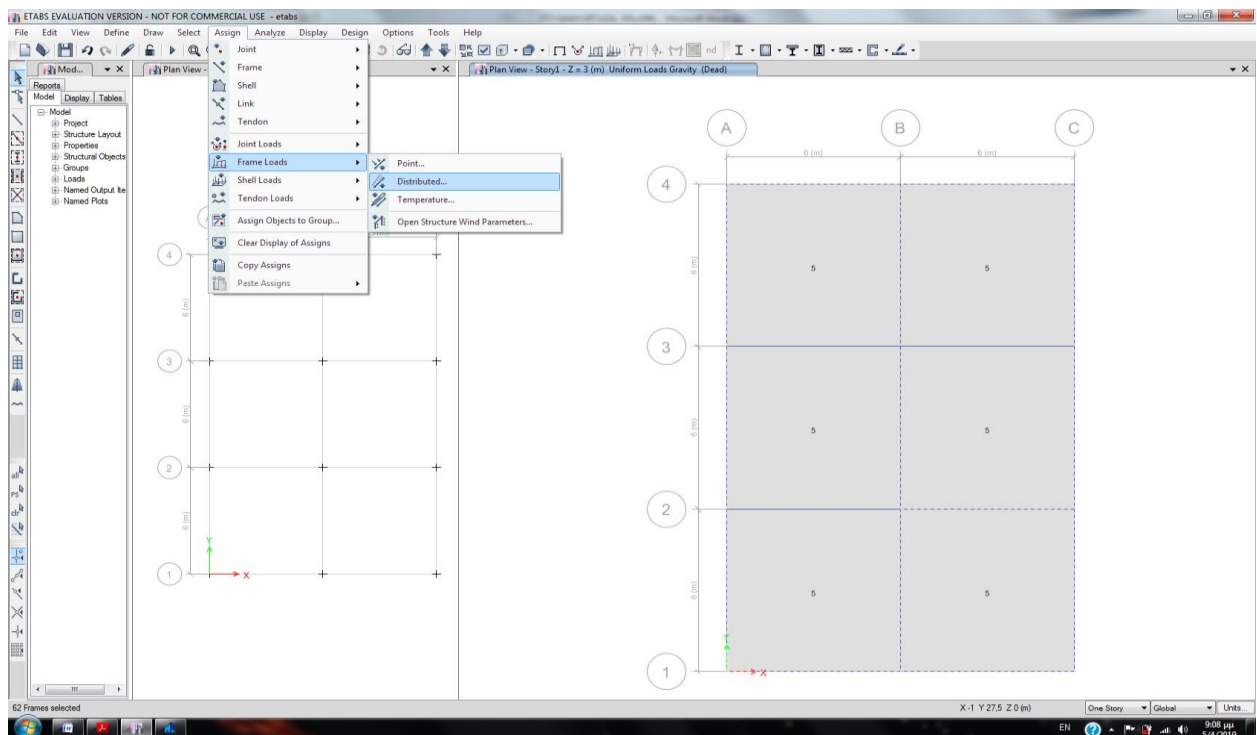
Εικόνα 5.37: Ορισμός του συνδυασμού $1.35g + 1.50q$.

Στην συνέχεια φορτίζουμε την κατασκευή. Επιλέγουμε την πλάκα και δίνουμε κατακόρυφο φορτίο. Με επιλεγμένη την πλάκα που θα δώσουμε το φορτίο πατάμε στο menu Assign – Shell Loads – Uniform. Δίνουμε ένα ομοιόμορφο κατανεμημένο επιφανειακό φορτίο ως μόνιμη φόρτιση. Η διεύθυνση του φορτίου είναι εκείνη της βαρύτητας (Gravity). Επιλέγουμε να αντικαταστήσει πιθανό παλιότερο φορτίο.



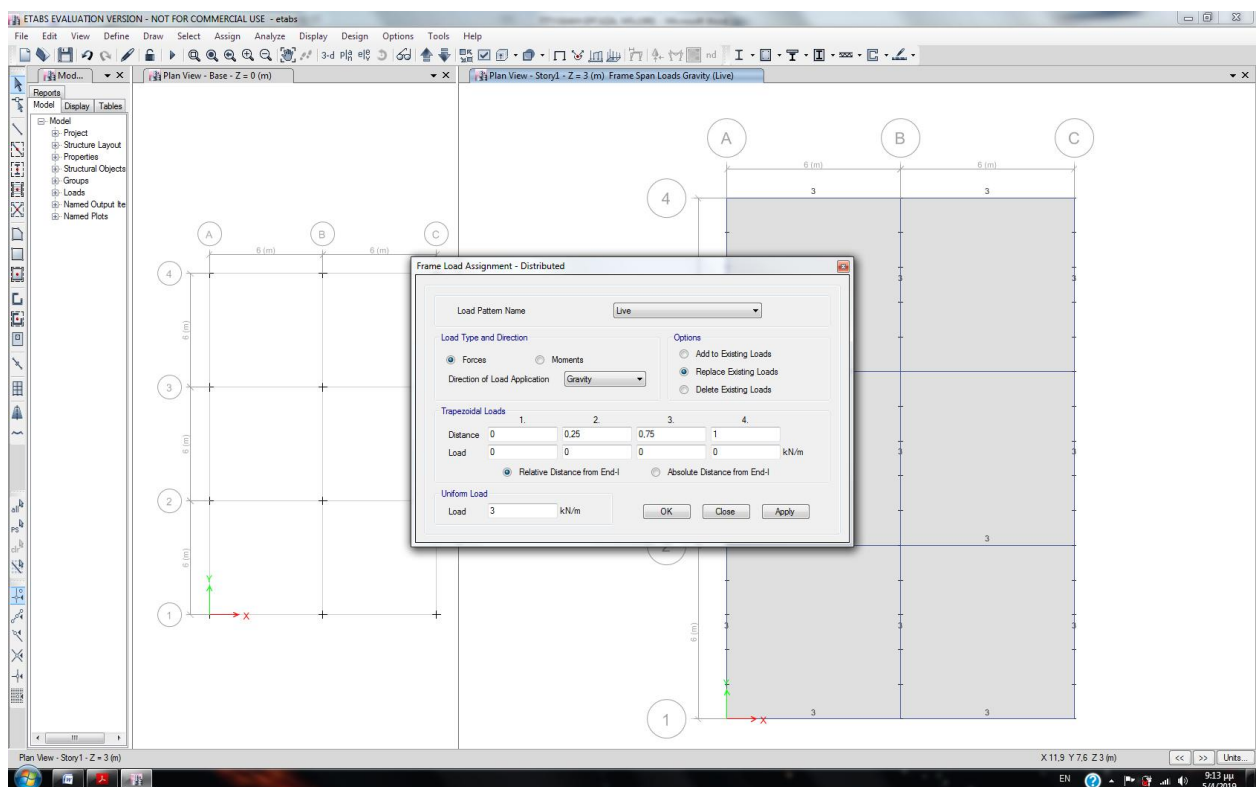
Εικόνα 5.38: Ορισμός φορτίου της πλάκας.

Επιλέγουμε τις δοκούς για να δώσουμε καταναμημένα φορτία στις δοκούς (π.χ. κινητό φόρτιο ομοιόμορφο φορτίο) και πατάμε το menu Assign – Frame Loads – Distributed.



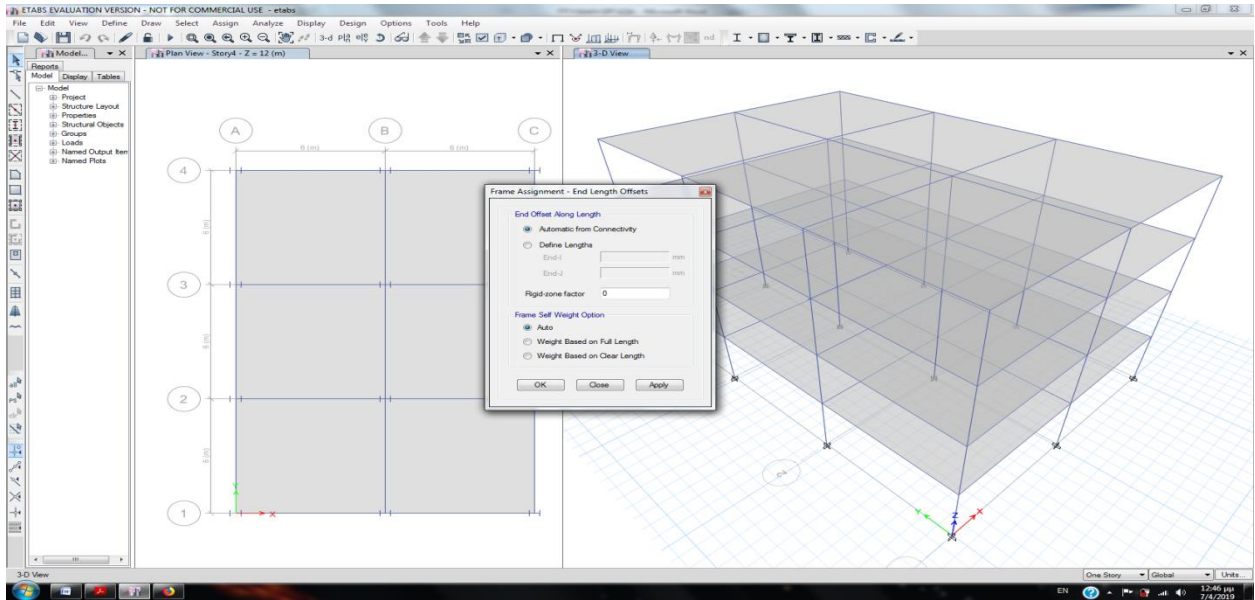
Εικόνα 5.39: Επιλογή καταναμημένου φορτίου στις δοκούς.

Δίνουμε κινητό φορτίο (Live), δύναμη (Force) στην διεύθυνση της βαρύτητας (gravity) και επιλέγουμε ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο (Uniform load) με τιμή 3 kN/m.



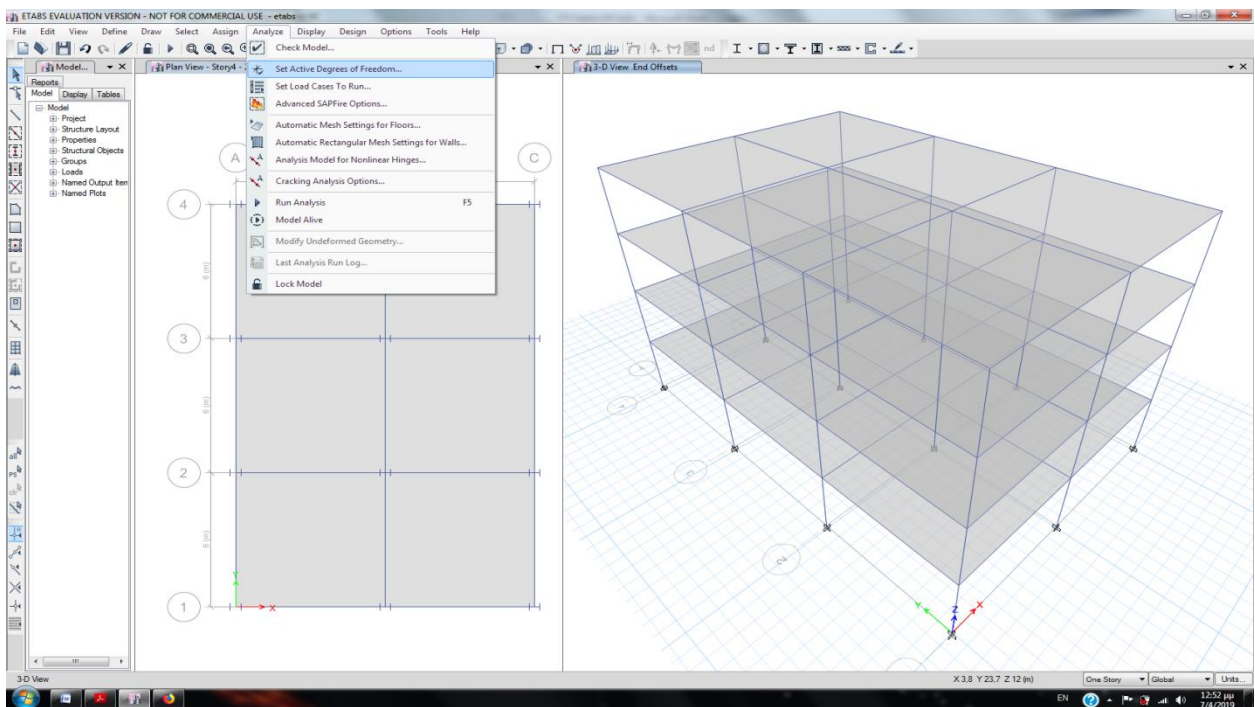
Εικόνα 5.40: Ορισμός καταναμημένου φορτίου γραμμικού στοιχείου.

Στους κόμβους δοκών – υποστυλωμάτων το πρόγραμμα μπορεί να ορίζει μόνο του άκαμπτους στοιχεία. Επιλέγουμε αν θα υπολογίζει μόνο του τους άκαμπτους κόμβους ή αν θα του δώσουμε το μήκος στα δύο άκρα, καθώς και το ποσοστό του κάθε άκρου που θα είναι άκαμπτο (το default είναι 0, δηλαδή όλο το στοιχείο μέσα στον κόμβο είναι εύκαμπτο με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως το υπόλοιπο μέλος).



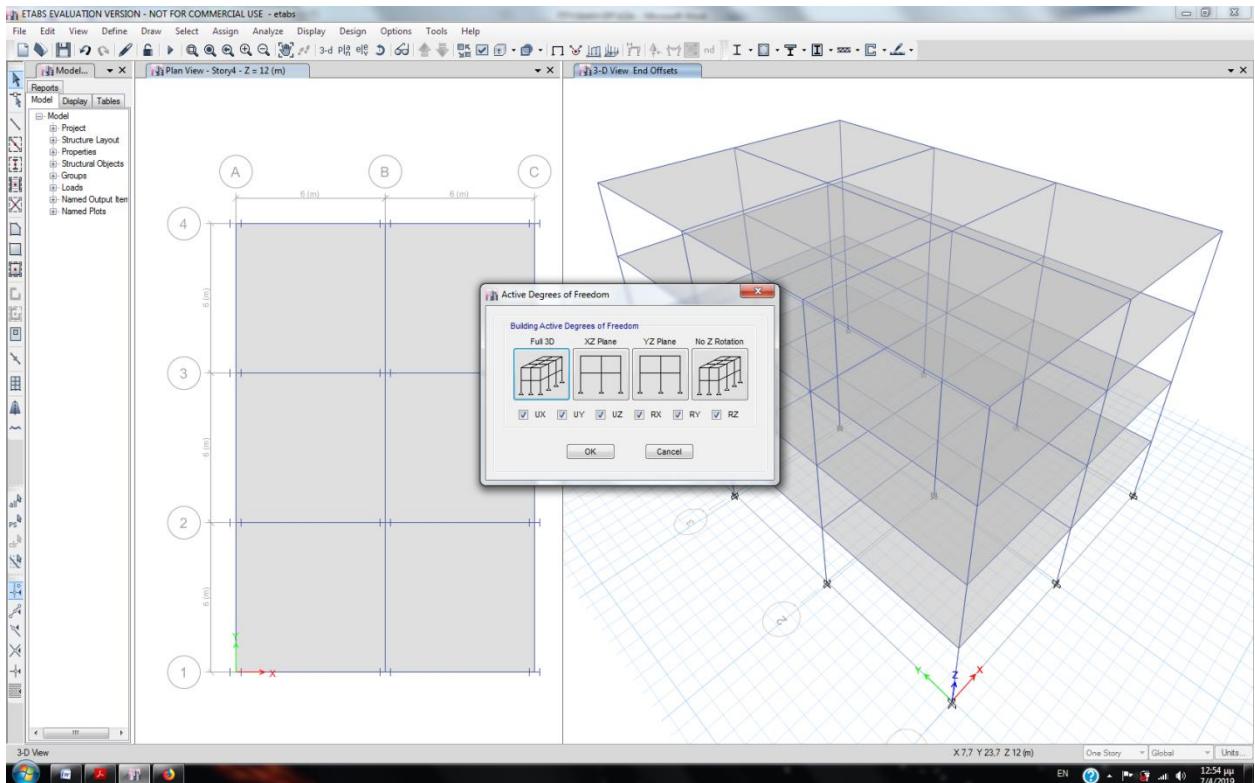
Εικόνα 5.41: Άκαμπτοι κόμβοι - End length offsets.

Επιλέγουμε το menu Analyze για να ορίσουμε τα δεδομένα της ανάλυσης και στην συνέχεια να την πραγματοποιήσουμε.



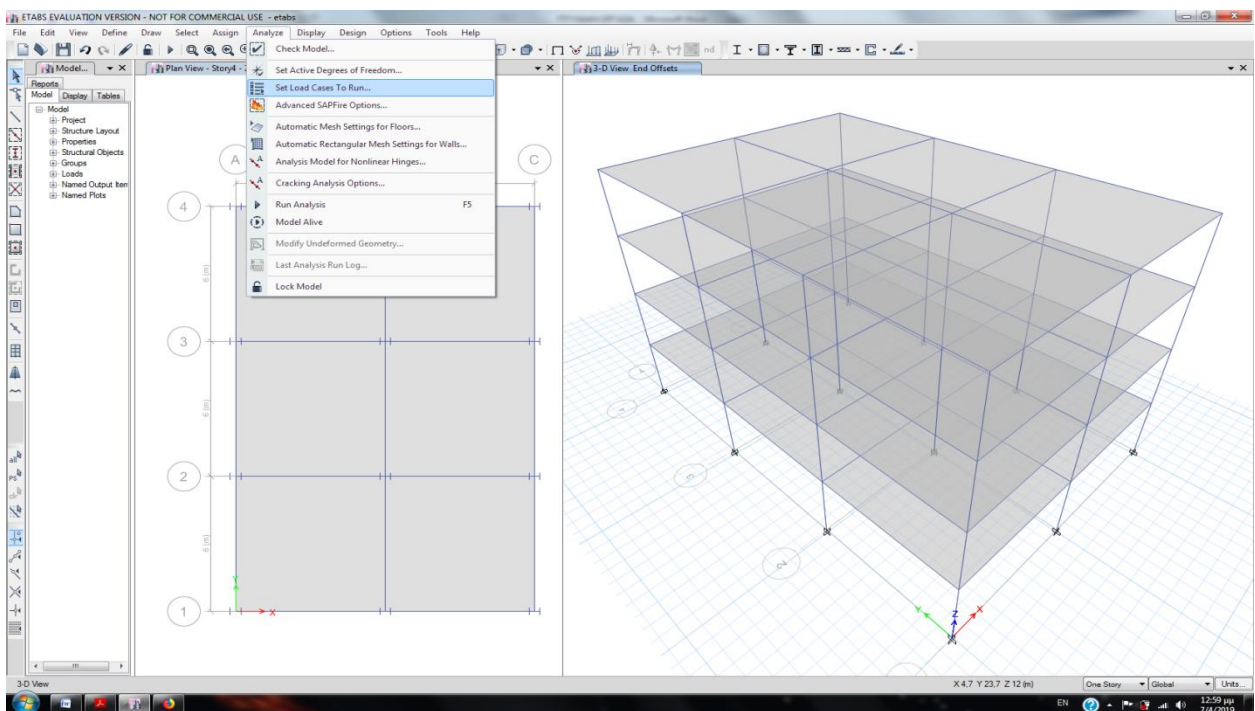
Εικόνα 5.42: Ορισμός ενεργών βαθμών ελευθερίας.

Ενεργοί βαθμοί ελευθερίας. Όλοι αν θέλουμε ανάλυση να γίνει στον χώρο ή επιλέγουμε π.χ. στο επίπεδο. Για ένα επίπεδο πλαίσιο, αν επιλεγεί η ανάλυση στον χώρο θα πρέπει να έχουν επιλεγθεί οι κατάλληλες στηρίξεις.



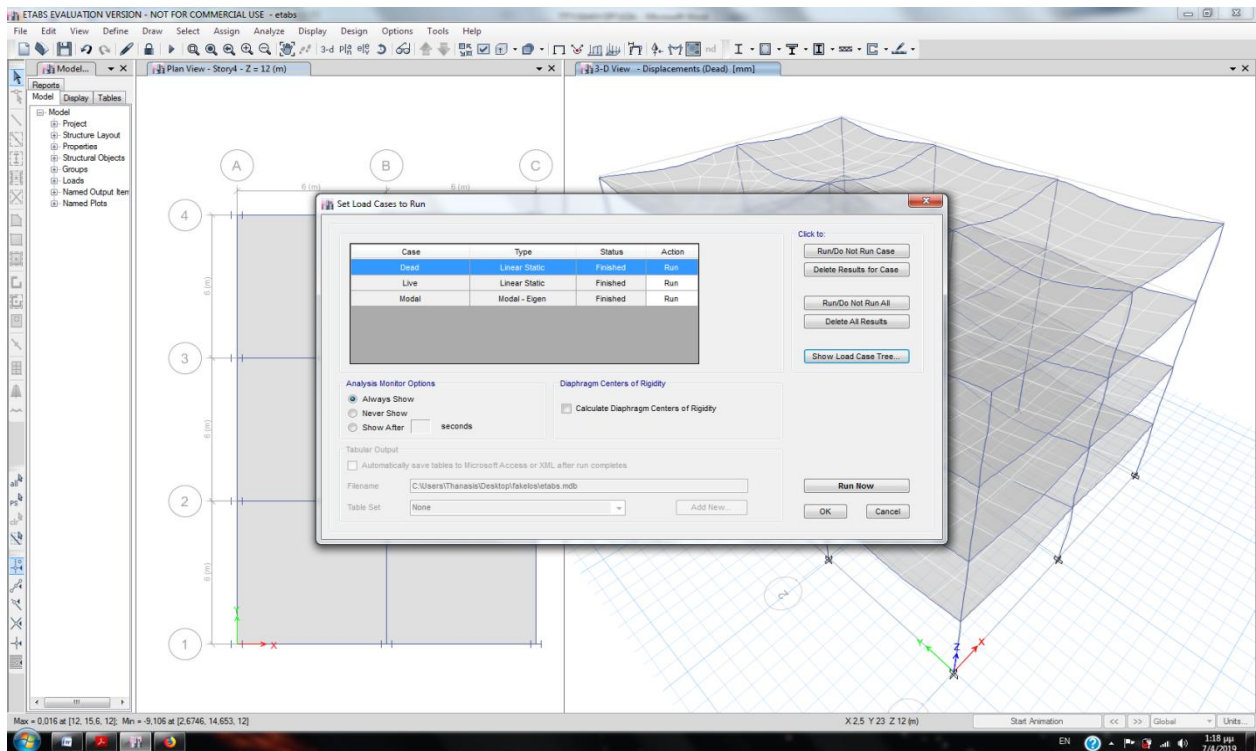
Εικόνα 5.43: Ενεργοί βαθμοί ελευθερίας.

Επιλέγουμε το menu Analyze – Set Load Cases to Run για να επιλέξουμε τι θα τρέξει.



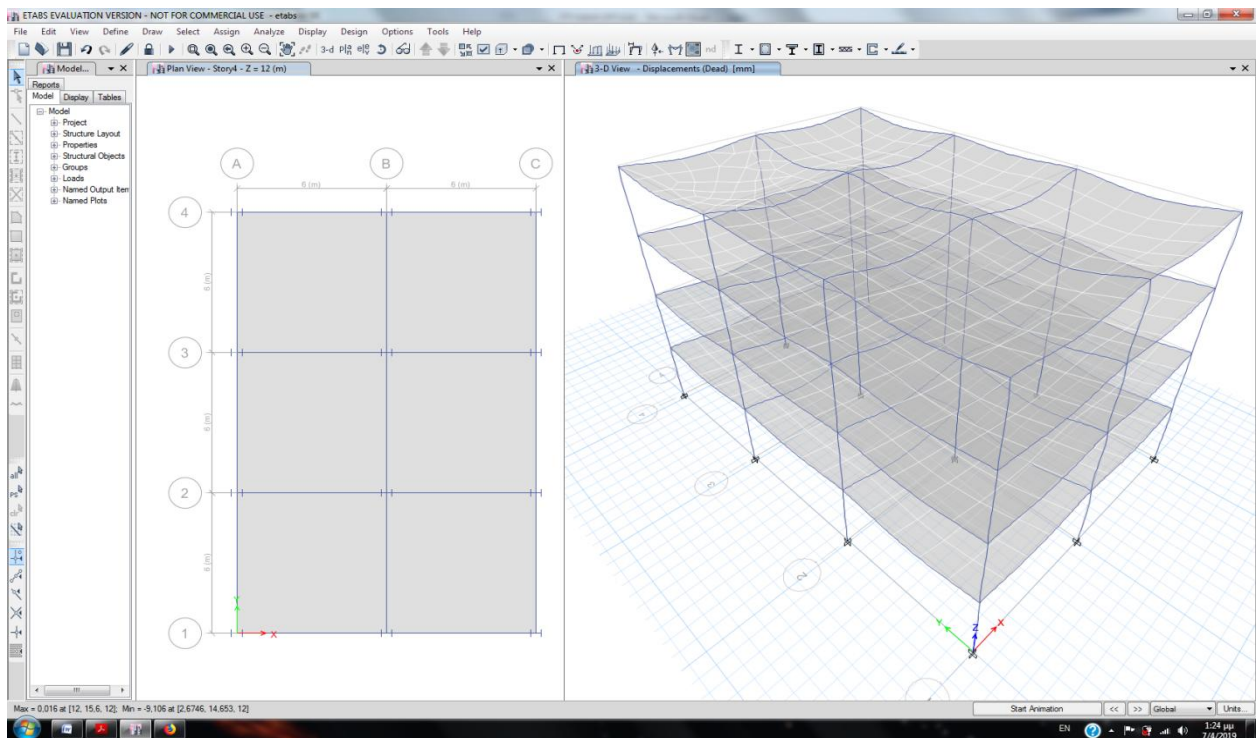
Εικόνα 5.44: Επιλογή περιπτώσεων φόρτισης για να τρέξει στην ανάλυση.

Επιλέγουμε τις φορτίσεις που θέλουμε να τρέξει. Στο “Analysis Monitor Options” επιλέγουμε “Always Show” για να δείχνει μηνύματα καθώς τρέχει την ανάλυση.



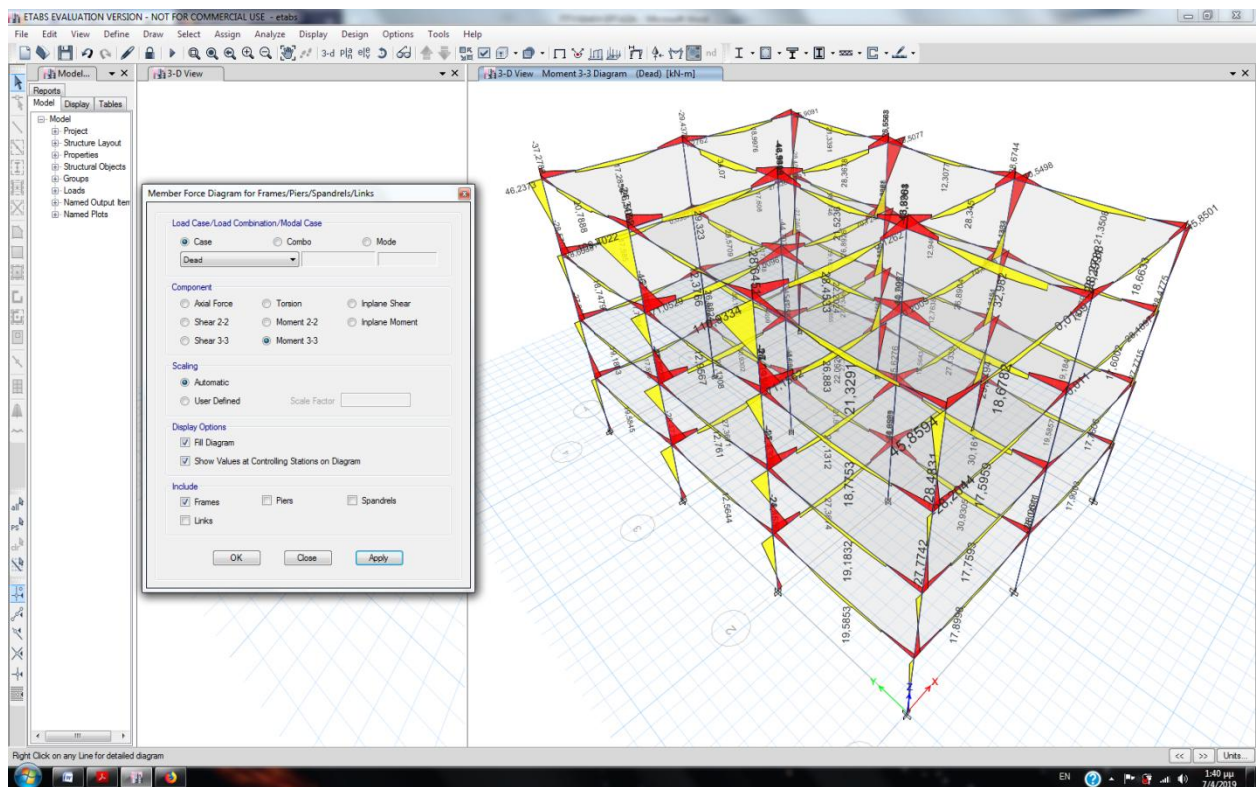
Εικόνα 5.45: Ορισμός περιπτώσεων φορτίσεων για να πραγματοποιήσει την ανάλυση.

Για να τρέξει η ανάλυση πατάμε Run Analysis ή F5 ή το κουμπάκι 



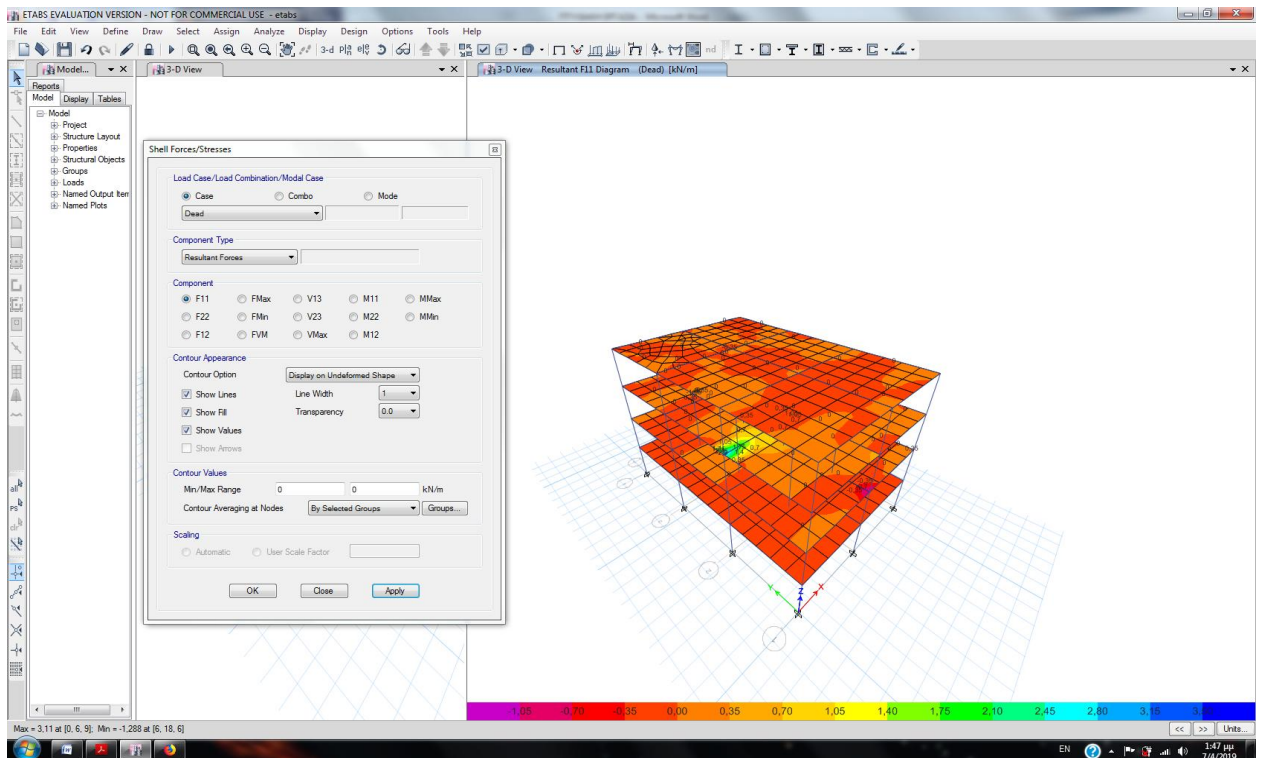
Εικόνα 5.46: Αποτελέσματα ανάλυσης – παραμορφωμένος φορέας από τα μόνιμα φορτία.

Επιλέγουμε το “Show Values at Controlling Stations on Diagram” για να δείχνει τιμές στα διαγράμματα.



Εικόνα 5.47: Διάγραμμα ροπών περι τον τοπικό άξονα 3 της διατομής των στοιχείων.

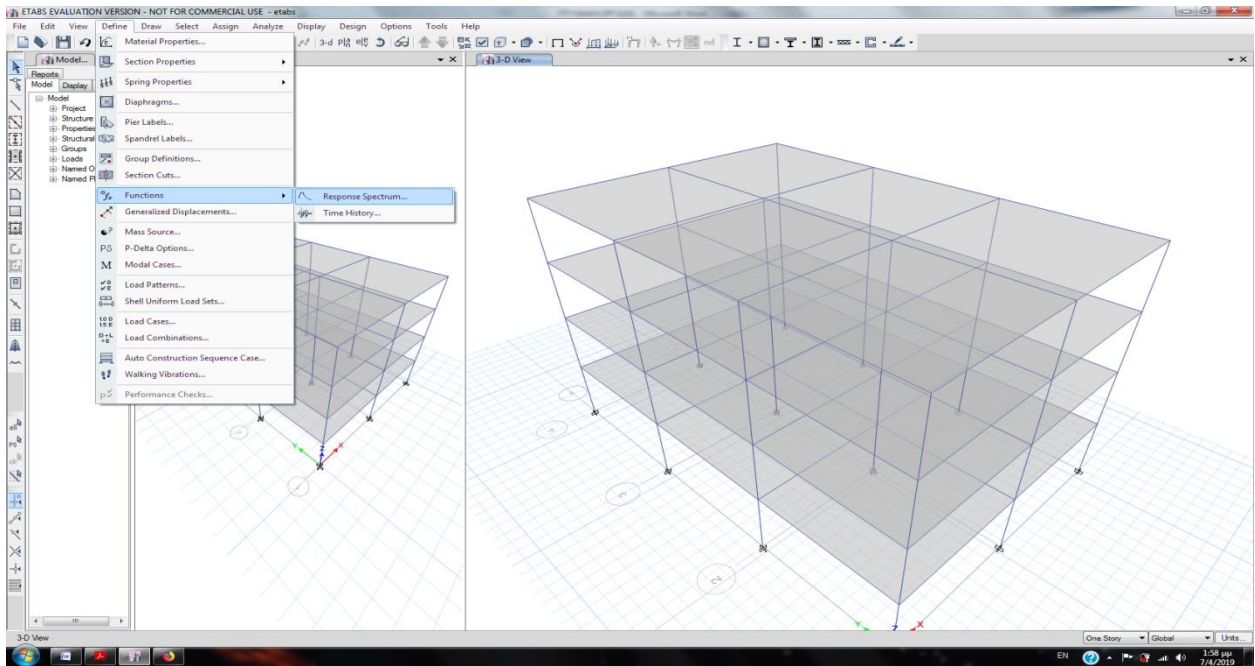
Στην συνέχεια εμφανίζονται τα διαγράμματα όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 5.48: Διάγραμμα ροπών στην πλάκα από τα μόνιμα φορτία.

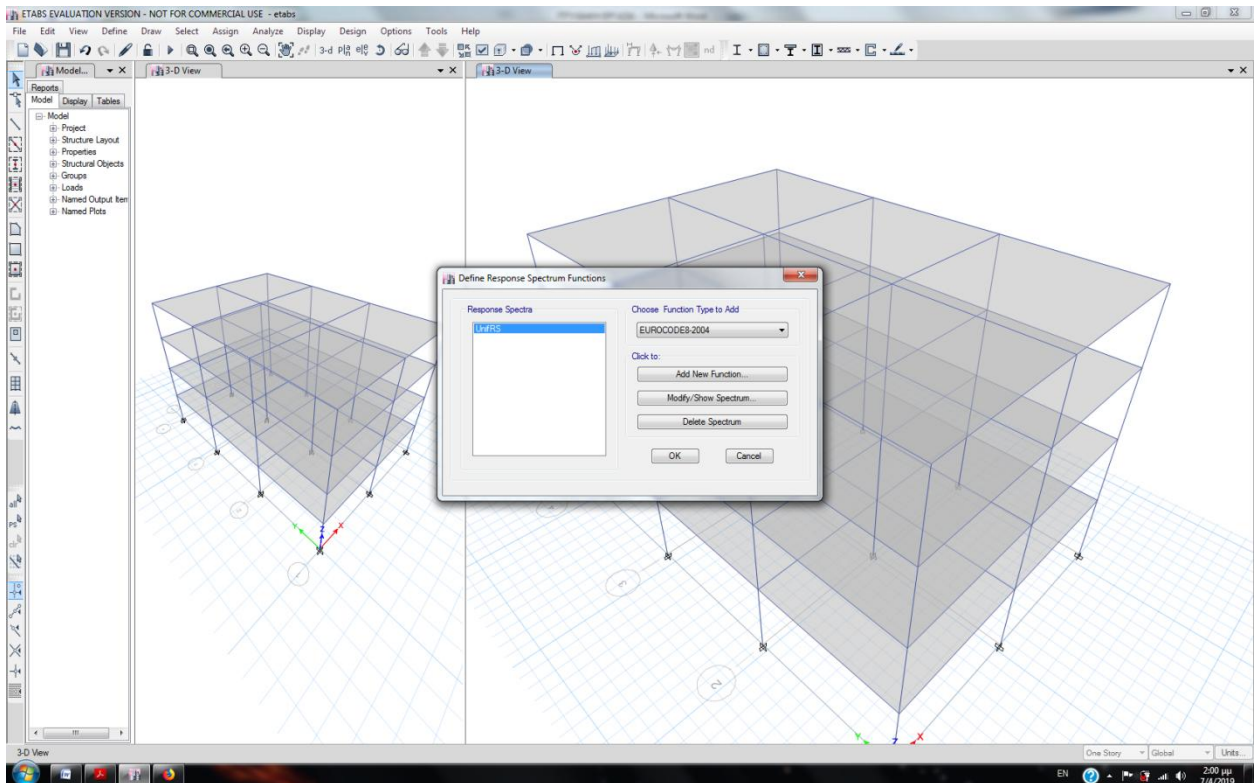
5.3 Ιδιομορφική φασματική ανάλυση

Εισαγωγή φάσματος απόκρισης. (Define – Functions – Response Spectrum).



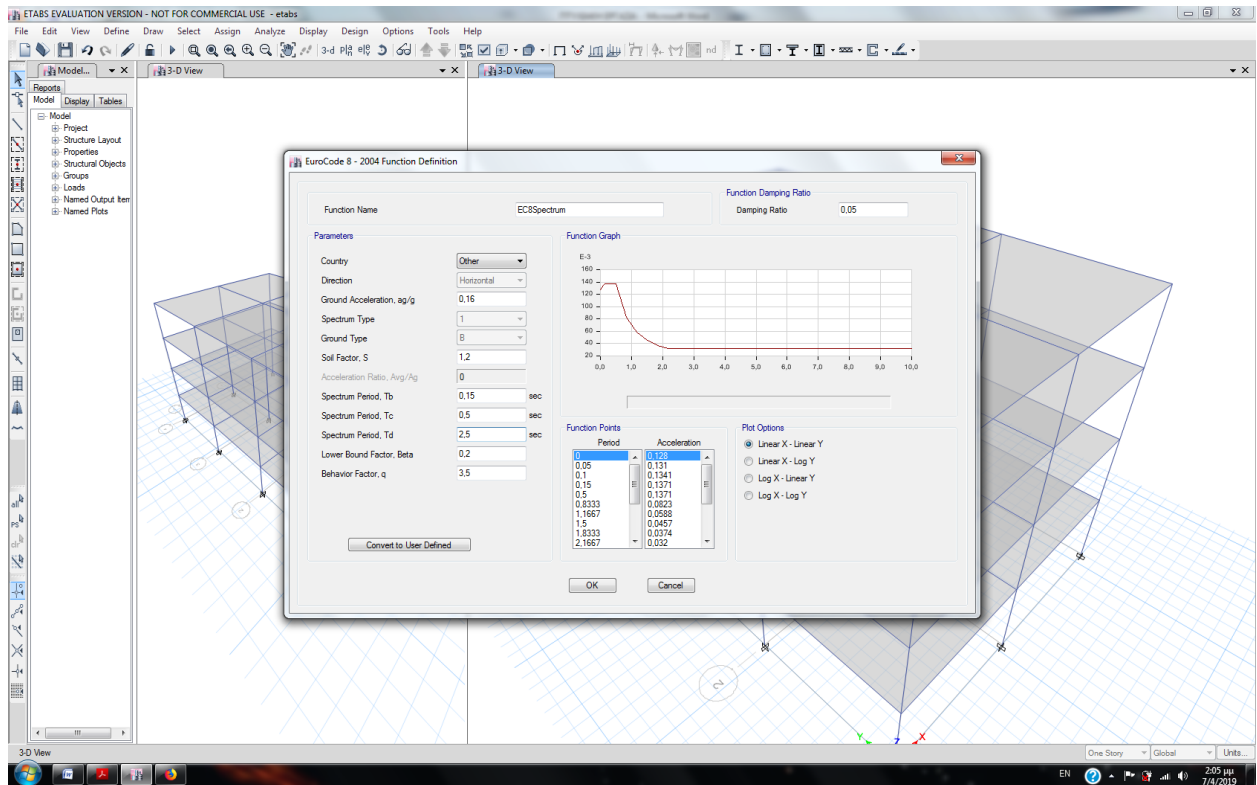
Εικόνα 5.49: Εισαγωγή φάσματος απόκρισης.

Επιλέγουμε το φάσμα του Ευρωκώδικα (Eurocode 8-2004) και δίνουμε τις κατάλληλες τιμές.



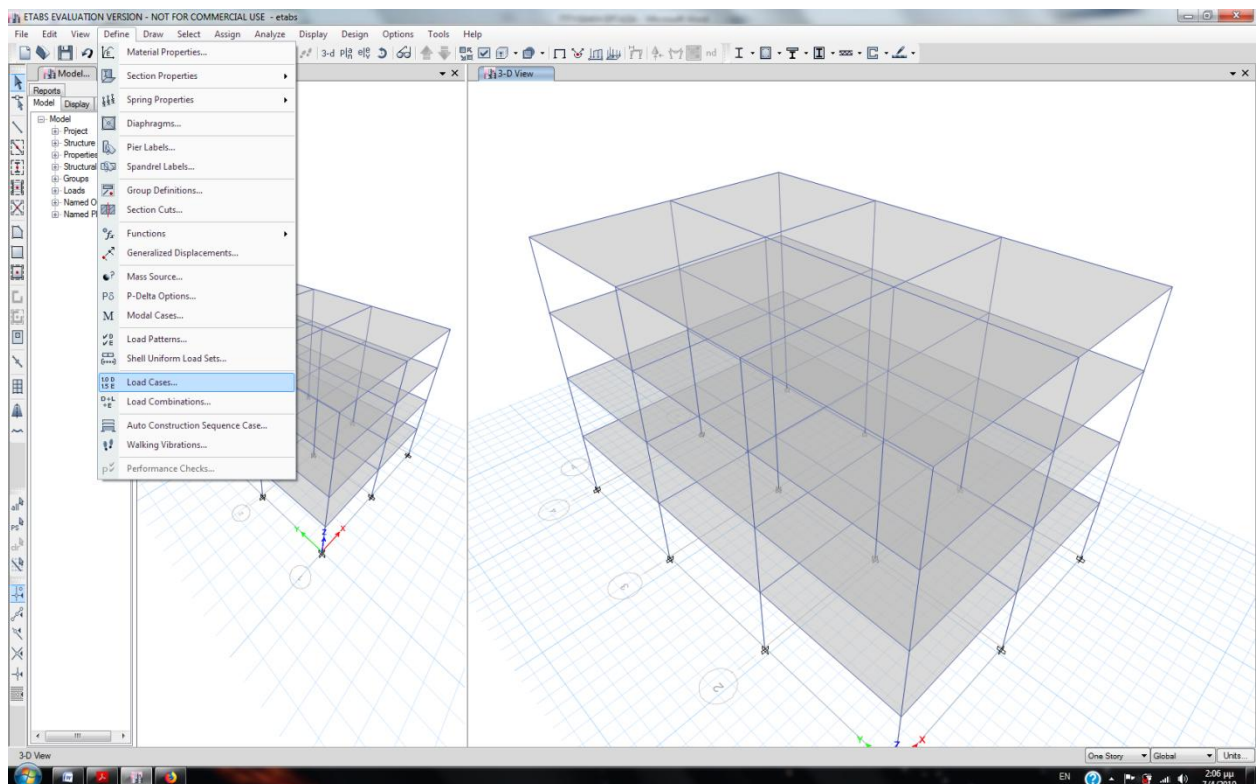
Εικόνα 5.50: Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8.

Πρέπει να ορισθεί το φάσμα σχεδιασμού για να γίνει δυναμική φασματική ανάλυση.



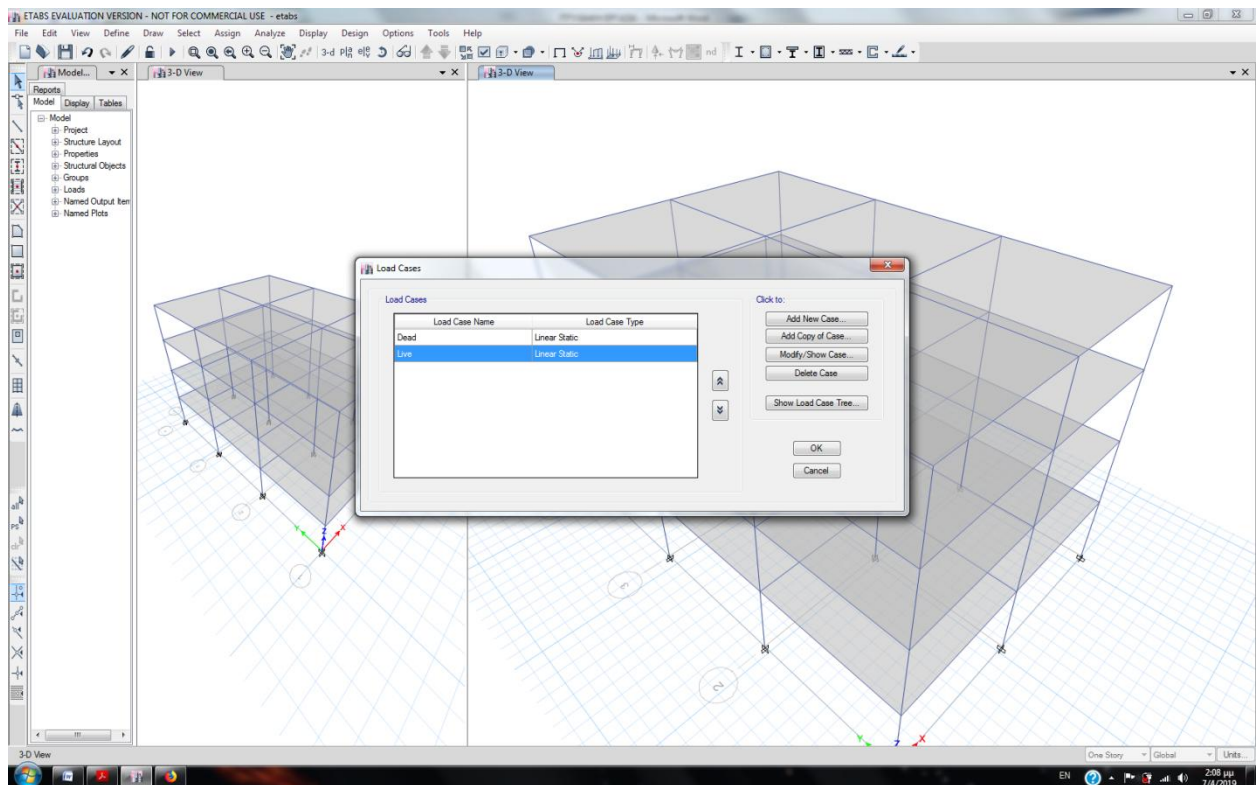
Εικόνα 5.51: Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8.

Στην συνέχεια πρέπει να ορισθεί ένα load case (Define – Load case).

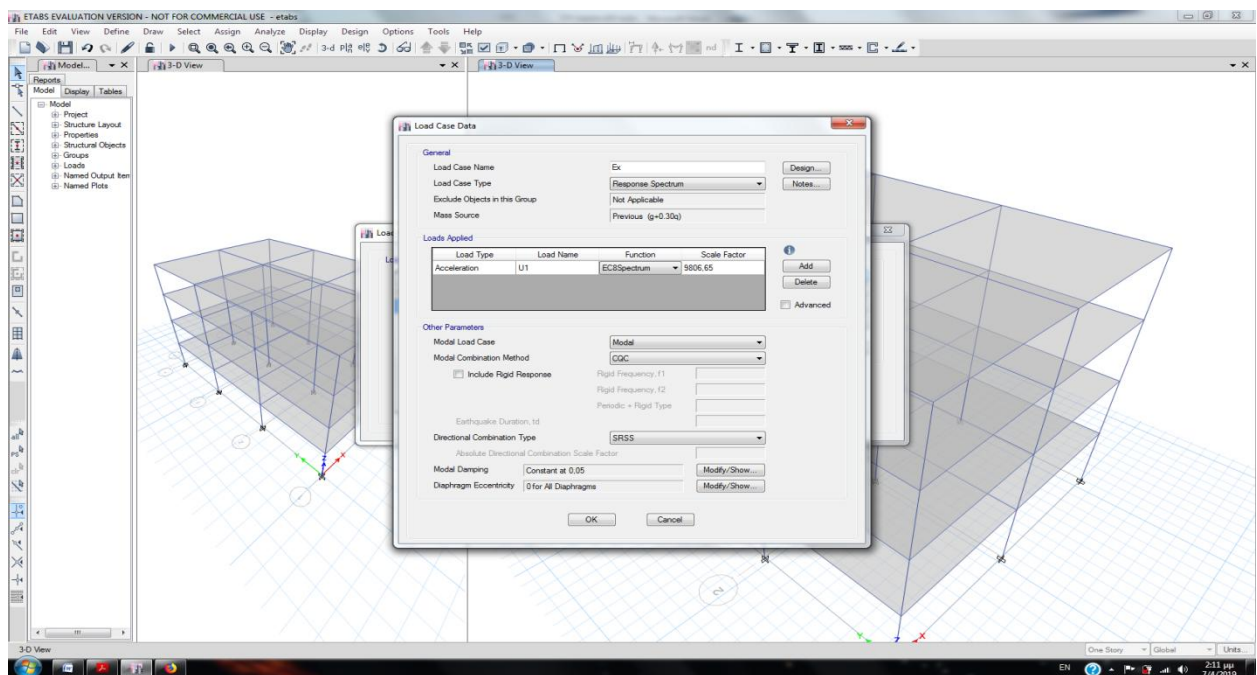


Εικόνα 5.52: Ορισμός load case.

Πατάμε “Add New Case” για να ορισθεί νέο Load Case.



Εικόνα 5.53: Ορισμός νέου load case.



Εικόνα 5.54: Νέο load case για δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση X.

Ονομάζουμε το νέο load case και επιλέγουμε τύπο “Response Spectrum”. Από κάτω πατάμε Add για να προσθέσουμε την φόρτιση. Επιλέγουμε:

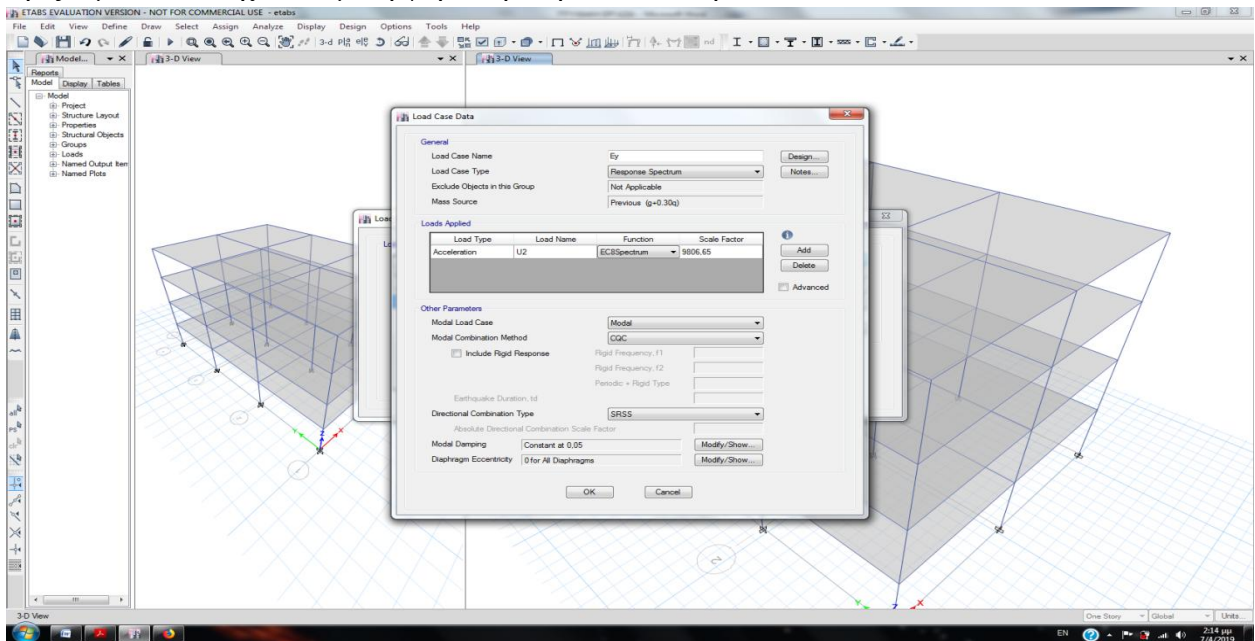
Load Type = “Acceleration”,

Load Name = U1 για σεισμό στην διεύθυνση X ή U2 για την διεύθυνση Y,

Function επιλέγουμε το φάσμα που είχαμε ορίσει νωρίτερα και

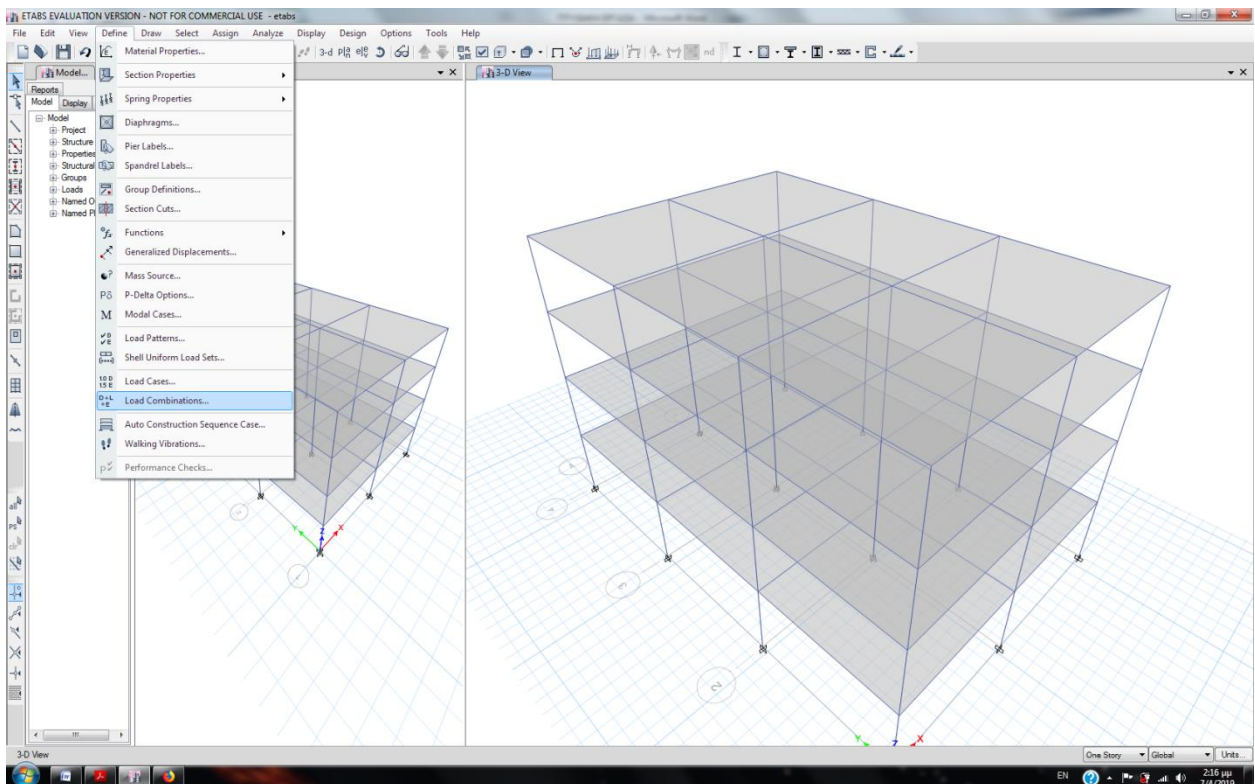
Scale Factor = 9806.65 ώστε να μετατρέψει το φάσμα που είναι σε g σε mm/s² που είναι οι μονάδες επιτάχυνσης που έχει το πρόγραμμα. Αν οι μονάδες έχουν αλλάξει στο πρόγραμμα στο Options – Display Units τότε δίνεται ο κατάλληλος συντελεστής.

Ορίζουμε αντίστοιχα σεισμική φόρτιση στην διεύθυνση Y.



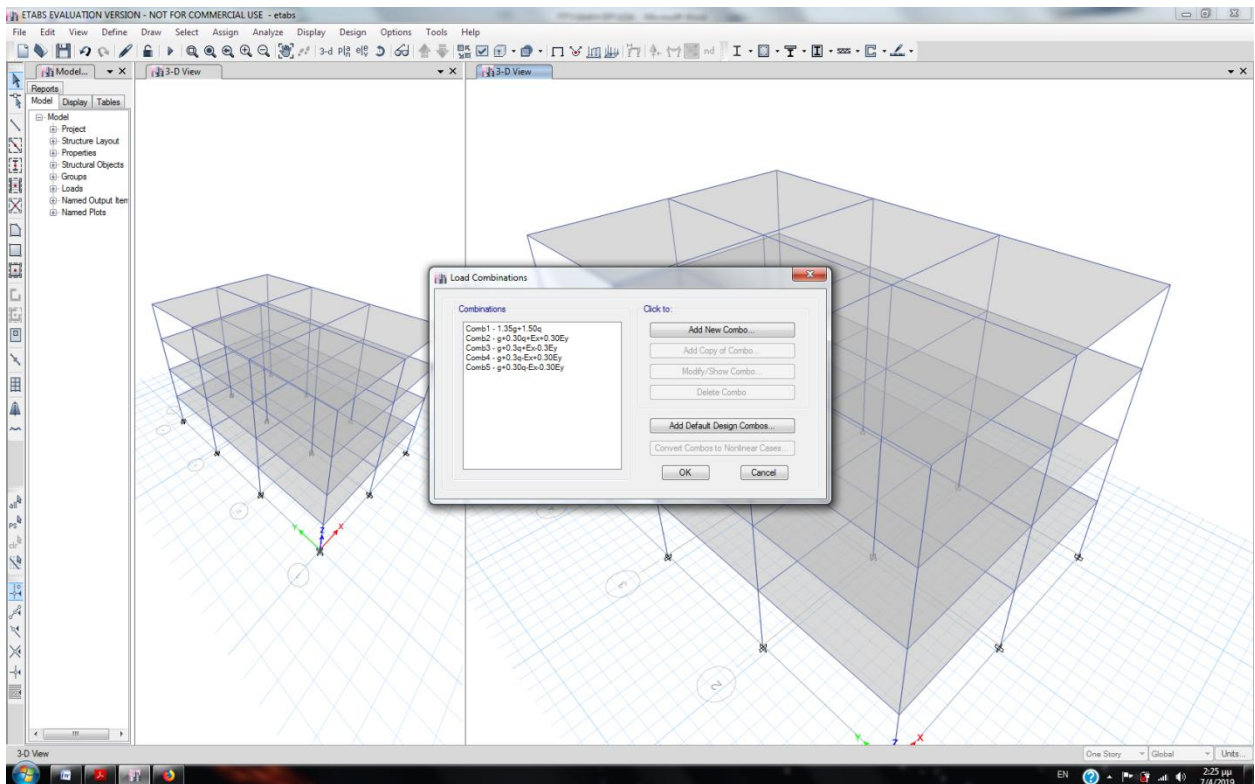
Εικόνα 5.55: Νέο load case για δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση Y.

Στην συνέχεια φτιάχνουμε τους κατάλληλους συνδυασμούς φορτίσεων.

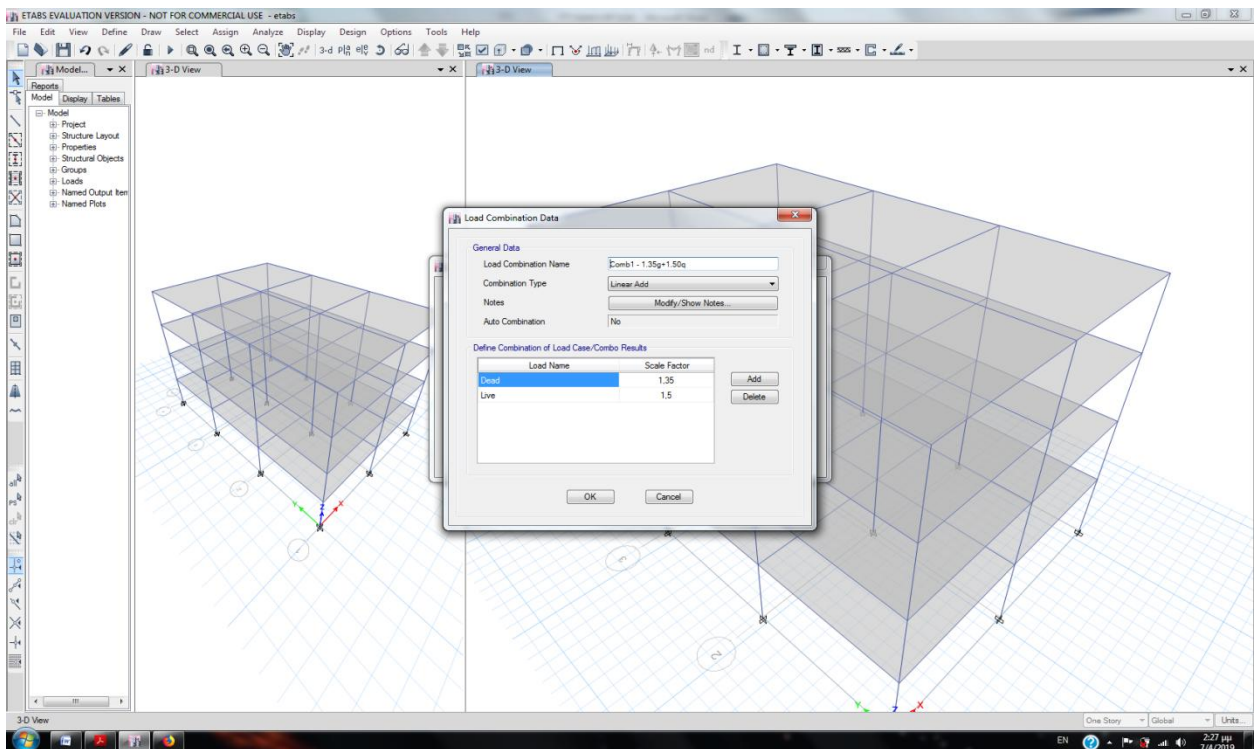


Εικόνα 5.56: Ορισμός συνδυασμών φορτίσεων.

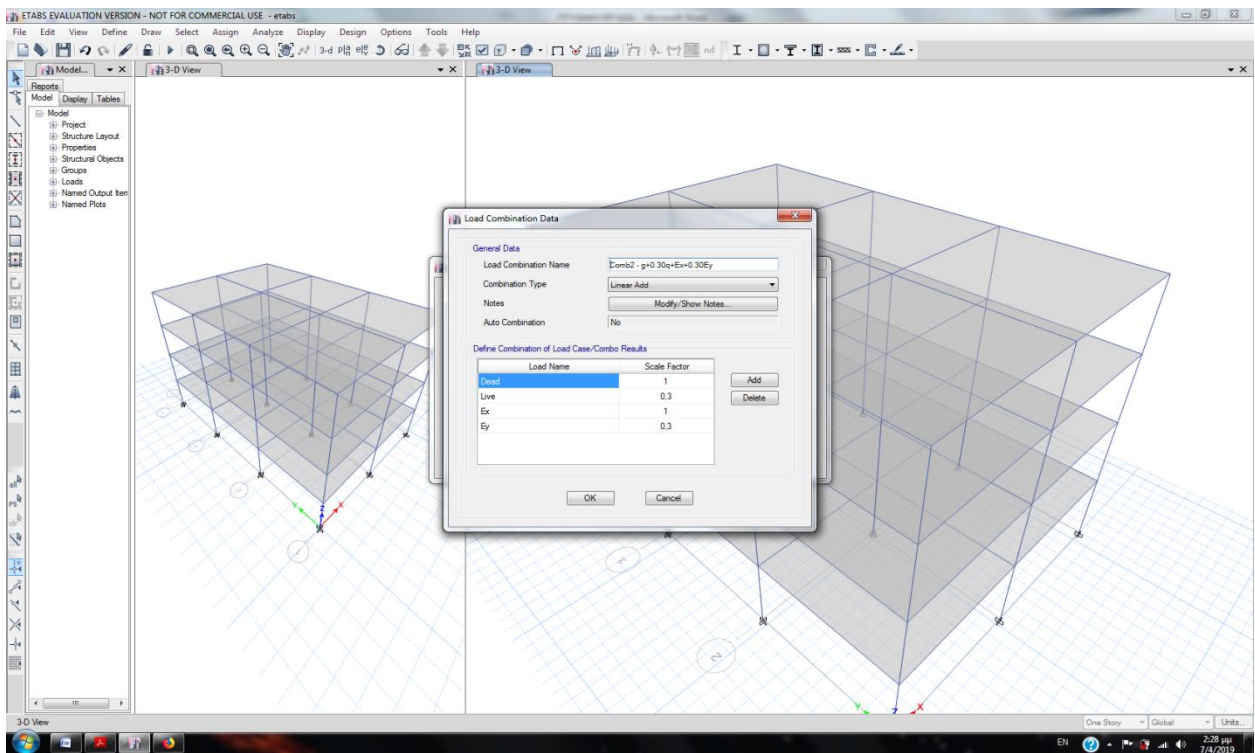
Στο παράθυρο που ανοίγει πατάμε “Add New Combo...” για να ορίσουμε νέο συνδυασμό φορτίσεων. Φτιάχνουμε τον βασικό συνδυασμό και τους σεισμικούς συνδυασμούς.



Εικόνα 5.57: Συνδυασμοί φορτίσεων.



Εικόνα 5.58: Βασικός συνδυασμός φορτίσεων.



Εικόνα 5.59: Σεισμικός συνδυασμός.

Στην συνέχεια τρέχουμε την ανάλυση για να πάρουμε αποτελέσματα.

Πρέπει να ελεγχθεί:

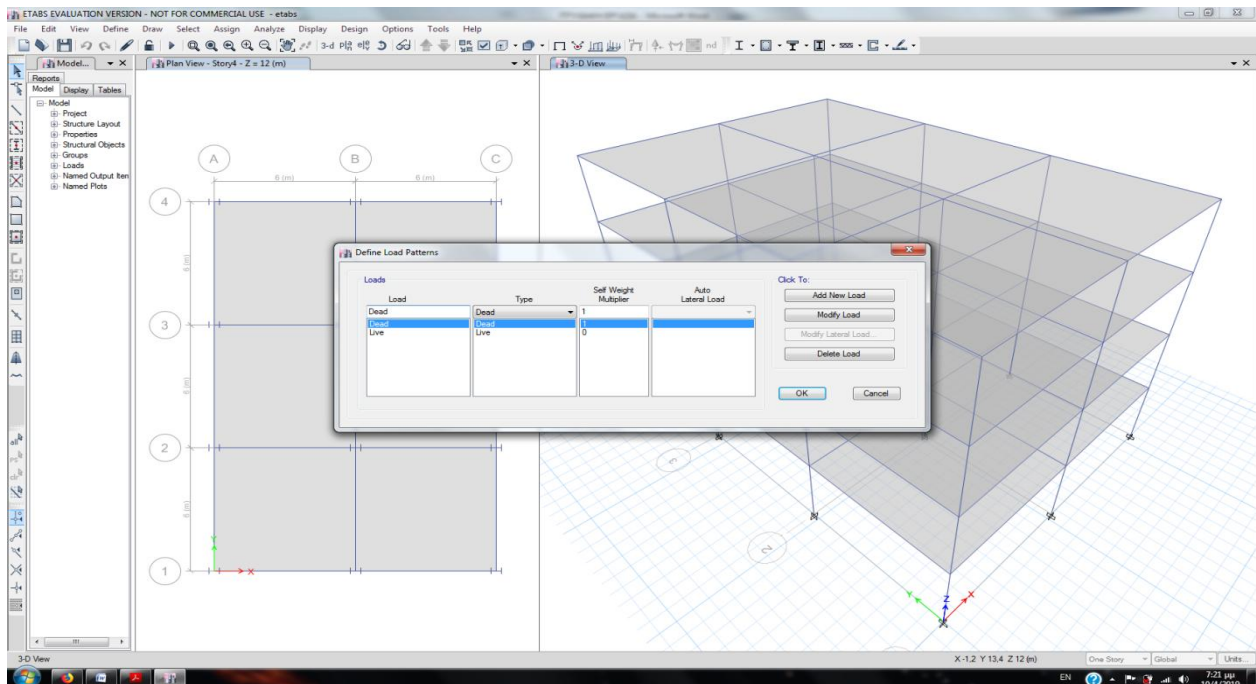
- το άθροισμα των δρώσων ιδιομορφικών μαζών για τις ιδιομορφές που λαμβάνονται υπ' όψιν είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής μάζας του φορέα.
- Λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι ιδιομορφές με δρώσες ιδιομορφικές μάζες μεγαλύτερες από το 5% της συνολικής μάζας.

Με τις ροπές που θα προκύψουν από την ανάλυση θα γίνει η διαστασιολόγηση των μελών.

5.4 Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης

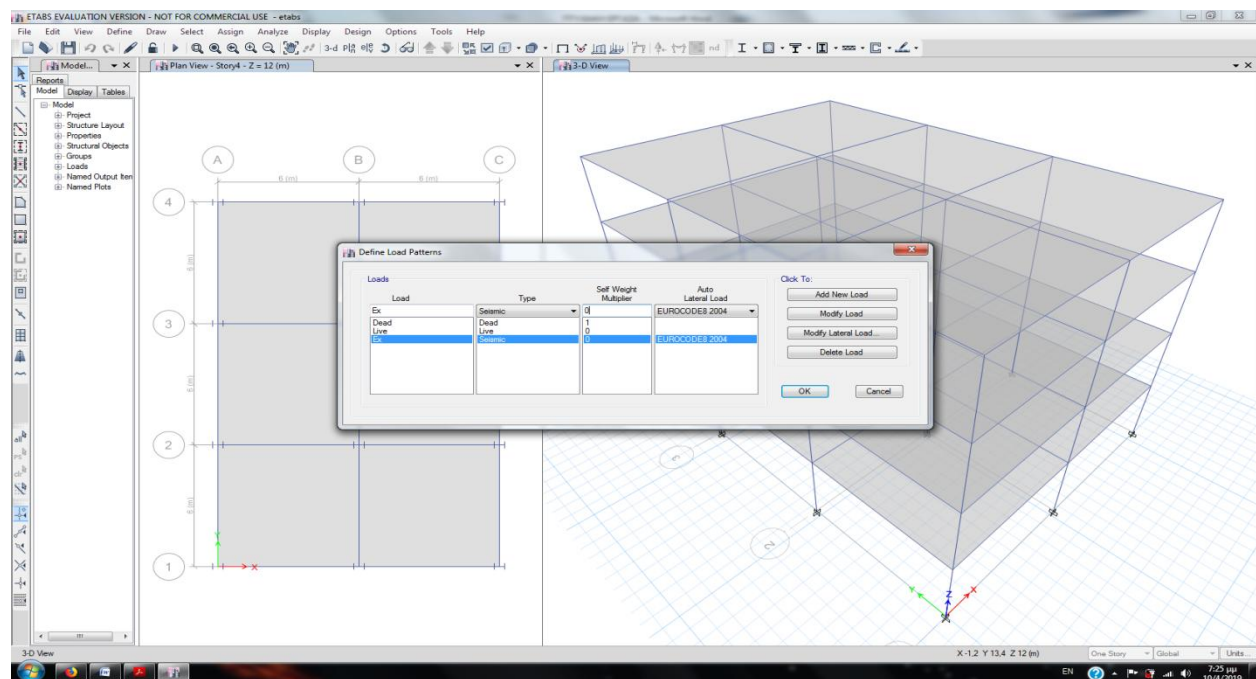
Αρχικά πρέπει να ορισθεί μια σεισμική φόρτιση στο Load Patterns.

Εισαγωγή Load Pattern. (Define – Load Patterns)



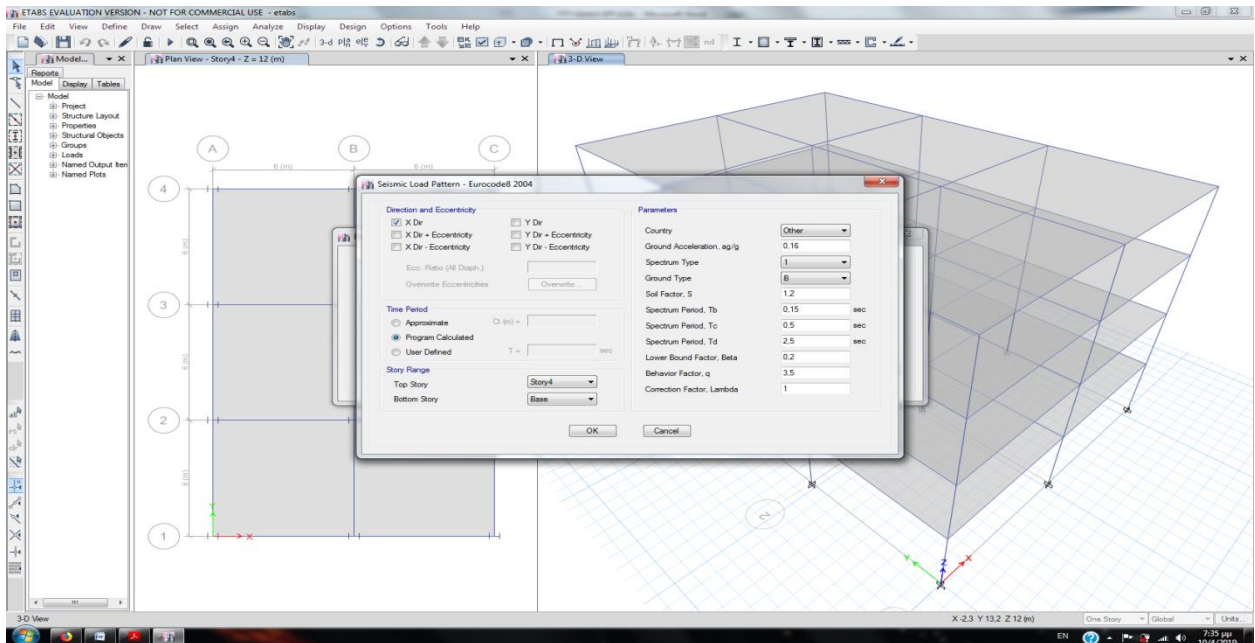
Εικόνα 5.60: Ορισμός νέου Load Pattern.

Στο παράθυρο με τα Load Patterns δίνουμε μια νέα ονομασία (π.χ. Load = Ex) και επιλέγουμε τύπο Type = Seismic. Το self weight multiplier είναι 0 γιατί το ίδιο βάρος το συμπεριλαμβάνει στα μόνιμα (dead). Στο Auto Lateral Load επιλέγουμε τον Ευρωκώδικα 8, ώστε να φτιάξει αυτόματα τα πλευρικά σεισμικά φορτία σύμφωνα με τον κανονισμό.



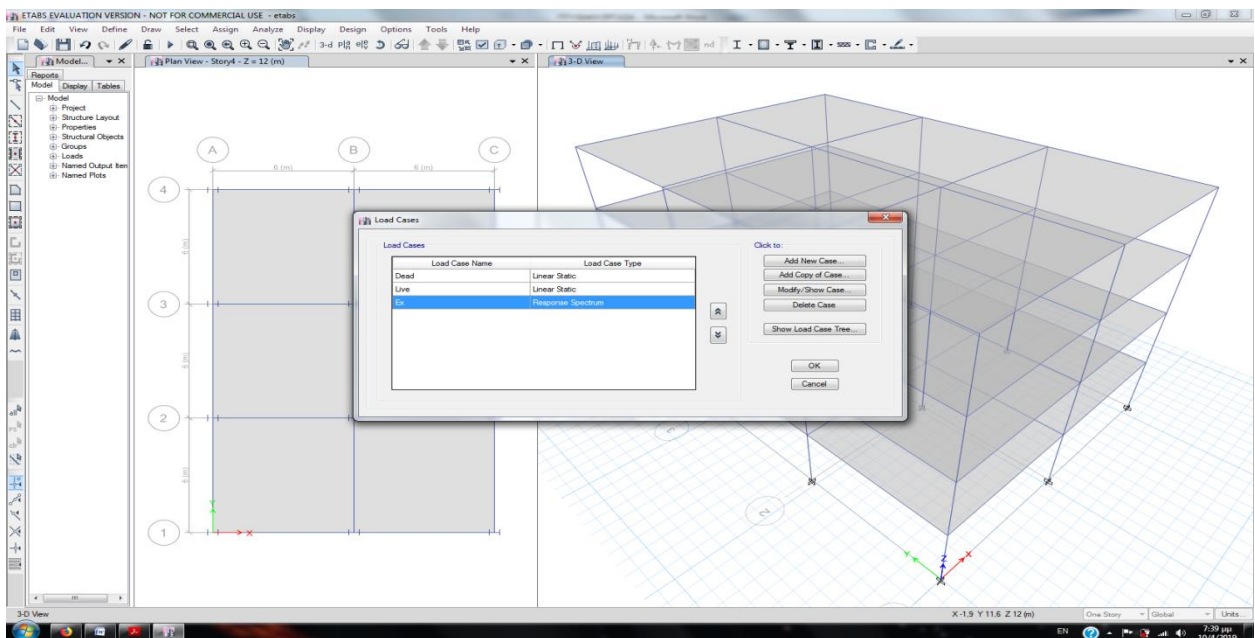
Εικόνα 5.61: Ορισμός νέου Load Pattern.

Στην συνέχεια πατάμε “Add New Load” για να προσθέσει την φόρτιση που φτιάξαμε. Προσοχή, αν πατηθεί Modify Lateral Load αντί για Add New Load, τότε θα μετατρέψει την φόρτιση Dead σε Ex. Απαιτείται προσοχή μην σβηστεί η φόρτιση Dead που έχει το πρόγραμμα από την αρχή. Αφου δημιουργηθεί το νέο Load Pattern, το επιλέγουμε από κάτω και πατάμε “Modify Lateral Load” για να δώσουμε το φάσμα σχεδιασμού.



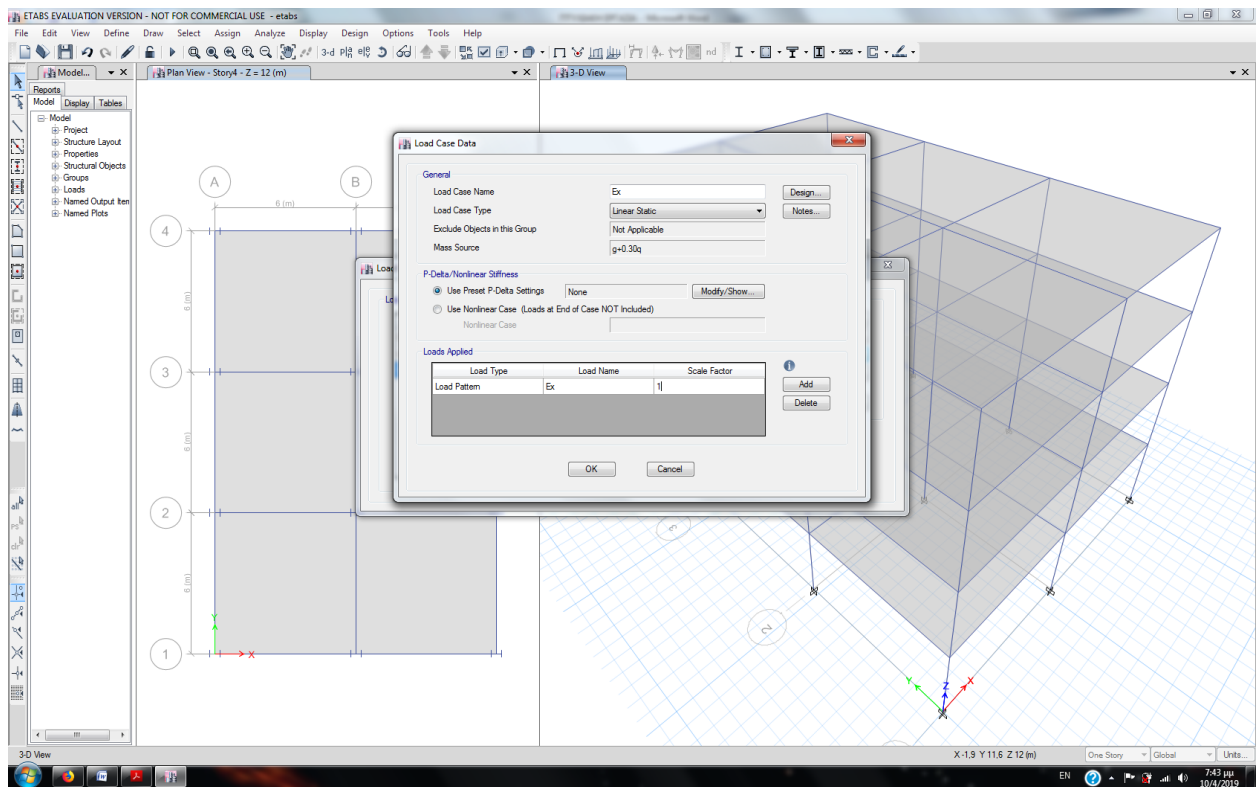
Εικόνα 5.62: Τροποποίηση του σεισμικού Load Pattern.

Το πρόγραμμα φτιάχνει αυτομάτως ένα Load Case (Define – Load Cases)



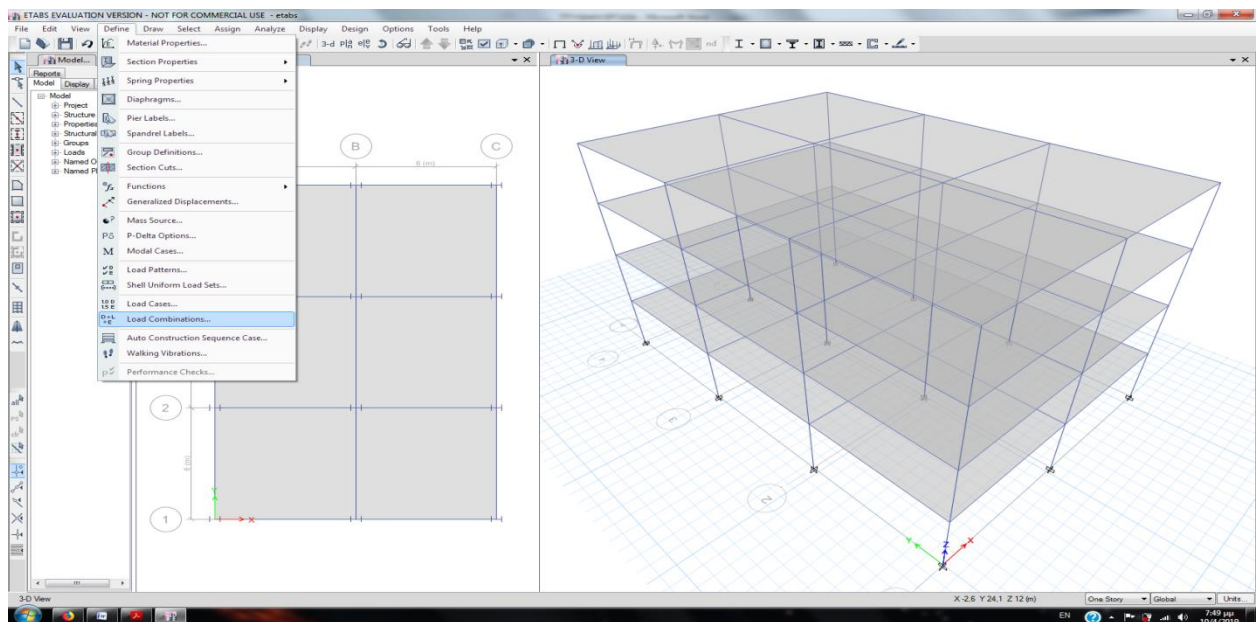
Εικόνα 5.63: Load Cases.

Αν πατήσουμε Modify/Show Case βλέπουμε ότι χρησιμοποιεί το Load Pattern Ex που φτιάξαμε προηγουμένως. Το πρόγραμμα θα κατανείμει την σεισμική τέμνουσα βάσης στους ορόφους σύμφωνα με τον τύπο του Ευρωκώδικα 8, στην παράγραφο 4.3.3.2.3.

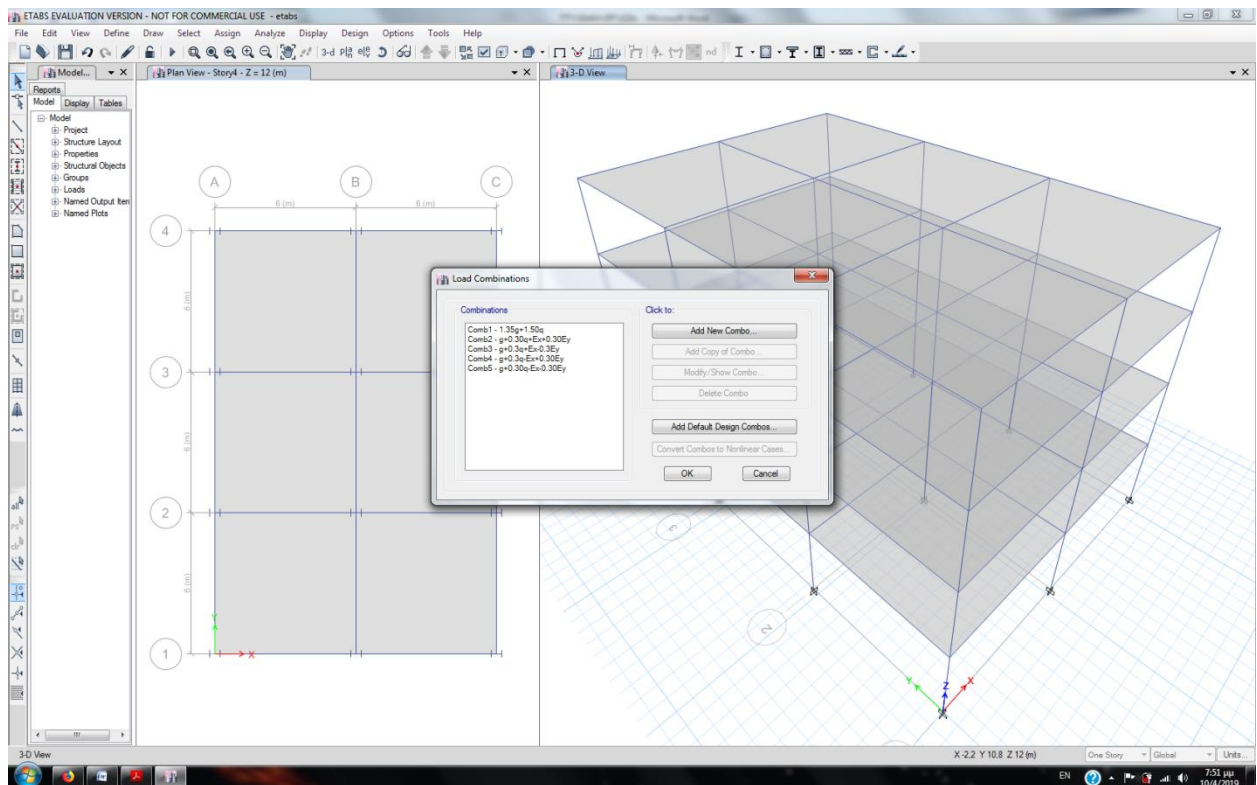


Εικόνα 5.64: Load Case Data Ex.

Ορίζουμε αντίστοιχα σεισμική φόρτιση στην διεύθυνση Y στα Load Patterns. Στην συνέχεια φτιάχνουμε τους κατάλληλους συνδυασμούς φορτίσεων.



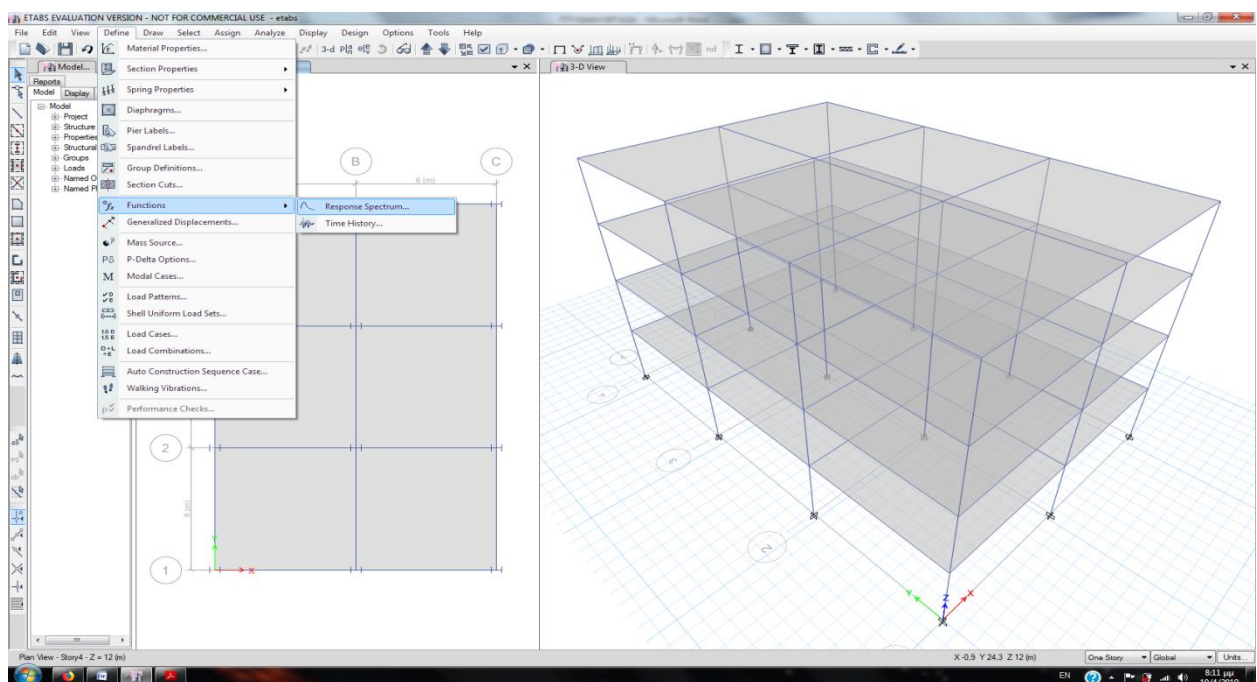
Εικόνα 5.65: Ορισμός συνδυασμών φορτίσεων.



Εικόνα 5.66: Συνδυασμοί φορτίσεων.

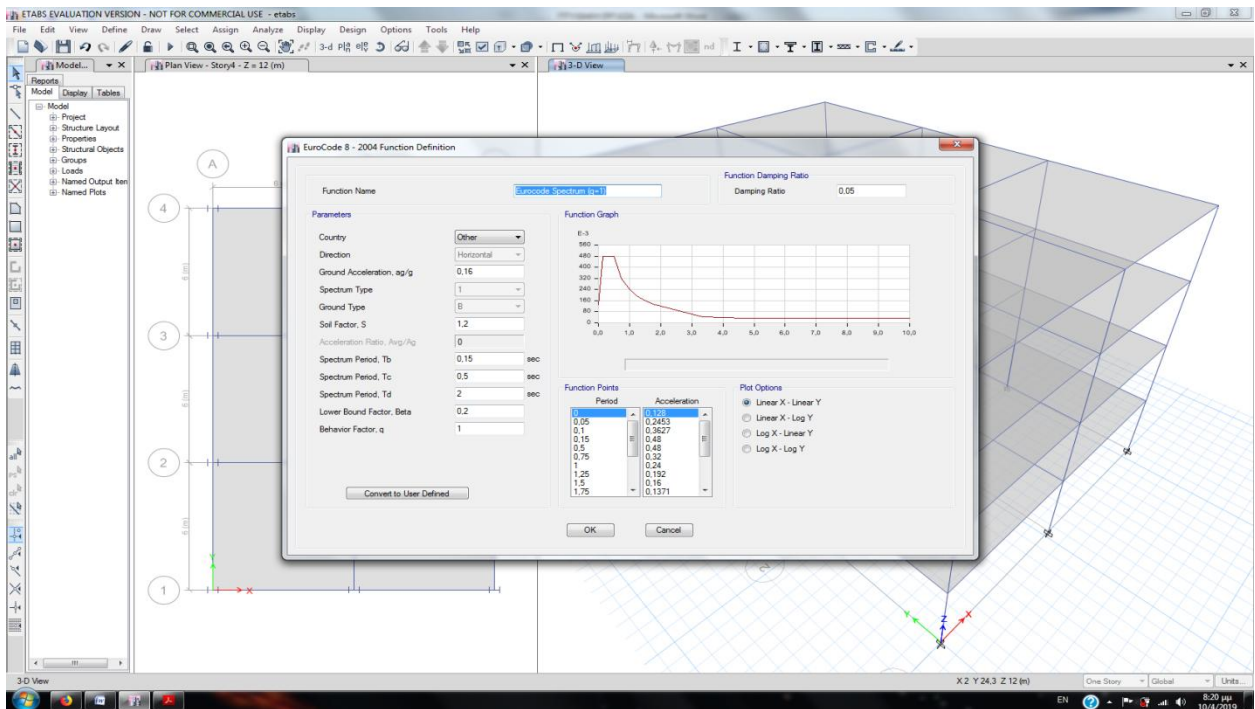
Στην συνέχεια τρέχουμε την ανάλυση για να πάρουμε αποτελέσματα.
 Με τις ροπές που θα προκύψουν από την ανάλυση θα γίνει η διαστασιολόγηση των μελών.

Δυναμική φασματική ανάλυση Εισαγωγή φάσματος απόκρισης. (Define – Functions – Response Spectrum)



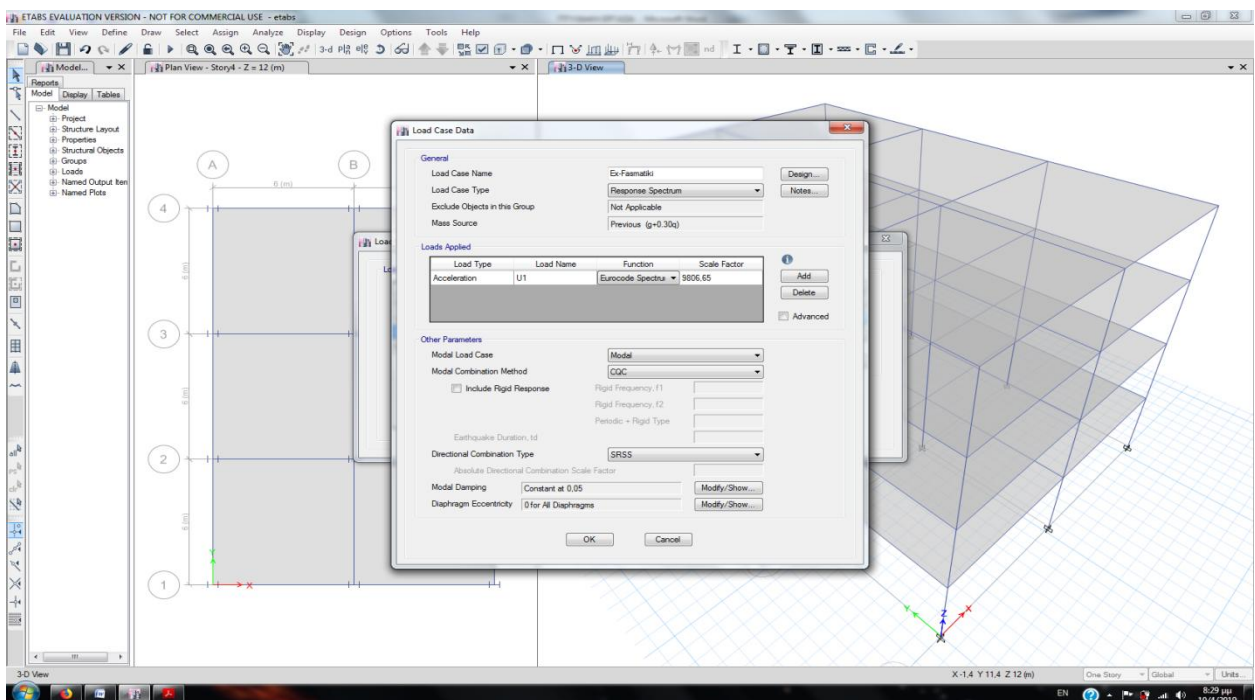
Εικόνα 5.67: Εισαγωγή φάσματος απόκρισης.

Επιλέγουμε το φάσμα του Ευρωκώδικα (Eurocode 8-2004) και δίνουμε τις κατάλληλες τιμές. Για την προκαταρκτική ανάλυση θα γίνει δυναμική φασματική ανάλυση με το ελαστικό φάσμα του κανονισμού, δηλαδή για $q=1$.



Εικόνα 5.68: Εισαγωγή φάσματος Ευρωκώδικα 8.

Για την δυναμική φασματική ανάλυση ορίζουμε ένα Load Case. Επιλέγουμε load case type “Response Spectrum”. Στο “Loads Applied” δίνουμε load type = acceleration, Load Name = U1 (για την διεύθυνση x) και επιλέγουμε Function το φάσμα που είχαμε ορίσει.

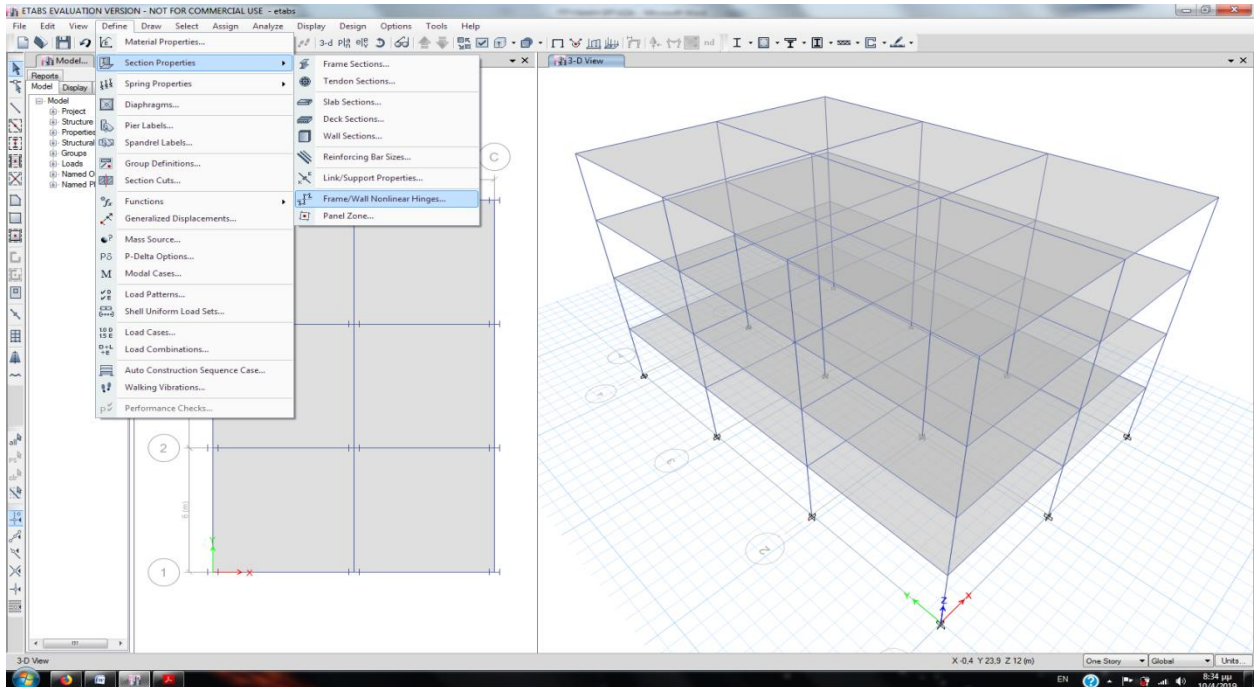


Εικόνα 5.69: Δυναμική φασματική ανάλυση στην διεύθυνση x.

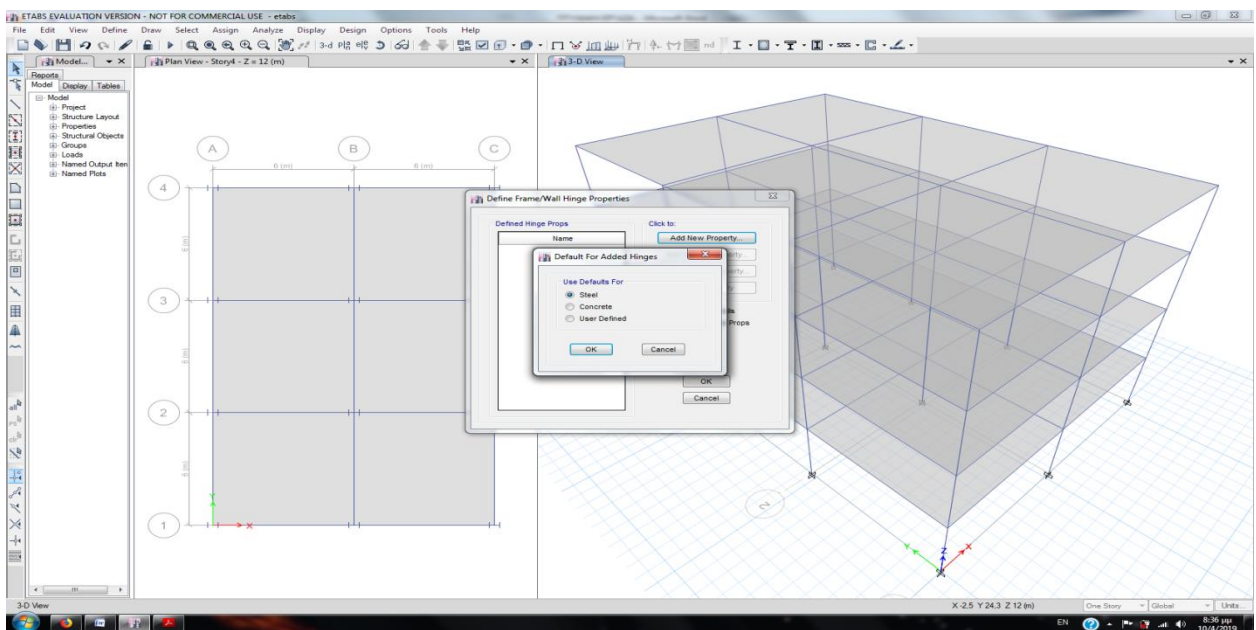
5.5 Ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)

Για να πραγματοποιηθεί ανελαστική στατική ανάλυση πρέπει να ορισθούν οι πλαστικές αρθρώσεις. Θα ορισθούν πλαστικές αρθρώσεις για τις δοκούς και τα υποστυλώματα.

Define – Section properties – Frame/Wall Nonlinear Hinges



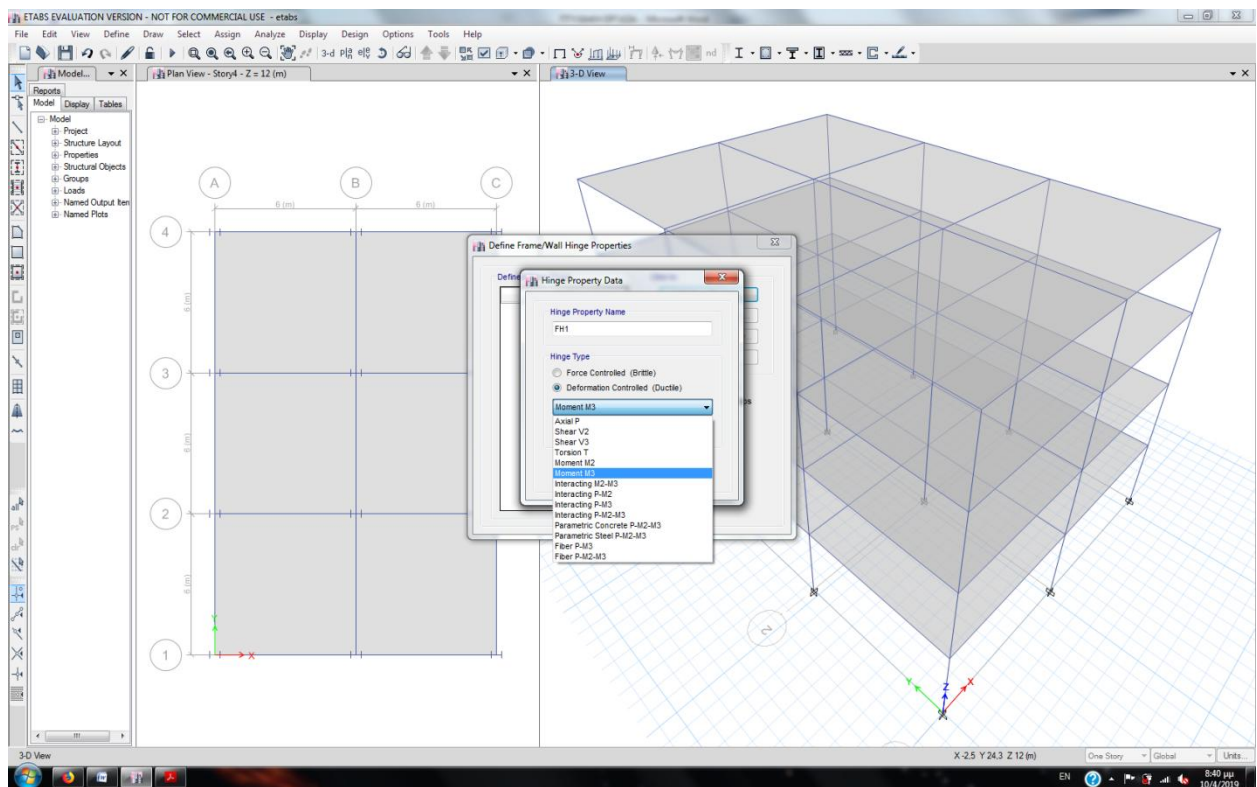
Εικόνα 5.70: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Εικόνα 5.71: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.

Ορίζουμε πλαστική άρθρωση για στοιχείο σκυροδέματος.

Για τις δοκούς που δεν έχουν αξονικό φορτίο και κάμπτονται στην μία μόνο διεύθυνση ορίζουμε πλαστική άρθρωση Moment M3.



Εικόνα 5.72: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.

Στην συνέχεια ορίζουμε το διάγραμμα ροπών – στρωφών της διατομής (ή ροπών – καμπυλοτήτων δίνοντας το μήκος πλαστικής άρθρωσης). Επιλέγουμε το Use Yield Moment, ώστε να υπολογίσει μόνο του την ροπή διαρροής λαμβάνοντας υπόψη τον σπλισμό της διατομής και τα υλικά της. Δίνουμε μόνο το τμήμα του διαγράμματος μετά την διαρροή, δηλαδή το σημείο B είναι το σημείο διαρροής (γι' αυτό και ο λόγος $Moment/SF = 1$). Στο σημείο C ο λόγος είναι 1.1 λαμβάνοντας κάποια κράτυνση. Στο σημείο D και E ο λόγος είναι 0.20, η παραμένουσα δηλαδή αντοχή μετά την αστοχία.

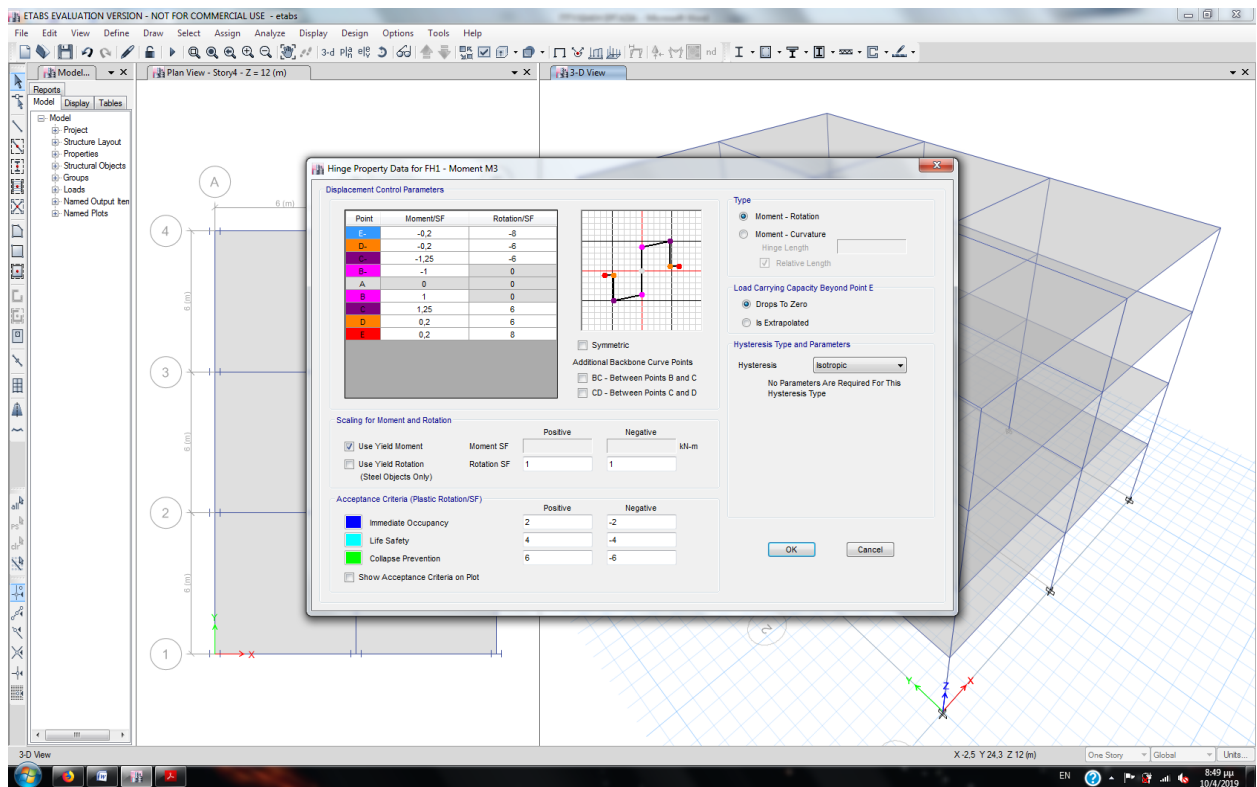
Δεν επιλέγουμε το Use Yield Rotation για να δώσουμε τιμές στις στρωφές. Δίνουμε τιμές για τις στρωφές γι' αυτά τα σημεία του διαγράμματος. Δίνονται επίσης τιμές για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητα:

OC: Immediate Occupancy (Άμεση Χρήση, Περιορισμένες βλάβες).

LS: Life Safety (Προστασία Ζωής, Σημαντικές βλάβες).

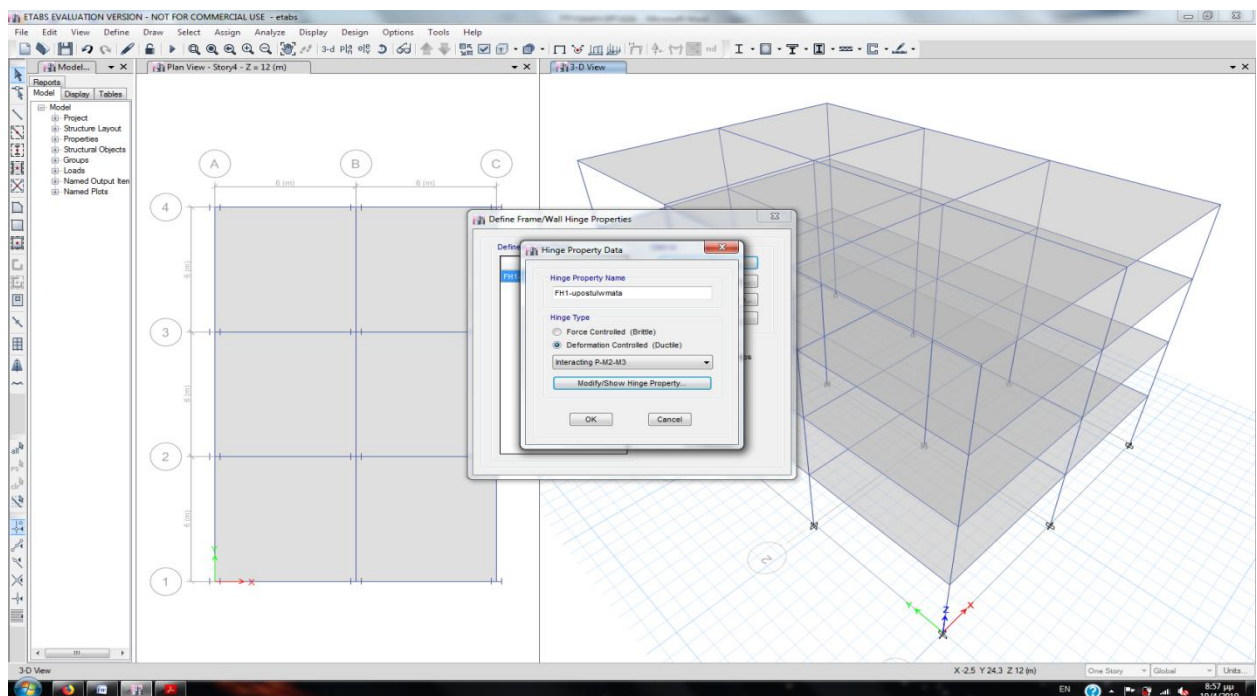
CP: Collapse Prevention (Οιονεί Κατάρρευση).

και επιλέγουμε και το Show Acceptance Criteria on Plot.

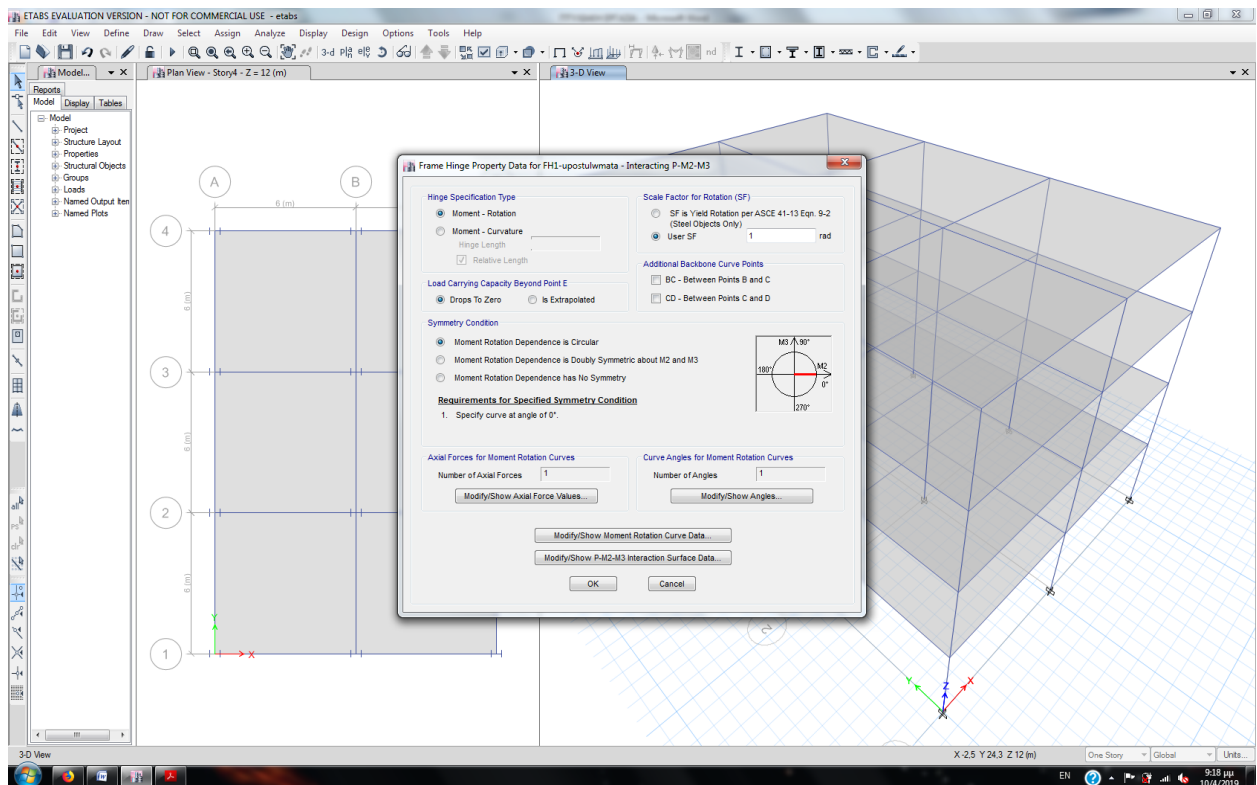


Εικόνα 5.73: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.

Για τα υποστυλώματα που έχουν αξονικό φορτίο και κάμπτονται στις δύο διευθύνσεις ορίζουμε πλαστική άρθρωση Interacting P-M2-M3.



Εικόνα 5.74: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Εικόνα 5.75: Ορισμός διαγράμματος ροπών – στροφών.

Στην συνέχεια ορίζουμε το διάγραμμα ροπών – στροφών της διατομής (ή ροπών – καμπυλοτήτων δίνοντας το μήκος πλαστικής άρθρωσης). Επιλέγουμε το Use Yield Moment, ώστε να υπολογίσει μόνο του την ροπή διαρροής λαμβάνοντας υπόψη τον σπλισμό της διατομής και τα υλικά της. Δίνουμε μόνο το τμήμα του διαγράμματος μετά την διαρροή, δηλαδή το σημείο B είναι το σημείο διαρροής (γι' αυτό και ο λόγος $Moment/SF = 1$). Στο σημείο C ο λόγος είναι 1.25 λαμβάνοντας κάποια κράτυνση. Στο σημείο D και E ο λόγος είναι 0.20, η παραμένουσα δηλαδή αντοχή μετά την αστοχία.

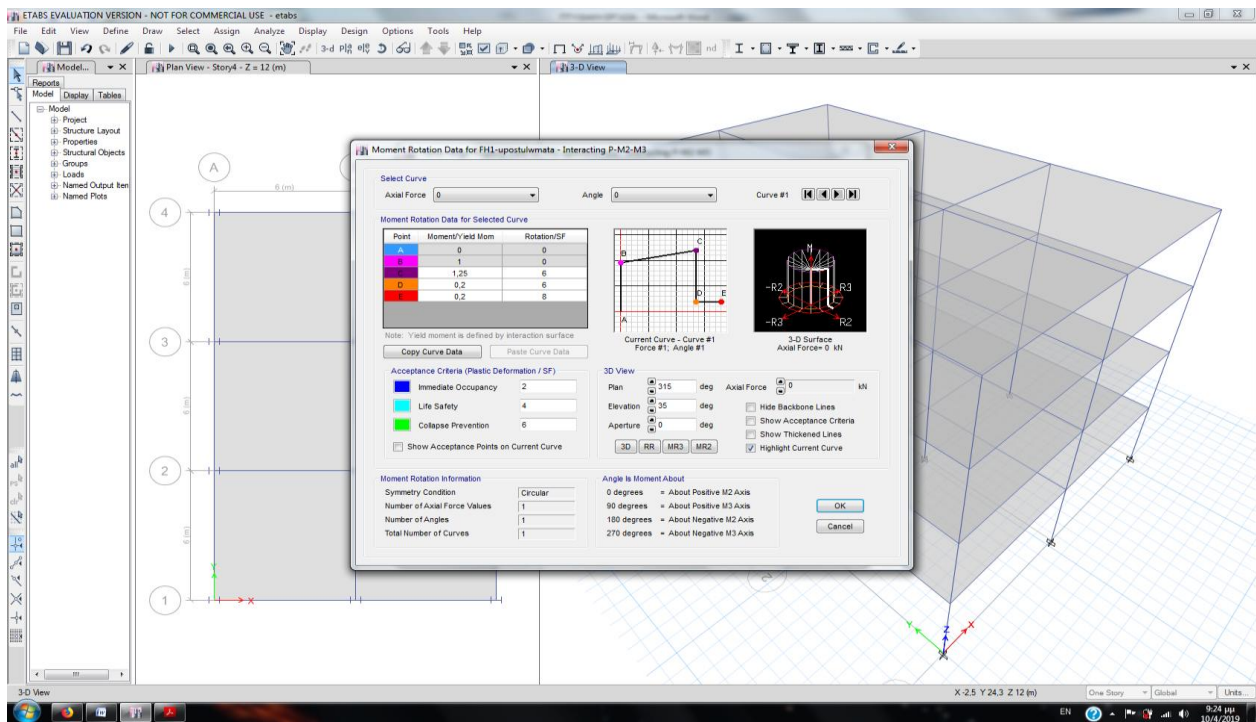
Αντίστοιχα δίνουμε τιμές για τις στροφές γι' αυτά τα σημεία. Δίνονται τιμές για τα σημεία αυτά και τιμές για τις τρεις στάθμες επιτελεστικότητας:

OC: Immediate Occupancy (Άμεση Χρήση, Περιορισμένες βλάβες).

LS: Life Safety (Προστασία Ζωής, Σημαντικές βλάβες).

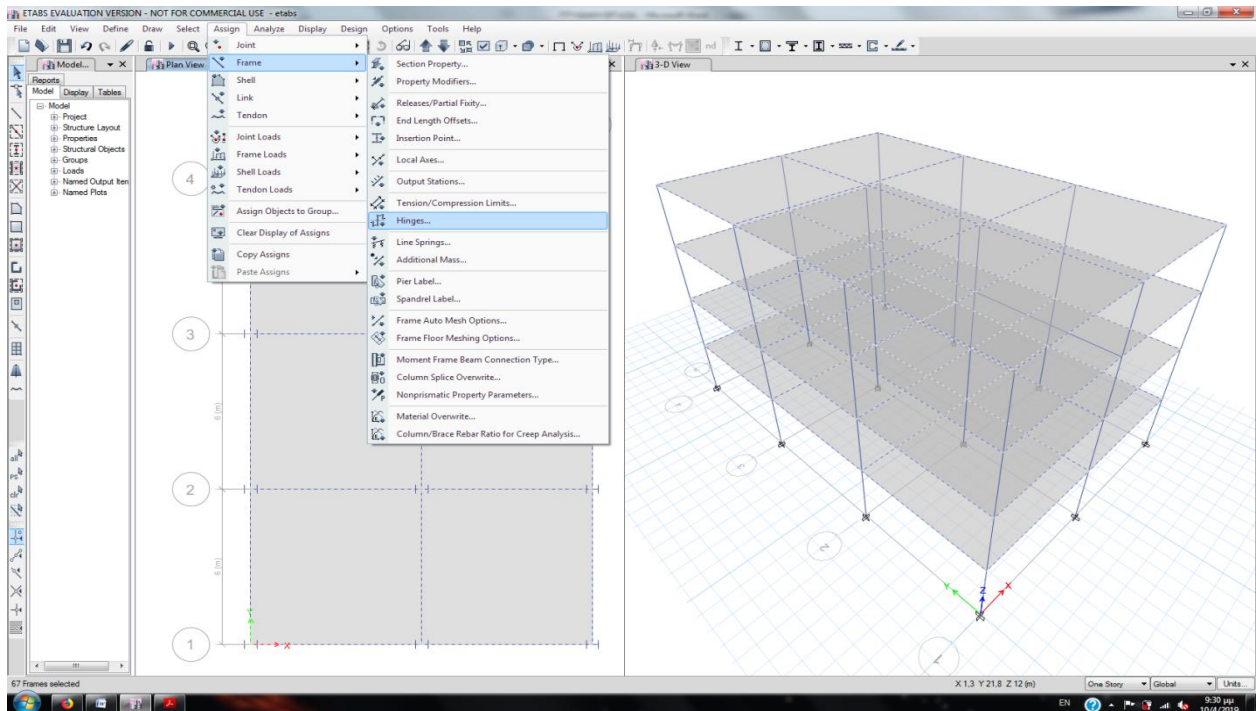
CP: Collapse Prevention (Οιονεί Κατάρρευση).

και επιλέγουμε και το Show Acceptance Criteria on Plot.

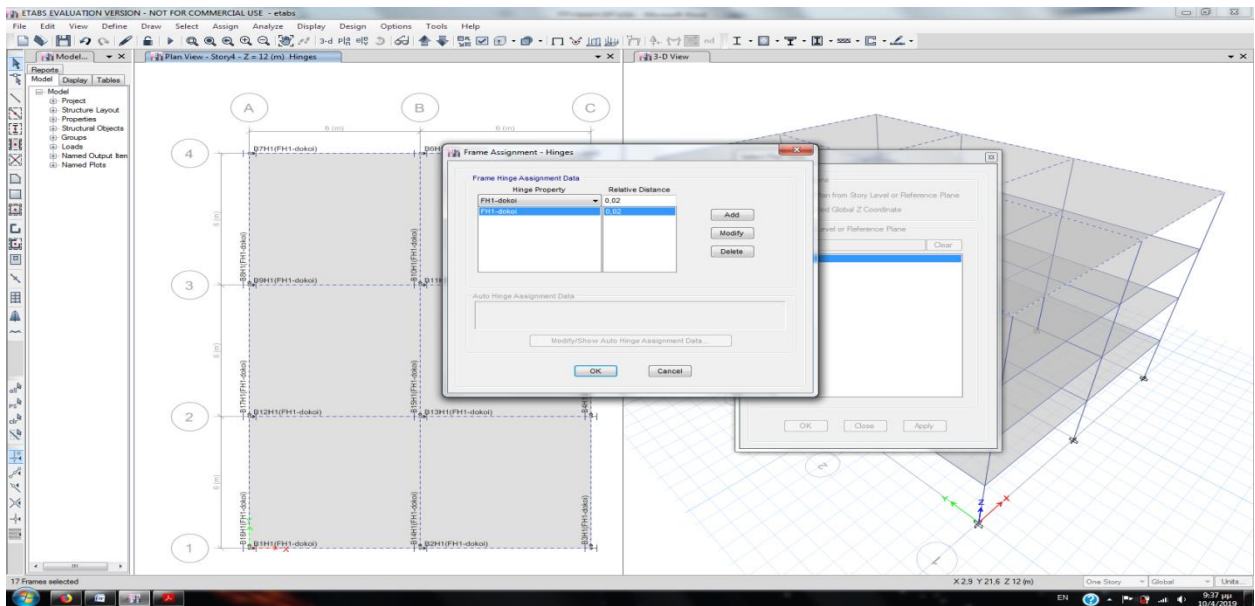


Εικόνα 5.76: Ορισμός διαγράμματος ροπών – στρωφών.

Αφού ορίσουμε τις πλαστικές αρθρώσεις πρέπει να τις κάνουμε assign στα μέλη. Επιλέγουμε αρχικά τις δοκούς και στην συνέχεια τα υποστυλώματα και δίνουμε τις πλαστικές αρθρώσεις (Assign – Frame – Hinges). Ορίζουμε τις θέσεις πιθανής πλαστικής άρθρωσης. Για οριζόντιες φορτίσεις οι πιθανές θέσεις είναι η αρχή και το τέλος της δοκού, το πάνω και το κάτω τμήμα του υποστυλώματος. Κατά συνέπεια ορίζουμε πλαστικές αρθρώσεις σε σχετική απόσταση (Relative Distance) 0 και 1, δηλαδή στην αρχή και το τέλος.

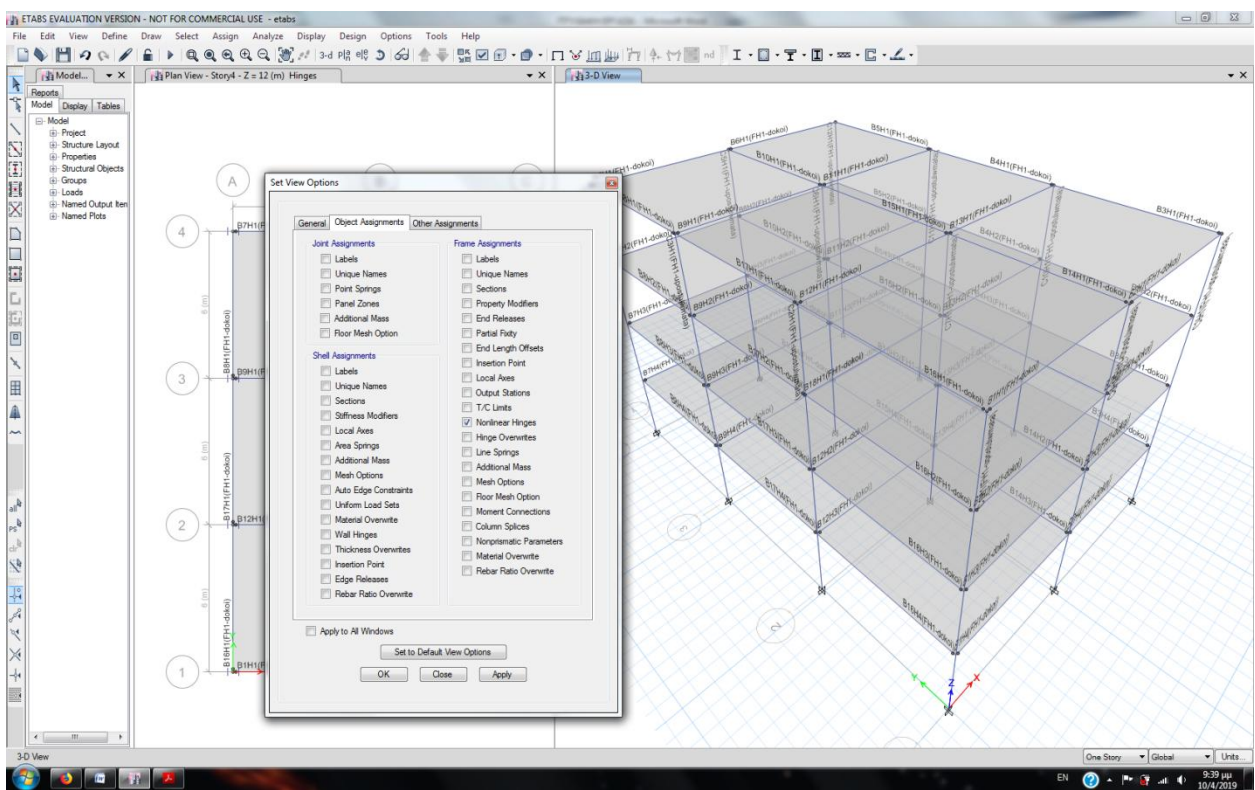


Εικόνα 5.77: Απόδοση πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη.



Εικόνα 5.78: Απόδοση πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη.

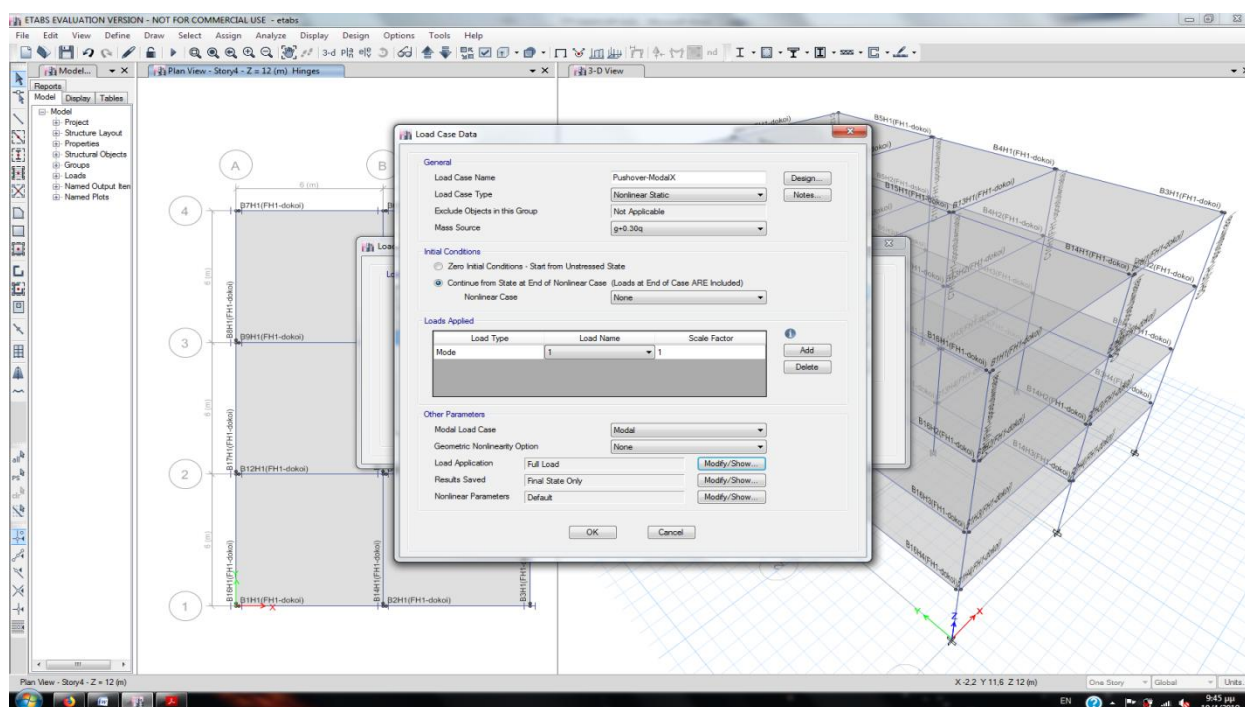
Αν θέλουμε να εμφανίζονται οι θέσεις που ορίσαμε πλαστικές αρθρώσεις (στον απαραμόρφωτο φορέα), επιλέγουμε το κουμπι Set Display Options (Ctrl+W) και επιλέγουμε τις πλαστικές αρθρώσεις στα Frame Assignments.



Εικόνα 5.79: Επιλογή εμφάνισης πλαστικών αρθρώσεων.

Πριν την εισαγωγή του load case, πρέπει να ορίσουμε τα κατακόρυφα φορτία ως μη γραμμική φόρτιση. Αυτό το κάνουμε ώστε να φορτιστεί η κατασκευή με τα κατακόρυφα φορτία (συνήθως $g + \psi_2 q$) πριν την πραγματοποίηση της pushover. Διαφορετικά θα φορτιστεί η κατασκευή μόνο με οριζόντια φορτία.

Αυτό γίνεται στα Load Combinations. Επιλέγουμε τον συνδυασμό φορτίσεων με τον οποίο θέλουμε να φορτιστεί η κατασκευή πριν από το pushover και την μετατρέπουμε σε μη γραμμική φόρτιση πατώντας το κουμπί “Convert Combos to Nonlinear Cases...”



Εικόνα 5.80: Ορισμός νέου Load Case για την μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover).

Επιλέγεται ως Load Case Type = Nonlinear Static

Επιλέγεται το Mass Source, στο οποίο ωρύτερα έχουμε ορίσει να παίρνει τις μάζες από τον συνδυασμό $g + \psi_2 q$.

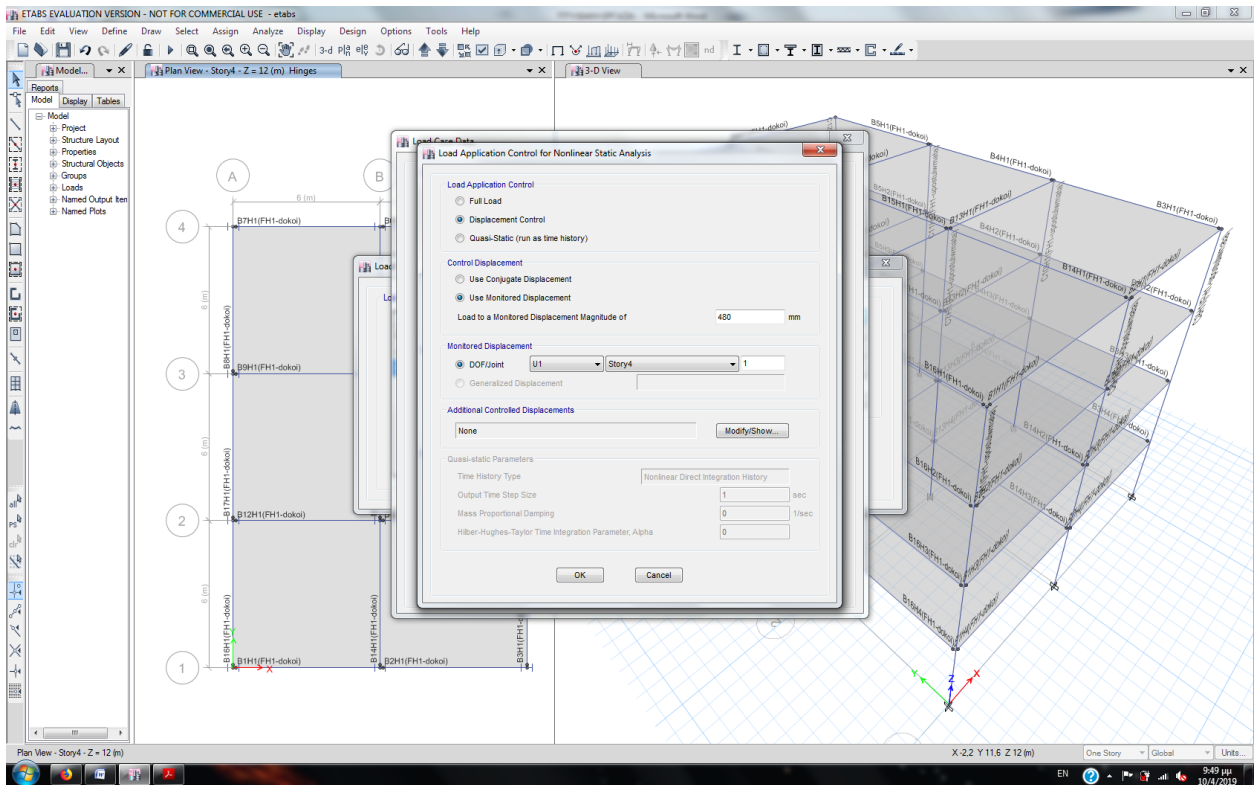
Επιλέγεται η φόρτιση της κατασκευής πριν από το pushover. Επιλέγουμε την μη γραμμική φόρτιση που φτιάξαμε προηγουμένως, με τα κατακόρυφα φορτία.

Στην συνέχεια, στο Loads Applied θα δοθεί η φόρτιση.

Η κατανομή της φόρτισης μπορεί να είναι ομοιόμορφη, τριγωνική ή βάσει της 1ης ιδιομορφής.

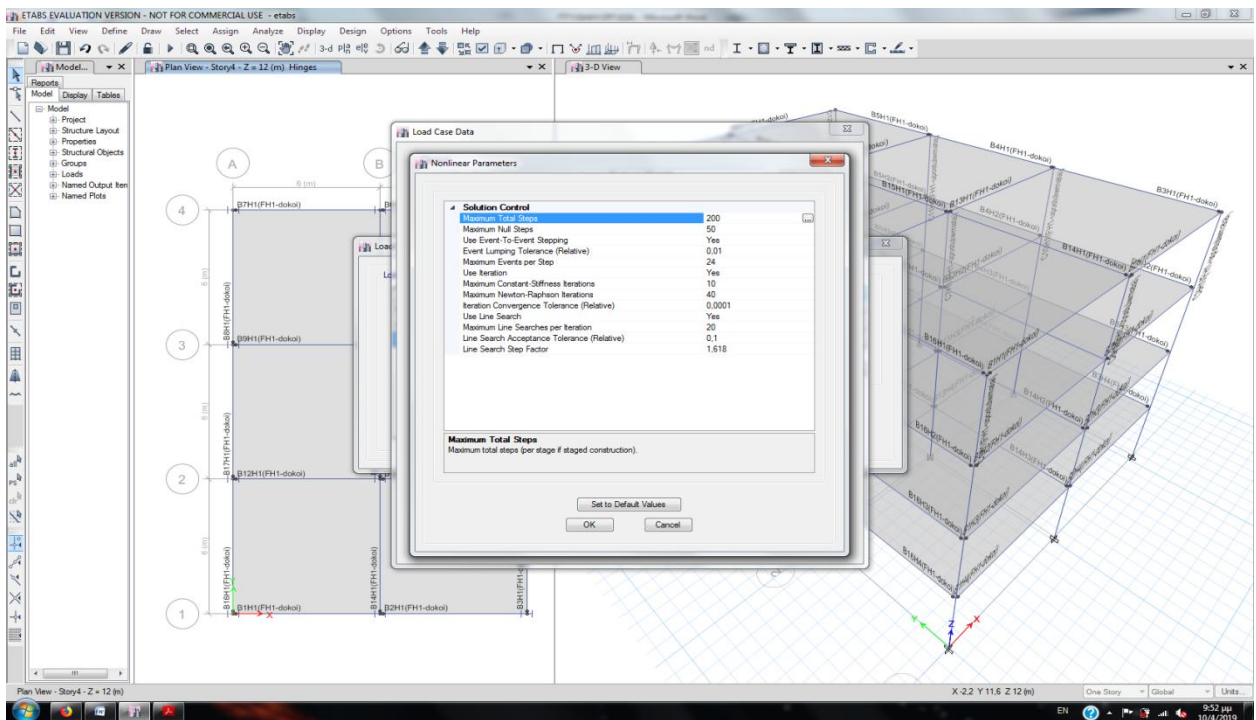
Για να δοθεί βάσει της 1ης ιδιομορφής, επιλέγουμε Load Type = Mode. Στο Load Name επιλέγουμε την 1η ιδιομορφή στην διεύθυνση της φόρτισης (δηλαδή 1η ή 2η ιδιομορφή, ανάλογα την ιδιομορφή που είναι μετακινήσιμη στην διεύθυνση x και y).

Στο Load Application επιλέγουμε Force ή Displacement Control. Επιλέγεται μια μέγιστη μετακίνηση για να παραμορφωθεί το κτίριο στην περίπτωση του Displacement Control και επιλέγεται ο τελευταίος όροφος για να καταγραφούν οι μετακινήσεις (Monitored Displacement).



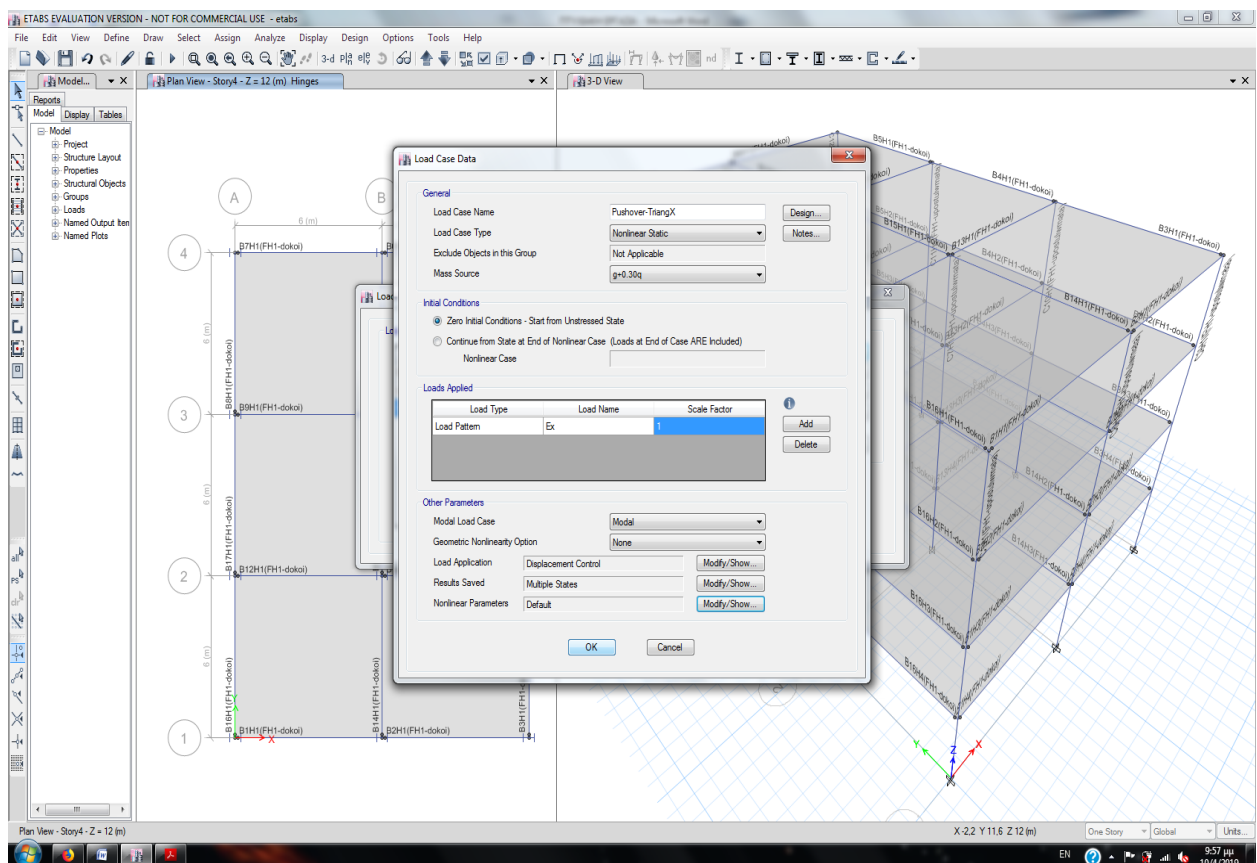
Εικόνα 5.81: Load application control for nonlinear static analysis.

Στα Nonlinear parameters αυξάνουμε τα βήματα και ίσως μειώσουμε λίγο το convergence tolerance στην περίπτωση που δεν υπάρχει σύγκλιση για να προχωρήσει λίγο περισσότερο η ανάλυση.



Εικόνα 5.82: Nonlinear parameters.

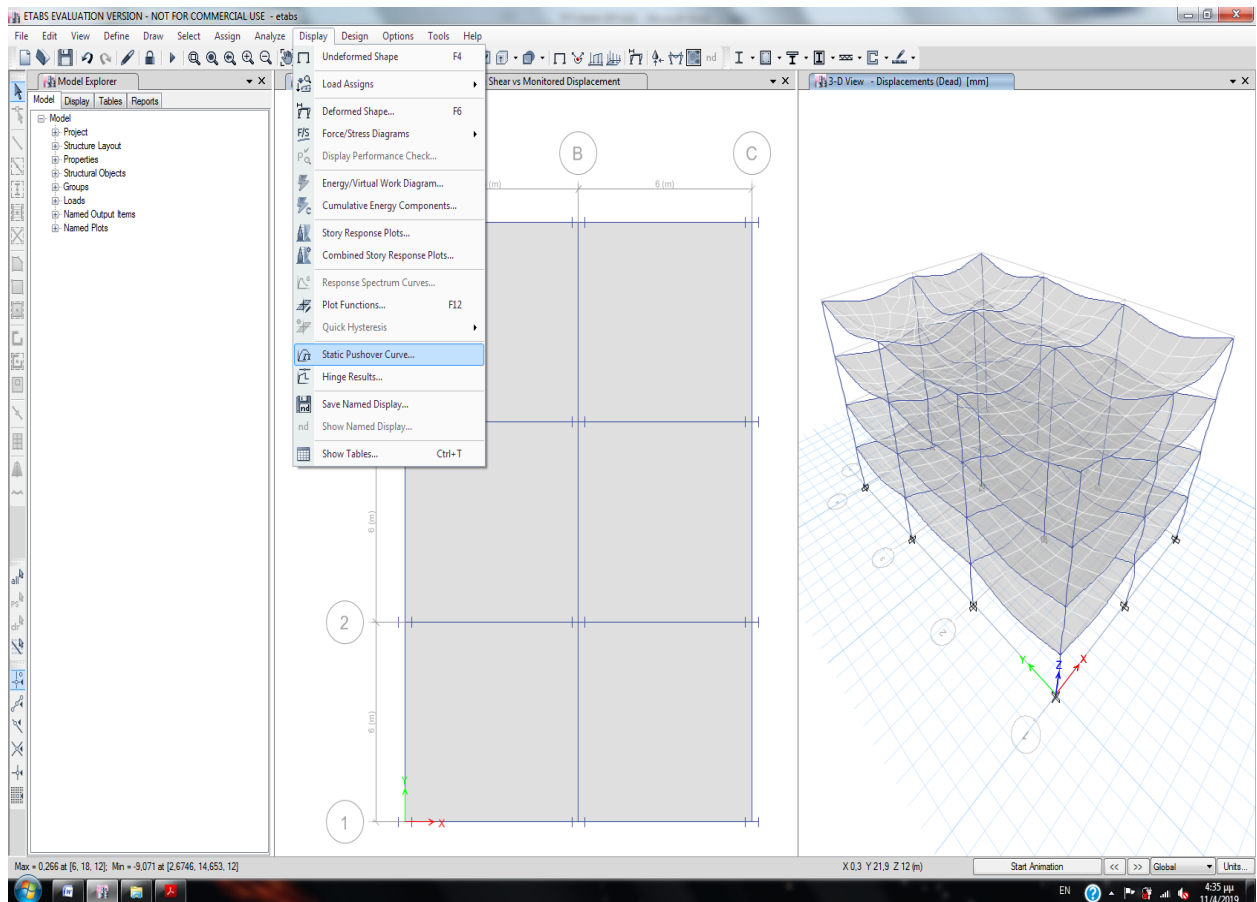
Στην περίπτωση ομοιόμορφης ή τριγωνικής κατανομής των φορτίων στο pushover, πρέπει να έχει προηγουμένως ορισθεί μία φόρτιση με ομοιόμορφα ή τριγωνικά φορτία αντίστοιχα. Επιλέγεται στο Load Type = Load Pattern και δίνεται στο Load Name το όνομα της φόρτισης σύμφωνα με την οποία θα γίνει η κατανομή των φορτίων καθ' ύψος για το pushover. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει ορισθεί μια τριγωνική φόρτιση “Ex” αυτόματα από το πρόγραμμα, σύμφωνα με την ισοδύναμη στατική ανάλυση κατά Ευρωκώδικα 8, όπως στο επόμενο κεφάλαιο. Και πάλι ορίζεται η φόρτιση με τα κατακόρυφα φορτία να προηγηθεί της pushover.



Εικόνα 5.83: Nonlinear parameters.

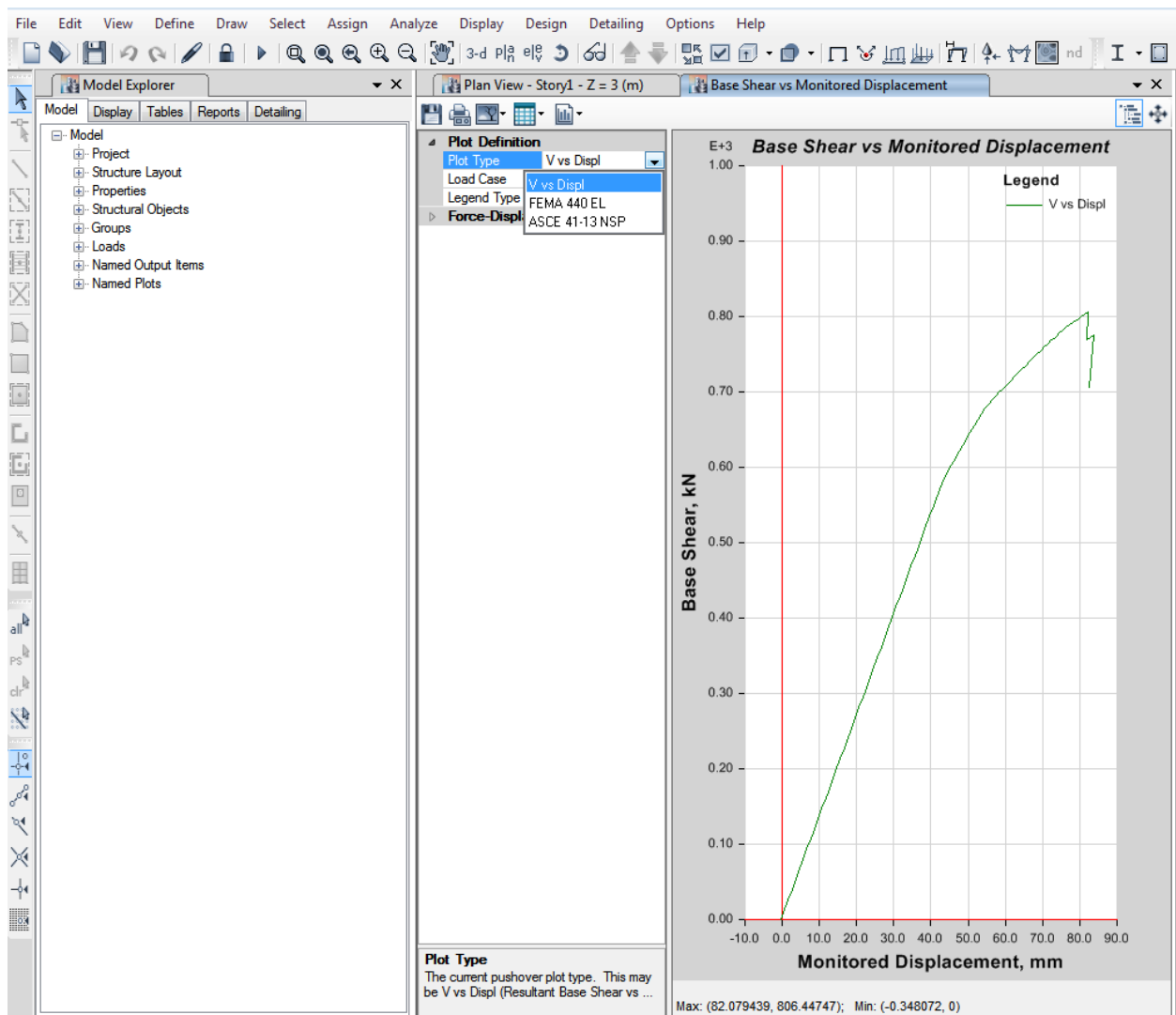
5.6 Αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης

Όταν τρέξει η ανάλυση επιλέγουμε να δούμε την καμπύλη του pushover.

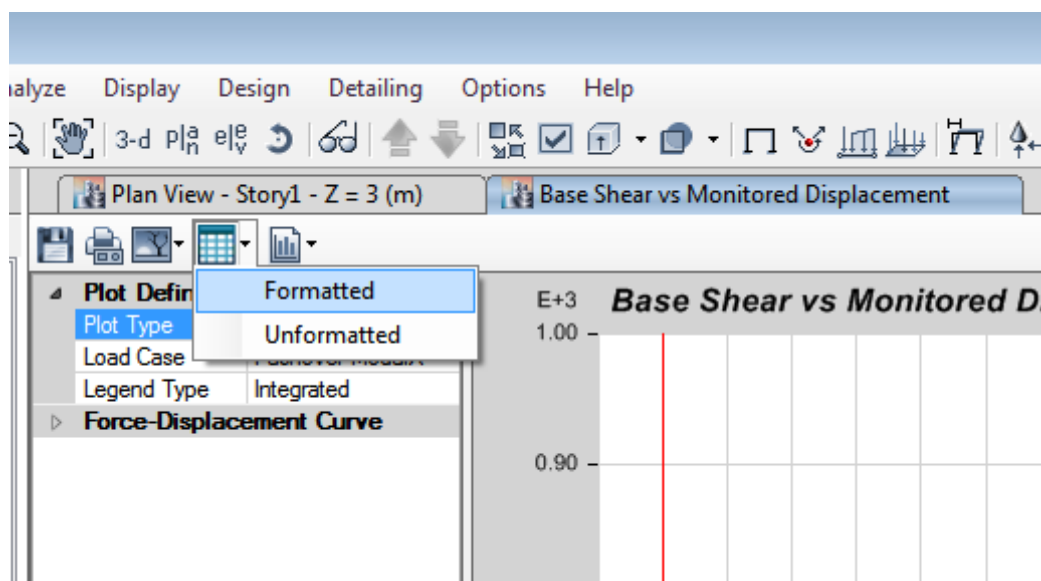


Εικόνα 5.84: Επιλογή καμπύλης pushover.

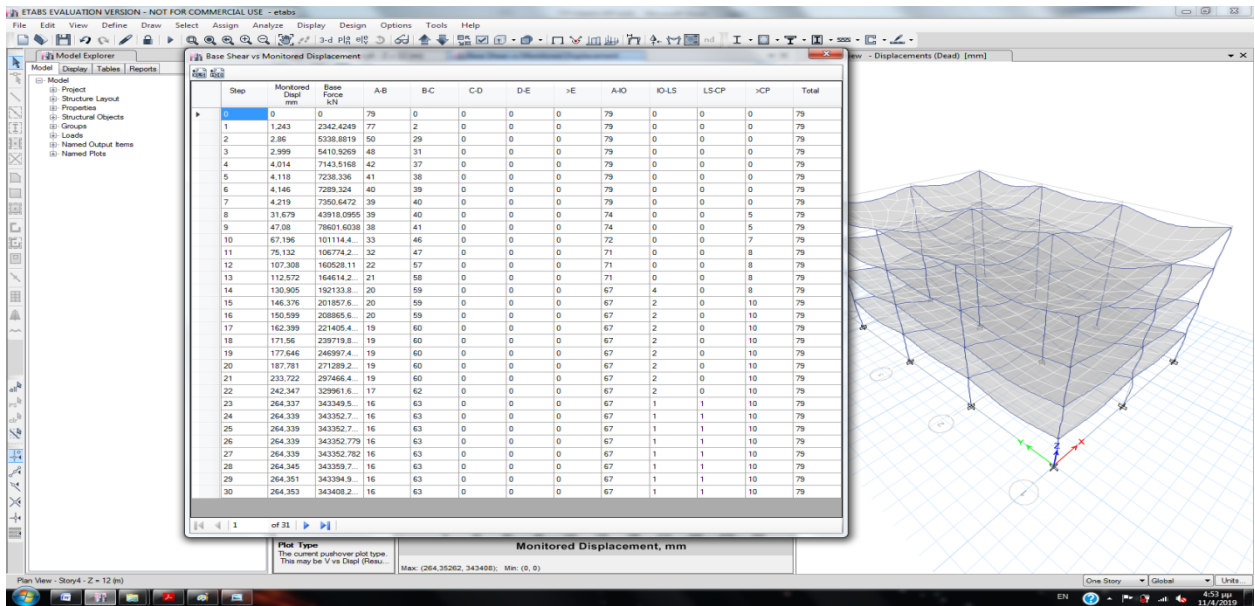
Επιλέγουμε Plot Type = “V vs Displ” για να δούμε το διάγραμμα τέμνουσα βάσης – μετακίνηση οροφής (pushover). Για να πάρουμε τις τιμές για να τις εξάγουμε στο excel μπορούμε να πατήσουμε το κατάλληλο κουμπί και να επιλέξουμε Formatted. Επιλέγοντας μετά τις τιμές τις αντιγράφουμε στο excel.



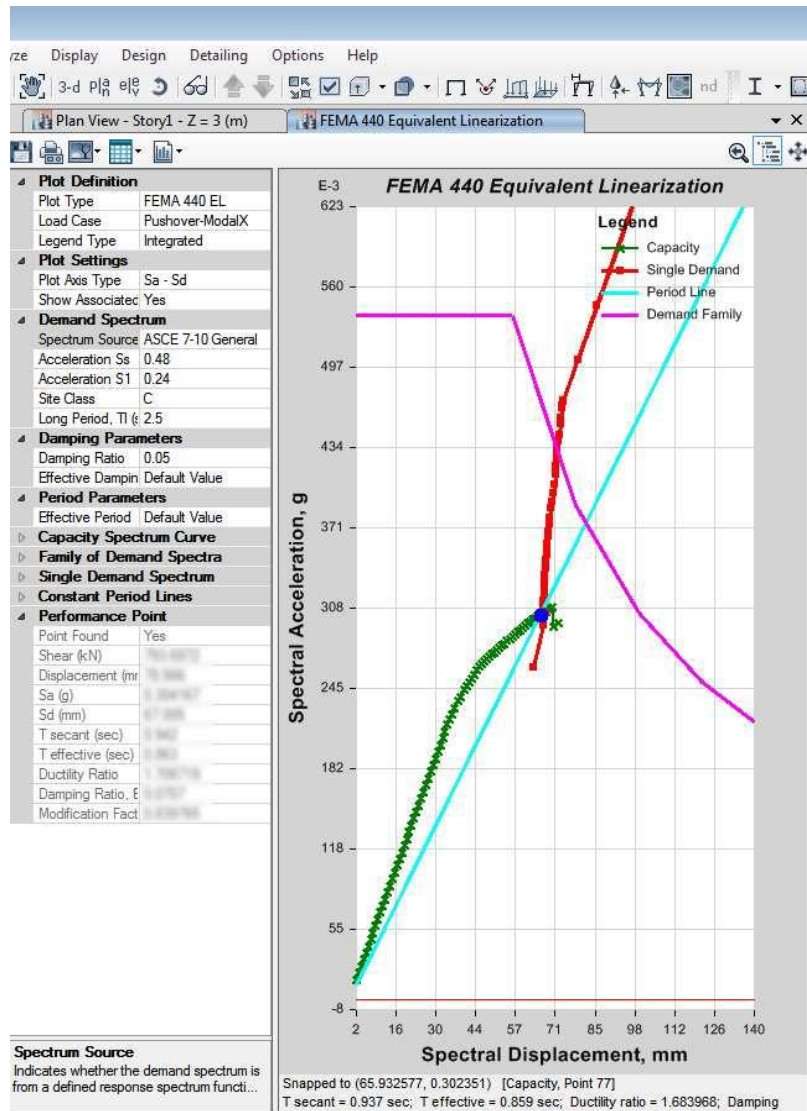
Εικόνα 5.85: Επιλογή καμπύλης pushover.



Εικόνα 5.86: Επιλογή για εξαγωγή τιμών καμπύλης pushover.

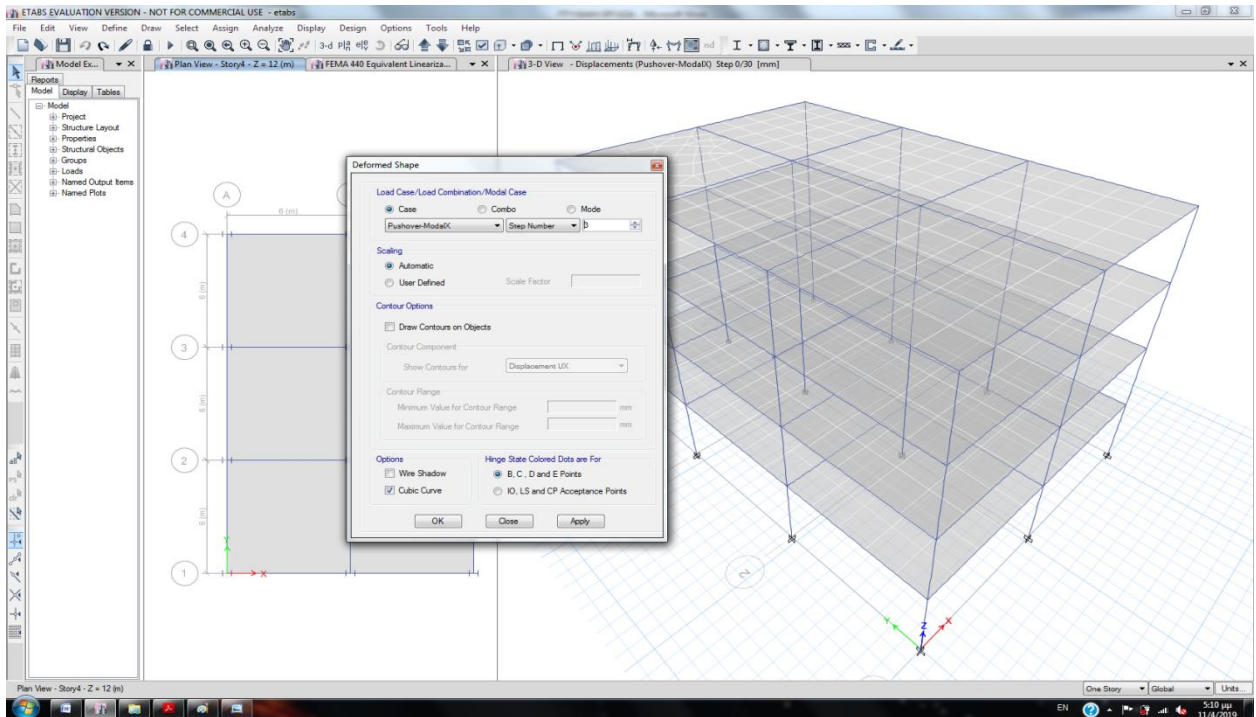


Εικόνα 5.87: Τιμές καμπύλης pushover.

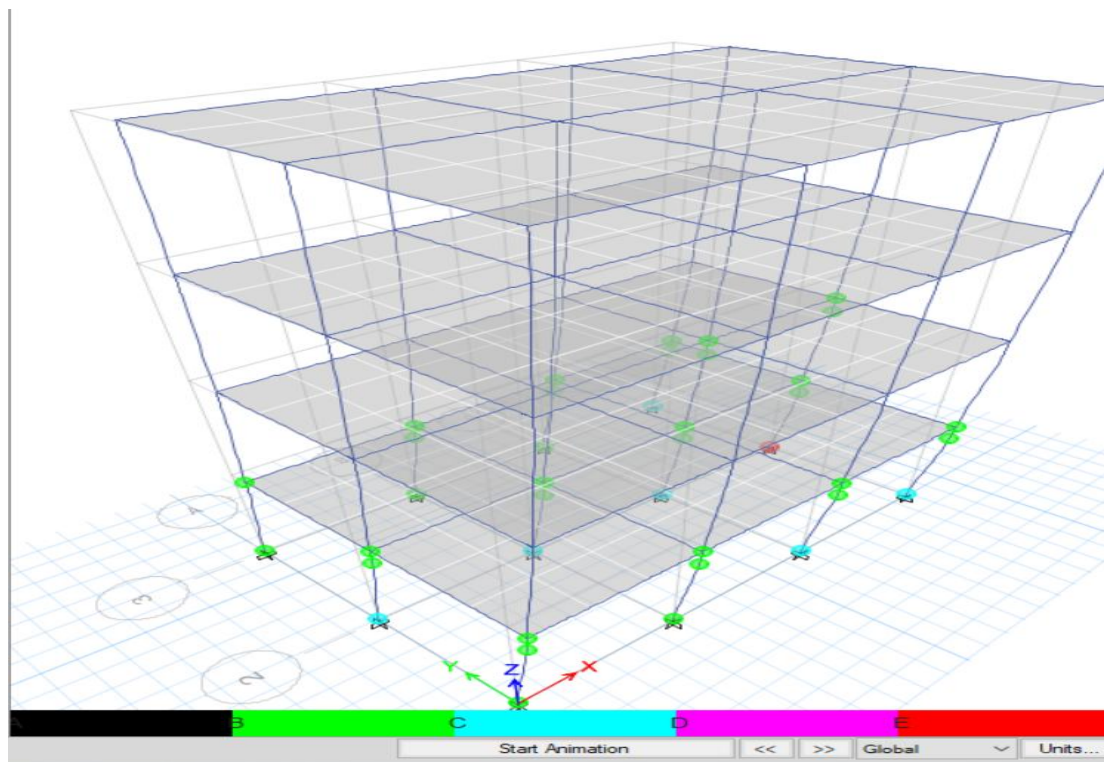


Εικόνα 5.88: Καμπύλη ADRS και σημείο επιτελεστικότητας (performance point).

Για να δούμε τις πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή επιλέγουμε να δούμε τον παραμορφωμένο φορέα και εκεί επιλέγουμε ως φόρτιση την φόρτιση του pushover και μετά μπορούμε να δούμε τις πλαστικές αρθρώσεις σε κάθε βήμα. Επιλέγουμε την φόρτιση, το βήμα και αν θέλουμε να βλέπουμε με χρώματα στις πλαστικές αρθρώσεις ανάλογα με τα σημεία B, C, D, E της καμπύλης ροπών – στρεφών ή όταν ξεπεραστεί κάποια στάθμη επιτελεστικότητας.



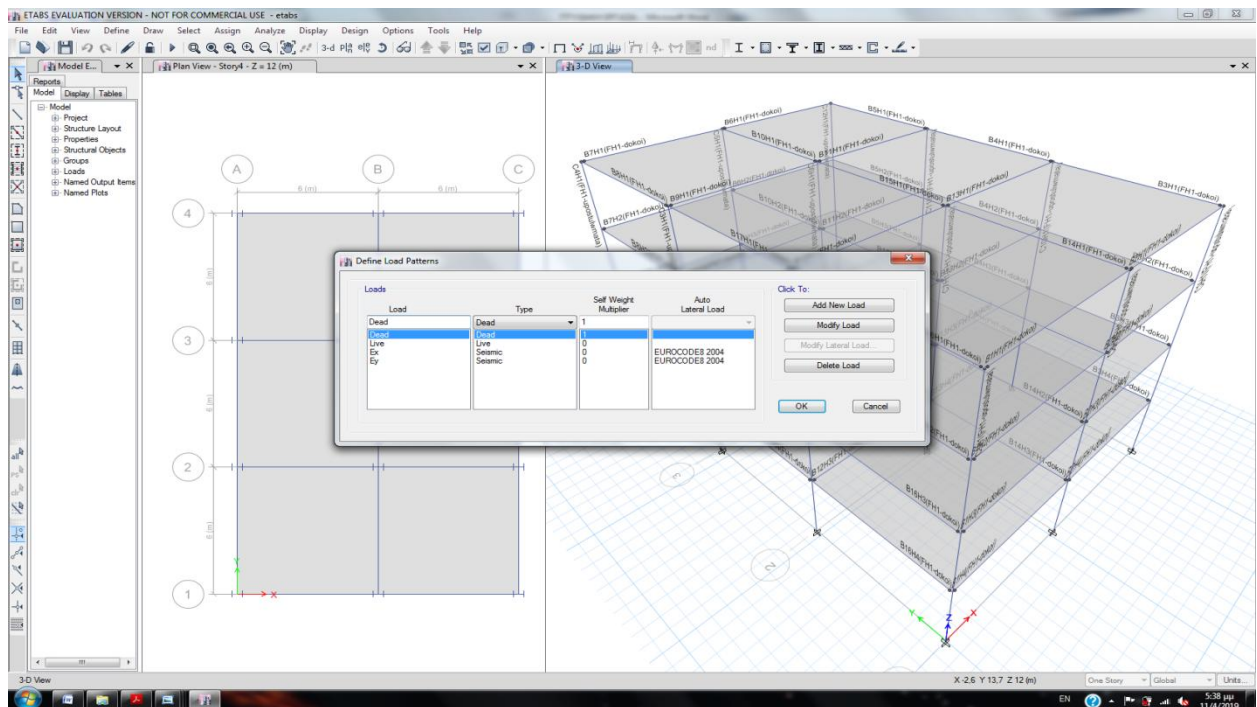
Εικόνα 5.89: Επιλογές για τις πλαστικές αρθρώσεις για την φόρτιση pushover στον παραμορφωμένο φορέα.



Εικόνα 5.90: Πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή.

5.7 Ισοδύναμη στατική ανάλυση

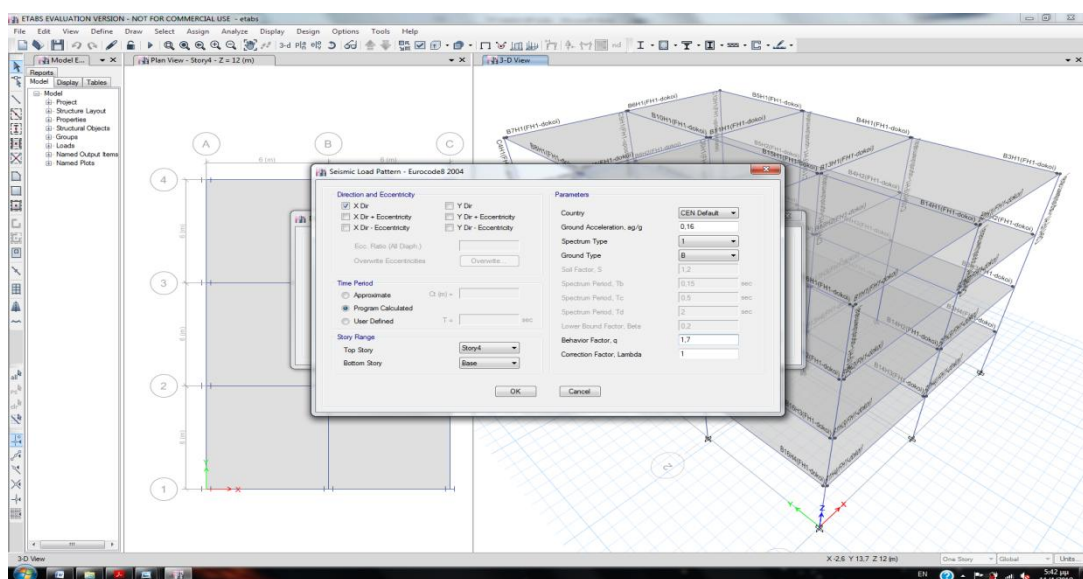
Ορίζουμε την φόρτιση για τα οριζόντια φορτία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.
Define – Load Patterns



Εικόνα 5.91: Define load patterns.

Προσθέτουμε μια φόρτιση με ονομασία Ex, Type = seismic, self weight multiplier = 0 (ώστε να μην πάρει το ίδιο βάρος σ' αυτήν την φόρτιση) και επιλέγουμε Auto Lateral Load = Eurocode 8 2004 ώστε να κατασκευάσει το πρόγραμμα μόνο του τα πλευρικά φορτία για ισοδύναμη στατική ανάλυση, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.

Πατάμε “Add New Load” για να προσθέσει την φόρτιση.



Εικόνα 5.92: Seismic Load Pattern – Eurocode 8 2004.

Επιλέγουμε στο Direction and eccentricity μόνο το X Dir ή το Y Dir ώστε να φτιάξει μια φόρτιση με φορτία μόνο στην μια διεύθυνση που θέλουμε χωρίς να λάβει υπόψη εκκεντρότητες. Δίνουμε στο Story Range τον πιο πάνω όροφο και στο bottom story την στάθμη του ισογείου (ώστε να μην φορτίσει το υπόγειο στην περίπτωση που υπάρχει υπόγειο). Δίνουμε στα Parameters τα δεδομένα του φάσματος. (Για την περίπτωση που θέλουμε την φόρτιση μόνο για να έχουμε την κατανομή των δυνάμεων για να την χρησιμοποιήσουμε στο pushover δεν έχει σημασία τι τιμές θα δώσουμε στο φάσμα). Με παρόμοιο τρόπο δίνουμε την φόρτιση στην άλλη διεύθυνση. [15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η μέθοδος Pushover τελεί υπό συνεχή αναθεώρηση, ενώ στους σύγχρονους κανονισμούς επί του παρόντος χρησιμοποιείται η μέθοδος με βάση τις μετακινήσεις. Πολλά έχουν ειπωθεί για την ακρίβεια και τη χρησιμότητα της Pushover στον αντισεισμικό ανασχεδιασμό ή αποτίμηση των κατασκευών. Αυτό που ουσιαστικά μπορεί να παράσχει στον μελετητή είναι μια προσεγγιστική εκτίμηση των απαιτούμενων παραμορφώσεων των κρίσιμων διατομών της κατασκευής, να αποκαλύψει πιθανές αδυναμίες του φορέα, να ανιχνεύσει περιοχές του φορέα οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλες απαιτήσεις σε παραμορφώσεις και να αξιολογήσει την ευστάθεια του δομικού συστήματος στο σύνολο του. Η Pushover δεν μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής, ιδιαίτερα όταν είναι σημαντική η συνεισφορά των ανώτερων ιδιομορφών στη σεισμική απόκριση του φορέα. Τα αποτελέσματα της Pushover εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή του προφίλ των οριζόντιων σεισμικών φορτίων που επιβάλλονται. Μεγάλη κριτική έχει δεχθεί η επιλογή της μετακίνησης της οροφής της κατασκευής ως παραμέτρου ελέγχου και συνολικής απόκρισης της κατασκευής. Το «έργο» που ορίζεται από το εμβαδό της καμπύλης τέμνουσας βάσης – μετακίνησης οροφής (καμπύλη Pushover) δεν έχει φυσική σημασία και ήδη έχει προταθεί η χρήση μιας ισοδύναμης μετακίνησης (Hernandez-Montes, Kwon, Aschheim, 2004). Οι αντισεισμικοί κανονισμοί (FEMA 356, EC-8) επιτρέπουν τη χρήση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Στην περίπτωση που η συνεισφορά των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, ο FEMA 356 επιβάλλει την παράλληλη χρήση της δυναμικής φασματικής μεθόδου. Ο Ευρωκώδικας 8 δεν έχει ανάλογο περιορισμό στην εφαρμογή της ανελαστικής στατικής μεθόδου ανάλυσης. Οι δύο κανονισμοί απαιτούν τη χρήση δύο τουλάχιστον καθ' ύψος κατανομών της εγκάρσιας φόρτισης με στόχο να «περιβάλλουν» την πραγματική σεισμική απόκριση της κατασκευής. Συγκεκριμένα, ο FEMA 356 προβλέπει τη χρήση τουλάχιστον δύο κατανομών από δύο ομάδες: Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνεται μία κατανομή ανάλογη των υψών των ορόφων, μία κατανομή που ακολουθεί τη θεμελιώδη ιδιομορφή και μία κατανομή η οποία είναι ανάλογη των τεμνουσών των ορόφων, όπως αυτές προκύπτουν από επαλληλία των ιδιομορφικών αποκρίσεων της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη και ανώτερες ιδιομορφές. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει μία ομοιόμορφη κατανομή (ανάλογη προς τη μάζα των ορόφων) και μία προσαρμοζόμενη κατανομή. Ο EC-8 περιλαμβάνει μία «ομοιόμορφη» και μία «ιδιομορφική» κατανομή. Υπό την προϋπόθεση ύπαρξης επαρκούς πλαστιμότητας στις θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων, η Pushover φάνηκε να δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα ως προς τη μέγιστη τέμνουσα βάσης που μπορεί να δεχτεί το κτίριο χωρίς να καταρρεύσει, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση της για το σχεδιασμό μιας νέας κατασκευής ή την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός υπάρχοντος κτιρίου δίνει αποτελέσματα προς την πλευρά της ασφάλειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Στατική Ανελαστική Ανάλυση, Μέθοδος ελέγχου μετατοπίσεων, Μέθοδος Pushover, ΛΗΛογισμική.
- [2] ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κανονισμός Επεμβάσεων.
- [3] Υπομονάδα ‘Υπερωθητική’ , Στατική υπερωθητική ανάλυση με βάση τους ΕΚ8.1 ,ΕΚ8.3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ, Εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης & οδηγός χρήσης, ΡΑΦ.
- [4] 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.
- [5] «Συγκριτική μελέτη Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού και EC8 για πολύροφα μεταλλικά κτήρια», -Δημητράας –Δημήτρης.
- [6] Κουζούπης Κ. (2011). *Σχεδιασμός Πολύροφου Μεταλλικού Κτιρίου με βάση τους Ευρωκώδικες*, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
- [7] ΕΛΟΤ EN 1998 Ευρωκώδικας 8: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός», CEN Eurocode 8. 2004-2005. Design of structures for earthquake resistance-Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, EN 1998-3:2005. Brussels : European Committee for Standardization, 2005.
- [8] ΕΑΚ 2000. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Αθήνα.
- [9] Ευρωκώδικας 8: «Αντισεισμικός σχεδιασμός», Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, CEN, ENV 1998-1.
- [10] Ευρωκώδικας 1: «Βάση μελέτης και δράσεων στις κατασκευές», Μέρος 1-1: Βάσεις Σχεδιασμού, CEN, ENV 1991-1:2002.
- [11] Ερμόπουλος Ι. «Ευρωκώδικας 1-Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών, Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής». 2η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005.
- [14] EN 1993-1-4: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-4.
- [15] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΡΕΠΑΠΗΣ « ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ETABS », ΑΘΗΝΑ 11/2014.